

引用格式:王艳杰,王卷乐,魏海硕,等.基于稀疏样点的蒙古国产草量估算方法研究[J].地球信息科学学报,2020,22(9):1814-1822. [Wang Y J, Wang J L, Wei H S, et al. Study on estimation method of Mongolia grassland production based on sparse samples[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(9):1814-1822.] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190675

基于稀疏样点的蒙古国产草量估算方法研究

王艳杰^{1,2}, 王卷乐^{2,4*}, 魏海硕^{2,3}, Altansukh Ochir⁵, Davaadorj Davaasuren⁶, Sonomdagva Chonokhuu⁵

1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室,北京 100101; 3. 山东理工大学建筑工程学院,淄博 255049; 4. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心,南京 210023; 5. 蒙古国立大学工程与应用科学学院,乌兰巴托 210646; 6. 蒙古国立大学艺术与科学学院,乌兰巴托 210646

Study on Estimation Method of Mongolia Grassland Production based on Sparse Samples

WANG Yanjie^{1,2}, WANG Juanle^{2,4*}, WEI Haishuo^{2,3}, ALTANSUKH Ochir⁵, DAVAADORJ Davaasuren⁶, SONOMDAGVA Chonokhuu⁵

1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. School of Civil and Architectural Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China; 4. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China; 5. School of Engineering and Applied Sciences, National University of Mongolia, Ulaanbaatar 210646, Mongolia; 6. School of the Art & Sciences, National University of Mongolia, Ulaanbaatar 210646, Mongolia

Abstract: Grasslands are one of the most widely distributed land cover vegetation types across the globe. They play a significant role in developing animal husbandry, protecting biodiversity, maintaining soil and water, and keeping ecological balance. Estimating grassland production, a fundamental variable in grassland resource management, is helpful to measure grassland productivity and diagnose its health status. In recent years, the combination of remote sensing and ground measurements into models has become an important method of estimating grassland production. Normally, large number of measurements are required for remote sensing modeling. Mongolia is an example of a traditional grassland animal husbandry country with the largest per capita grassland area in the world and is also part of the China-Mongolia-Russia Economic Corridor under the “Belt and Road” initiative. Constrained by multiple factors of overseas sampling, it is usually difficult to obtain sufficient, accurate, and evenly distributed production samples. Thus, the accuracy of estimation models will be affected. Until now, there is still no effective solutions to get more samples. In this study, a 200-kilometer buffer

收稿日期:2019-11-09;修回日期:2020-01-31.

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41971385);中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA2003020302);亚洲研究中心蒙古和韩国前沿研究基金项目(P2018-3606);中国工程科技知识中心建设项目(CKCEST-2019-3-6)。[**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.41971385; the Strategic Priority Research Program (Class A) of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA2003020302; the fund program of the Asia Research Center, Mongolia and Korea Foundation for Advanced Studies, No.P2018-3606; the Construction Project of the China Knowledge Center for Engineering Sciences and Technology, No.CKCEST-2019-3-6.]

作者简介:王艳杰(1995—),男,河南开封人,硕士生,主要从事地理信息系统理论与方法研究。E-mail: wangyanjie@reis.ac.cn

*通讯作者:王卷乐(1976—),男,河南洛阳人,博士,研究员,主要从事资源环境科学数据集成与共享研究。

E-mail: wangjl@igsnr.ac.cn

zone along the China-Mongolia Railway (Mongolia) was taken as the study area. Given the inhomogeneity of grassland distribution and the correlation between the samples, the Point estimation model of BSHADE (P-BSHADE) was introduced. We derived the grassland production dataset in the study area from 2000 to 2019 based on the sample measurements and interpolated samples, and a combination of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Enhanced Vegetation Index (EVI), and Net Photosynthesis (PsnNet) for remote sensing modeling. Our method extrapolated sparse and unevenly distributed sampling points to supplement ground information by spatial interpolation, and used both the measured sample points and interpolated sample points for modeling. Six types of linear models and exponential models were established using above three vegetation indices. Our results show that the accuracy of the optimal model was 80%, higher than that from previous studies. The spatial pattern and interannual variation of grassland production estimated in our study were consistent with previous studies, which further confirmed the accuracy of our results and the feasibility of the interpolation method. Using interpolation method to optimize the data source is an entirely new attempt that improve the accuracy of the model estimation, which could be potentially applied to other overseas regions to monitor grassland resources.

Key words: sparse samples; grassland production; interpolation; P-BSHADE method; remote sensing inversion; vegetation indices; China-Mongolia railway

***Corresponding author:** WANG Juanle, E-mail: wangjl@igsnr.ac.cn

摘要:产草量是衡量草原生产力和诊断草原健康状况的指标,是草地资源管理的重要依据。近年来,遥感数据结合地面实测数据建模已成为产草量估算的重要手段。充足的实测样点信息是产草量遥感建模估算的基础。受境外采样多重因素的制约,蒙古国产草量估算研究中无法获取足够且分布均匀的实测样点,估产模型的精度受到影响,这一问题目前尚未发现有好的解决方法。本研究选取中蒙铁路沿线(蒙古段)两侧200 km缓冲区作为研究区,针对产草量遥感估算中野外样点稀少且分布不均的问题,引入P-BSHADE方法,基于多年NDVI数据和获取的少量地面实测样点数据,考虑草地分布的非均匀性以及样点之间的相关性,对均匀分布的模拟样点处的产草量数据进行插值实验。结果显示,P-BSHADE法的插值效果优于Kriging法,可得到均匀分布于研究区的样点。基于以上实测样点和插值样点,结合NDVI、EVI、PsnNet 3种植被指数进行遥感建模,最优模型精度达到80%,精度优于已有相关研究。选取其中最优的基于NDVI的指数模型对研究区2000—2019年产草量进行反演,获得的产草量空间格局与年际变化与已有研究结果趋势吻合,进一步印证了结果的可靠性和插值方法的可行性。本研究通过插值的方式改善数据源从而提高估算模型精度是一种全新的思路与尝试,对于“一带一路”等境外区域资源环境监测具有借鉴意义。

关键词:稀疏样点;产草量;插值;P-BSHADE法;遥感反演;植被指数;中蒙铁路

1 引言

草地是世界上分布最广的植被类型之一,对发展畜牧业、保护生物多样性、保持水土和维护生态平衡有着重大的作用和价值^[1-4]。产草量是衡量草原生产力和诊断草原健康状况的指标,是草地资源管理的重要依据^[5-7]。近年来,遥感数据结合地面实测数据进行星地结合建模已成为产草量估算的重要手段。蒙古国是传统的草原畜牧业国家,人均草原面积列世界之首,同时也是我国“一带一路”倡议“中蒙俄经济走廊”的关键一环^[8]。受到境外地理环境、气候、人力物力等多重因素的制约,蒙古国产草量研究中无法获取足够且分布均匀的地面实测样

点数据,估产模型的精度受到影响。通过空间插值的方式,对少量野外实测样点进行“扩展”,实现对样点信息的补充,对于产草量遥感建模估算具有重要意义。

空间插值是估计观测覆盖区域内未采样点属性值的过程,可分为确定性方法和地统计方法2类^[9-13]。确定性方法包括反距离加权法(Inverse Distance Weight, IDW)、样条函数法等,地统计方法主要包括Kriging插值法(Kriging)。在产草量估算方面,黎阳等^[14]使用反距离加权法对新疆7月天然草原产草量进行空间插值制图;李东等^[15]利用获取的地面实测数据,基于反距离加权法,对新疆牧场的草地生物量进行了插值估算。在地表气温和公

共卫生等领域,Wang等^[16]提出了一种名为基于偏差哨点医院的区域疾病估计(Biased Sample Hospital-based Area Disease Estimation, B-SHADE)的方法,该方法使用哨点医院记录数据估算得到整个区域疾病发生率的最佳线性无偏估计值(Best Linear Unbiased Estimate, BLUE),成功应用于上海市浦东区真实案例研究;Xu等^[17]提出一种基于B-SHADE的点估计模型(Point estimation model of BSHADE, P-BSHADE),该方法考虑地理空间自相关和目标域的非均匀性,引入站点之间的相关性和比率(基于长时间序列数据获取),对站点年度气温缺失值进行估算;Wang等^[18]开发了一种称为单点面积估计(Single Point Areal estimation, SPA)的技术,该技术利用PM_{2.5}和PM₁₀之间的物理相关性,基于单站点的PM_{2.5}监测数据和18个监测站PM₁₀监测数据,通过点到面的转换,估算得到了整个北京市PM_{2.5}平均浓度。

总体而言,当前针对产草量的插值研究较为缺乏,样点稀疏的问题也尚未发现有效解决方法。而站点气温与公共卫生等领域的相关研究更为丰富,其成果可为产草量样点估算提供参考。因此,本文受SPA法思想启发,引入P-BSHADE方法,进行产草量样点插值实验。采用插值样点和实地采集样点,结合多种植被指数建立估算模型,选取最优模型对中蒙铁路沿线(蒙古段)2000—2019年产草量进行反演估算。

2 插值方法

本研究受SPA方法^[18]的启发,引入P-BSHADE方法^[17]。P-BSHADE法目前应用于站点年度气温缺失值估算中,其利用多年站点温度构造站点间关系,但产草量样点估算中不具备同一个样点多年的采样数据,因此,采用与产草量具有强相关关系的归一化差分植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)代替。

2.1 目标

目标是基于获取的少量野外采样点数据及样点处多年NDVI数据,对未知点产草量进行插值,得到更为丰富且均匀分布于研究区内的样点信息。方法的描述和推导如下:

$$\hat{y}_0 = \sum_{i=1}^n w_i y_i \quad (1)$$

式中: w_i 表示第*i*个已知样点对未知点的权重; y_i 为第*i*个已知样点的产草量值。 \hat{y}_0 是未知点值 y_0 的估值,它具有2个属性:无偏和最小估计方差,其分别由式(2)和式(3)给出。

$$E(y_0) = E(\hat{y}_0) \quad (2)$$

$$\min_w [\sigma_{\hat{y}_0}^2 = E(\hat{y}_0 - y_0)^2] \quad (3)$$

式中: E 是统计期望值; $\sigma_{\hat{y}_0}^2$ 是估计方差。

结合式(1)和式(2)得到:

$$E y_0 = E \sum_{i=1}^n w_i y_i \quad (4)$$

2.2 点间比

点间比是最重要的输入参数之一,是草地空间分布的不均匀性指标。基于对实际情况的考虑,草地的空间分布是非均匀的,即 $E y_0 \neq E y_i$ 。2个样点之间的关系可以表示为:

$$b_i E x_0 = E x_i \quad (5)$$

式中: b_i 是2个样点处的NDVI值(x_0, x_i)之比,用于代表产草量(y_0, y_i)之比。

综合式(4)和式(5),得出:

$$\sum_{i=1}^n w_i b_i = 1 \quad (6)$$

可知,确定 \hat{y}_0 需要计算系数 w_i ($i=1, 2, \dots, n$)。

2.3 权值估算

估值问题的根本是求得满足无偏条件的权 w_i ,同时最小化估计方差。通过最小化式(1)的估计方差来计算权,即:

$$\sigma_{\hat{y}_0}^2 = E(\hat{y}_0 - y_0)^2 = C(\hat{y}_0 \hat{y}_0) + C(y_0 y_0) - 2C(\hat{y}_0 y_0), \quad (7)$$

式中: C 表示2个样点之间的统计协方差,由NDVI数据计算得到。

综合式(6)和式(7)得出式(8),其可同时满足最小化 $\sigma_{\hat{y}_0}^2$ 和无偏2个条件,即:

$$\begin{bmatrix} C(y_1 y_1) & \cdots & C(y_1 y_n) & b_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ C(y_n y_1) & \cdots & C(y_n y_n) & b_n \\ b_1 & \cdots & b_n & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C(y_1 y_0) \\ \vdots \\ C(y_n y_0) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: μ 是拉格朗日乘数。最小化的估计方差为:

$$\sigma_{\hat{y}_0}^2 = \sigma_{y_0}^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i w_j C(y_i y_j) - 2 \sum_{i=1}^n w_i C(y_i y_0) + 2\mu \left(\sum_{i=1}^n w_i b_i - 1 \right) \quad (9)$$

3 插值实验

3.1 研究区概况和数据源

3.1.1 研究区概况

选取中蒙铁路(蒙古段)东西两侧 200 km 缓冲区作为研究区,如图1所示。中蒙铁路(蒙古段)位于蒙古国中东部地区,铁路南端城市扎门乌德与中国二连浩特接壤,北端城市苏赫巴托尔市与俄罗斯纳乌什基相连,是连接中、蒙、俄三国最重要的铁路干线。研究区地处 101°26' E—113°51' E, 42°38' N—50°30' N 之间,属于典型的大陆性温带草原气候,昼夜温差大,季节变化明显,春、秋两季短促,降水少且主要集中在夏季。铁路沿线土地覆被类型以草原为主,由北向南主要依次为森林、森林草原、典型草原、荒漠草原、裸地以及荒漠戈壁。研究区共涉及到蒙古国包括苏赫巴托尔省、东戈壁省、中戈壁省、戈壁苏木贝尔省、肯特省、中央省、乌兰巴托、鄂尔浑省、布尔干省、后杭爱省、色楞格省、达尔汗乌拉省和库苏古尔省在内的 13 个省(市),该区域是蒙古国人口的主要聚集区,畜牧业和采矿业为主要经济类型。



图1 中蒙铁路沿线(蒙古段)200 km缓冲区概况

Fig. 1 200 km buffer zone along the China-Mongolia Railway (Mongolia)

3.1.2 数据源

(1)遥感数据。遥感数据包括 NDVI、增强型植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)、净光合(Net Photosynthesis, PsnNet)3种植被指数。NDVI 和 EVI 来自于美国航空航天局(NASA)^[19]提供的 MOD13Q1 数据产品, PsnNet 来源于 NASA 提供的 MOD17A2H 数据产品,2种产品时间均为 2019 年 6 月。2种数据产品的原始格式为 HDF 格式,时间分

辨率分别为 16 d 和 8 d,空间分辨率分别为 250 m 和 500 m。数据均已经过大气校正、几何校正等处理,利用 MODIS Reprojection Tools(MRT)软件对进行投影、格式转换和拼接处理,设置为统一的 UTM 投影。

(2)地面实测样点数据。产草量地面实测数据由作者所在研究团队和蒙古国立大学联合开展野外调查获取,共得到 56 个采样点,样点分布见图 1。采样时间为 2019 年 6 月底至 7 月初。调查内容包括产草量鲜重、草地类型、坐标、地形等。每个样地大小为 10 m×10 m,在样地内随机选取 3 个 0.5 m×0.5 m 的样方,取 3 个样方的平均值作为该点产草量。GPS 测定样点经纬度坐标。

(3)辅助数据。蒙古国行政边界数据、草地类型数据和中蒙铁路数据等由中国科学院数据云—资源学科创新平台^[20]提供。

3.2 插值结果

3.2.1 插值精度验证

对产草量与同时期的 NDVI 指数进行相关性分析。结果显示,产草量与 NDVI 呈强相关关系,相关系数为 0.82。同时,基于多年 NDVI 数据对样点进行点间相关性分析,为选取用于插值的相邻点提供参考。

选取 11 个(20%)采样点作为验证点,采用 P-BSHADE 法和 Kriging 2 种方法对其产草量鲜重进行插值实验,并基于均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)和平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)2 种指标进行精度对比与评价,计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2}{N}} \quad (10)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N |\hat{y}_i - y_i| \quad (11)$$

式中: N 为验证点数量; y_i 为实测值(g); \hat{y}_i 为估算值(g)。

计算得到 P-BSHADE 法和 Kriging 法的 2 种评价指标 RMSE/MAE 分别为 8.22 g/4.77 g 和 8.71 g/5.23 g。插值结果对比如图 2 所示。

综合分析可得:① 2 种方法得到的结果与真实值的差值正负关系保持一致;② P-BSHADE 法的 RMSE 和 MAE 均小于 Kriging 法;③ P-BSHADE 法得到的结果相对 Kriging 法的结果更“接近”真实

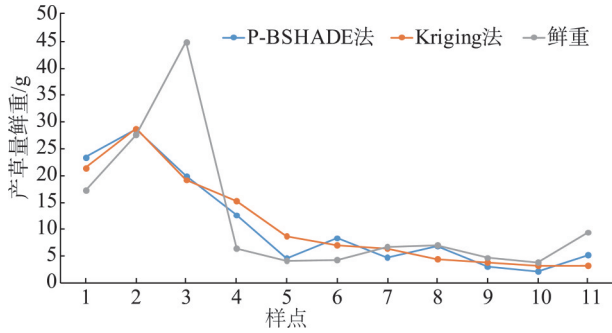


图2 样点真实值与P-BSHADE法及Kriging法估算值对比
Fig. 2 Comparison of actual value and estimated value of samples by P-BSHADE and Kriging

值。因此,在此次插值实验中,P-BSHADE法优于Kriging法,可用于样点插值。

3.2.2 插值结果

选用P-BSHADE法对研究区内均匀选取的64个未知点进行插值,得到与实测样点同时期的产草量数据。插值点的分布如图3所示。

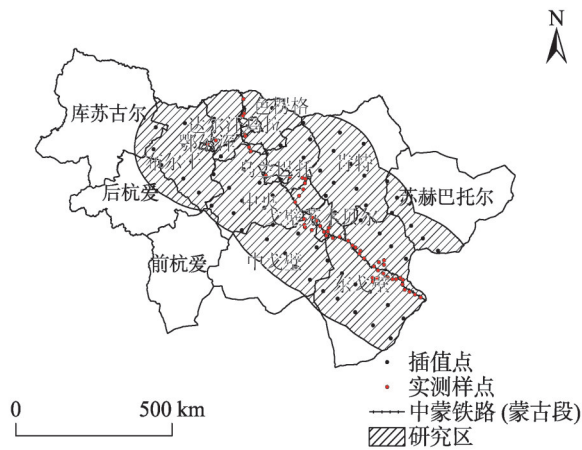


图3 基于P-BSHADE法的研究区插值点分布
Fig. 3 Distribution of interpolation samples based on P-BSHADE method

4 产草量估算

4.1 估算模型

本研究采用当前产草量遥感估算中较通用的统计模型。地面实测数据结合遥感手段获取的与其具有强相关关系的多种植被指数数据进行统计和相关分析,建立最优的模型公式,可快速实现大空间尺度产草量数据的反演。

4.1.1 建模方法

根据地面实测样点(56个)及插值样点(64个)

整理得到共120个产草量样点数据,其中,全部插值样点和80%的实测样点数据用于建模,20%的实测数据用于模型验证。基于GIS方法,采用ArcGIS工具提取与产草量数据相对应同期的NDVI、EVI、PsnNet 3种植被指数数据,利用SPSS软件分别进行一元线性回归分析、指数回归分析,每种指数分别构建2种类型的产草量估算模型。

采用决定系数 R^2 、P值等参数,结合平均相对误差(Relative Error, REE)和RMSE 2种评价指标对模型优劣进行综合评价。决定系数 R^2 是模型拟合的重要指标, R^2 越接近于1,表示模型拟合度越好。P值即Sig.值,当 $P < 0.01$,代表模型通过0.01极显著检验。

REE决定了模型精度,其值越小,模型精度越高。REE的计算公式如下:

$$REE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y}_i)^2}{N}} \times 100\% \quad (12)$$

式中: N 为验证样点数; Y_i 为实测产草量/(g/m^2); \bar{Y}_i 为估算产草量/(g/m^2); \bar{Y}_i 为平均实测产草量/(g/m^2)。

4.1.2 建模结果

对产草量数据与各植被指数进行相关性分析(表1)。结果显示,产草量与3种遥感指数均呈极显著相关,显著性强度依次为NDVI、PsnNet、EVI,相关系数分别为0.863、0.845和0.833。

表1 中蒙铁路沿线(蒙古段)产草量与植被指数相关性分析
Tab. 1 Correlation analysis between grassland production along the China-Mongolia railway (Mongolia) and vegetation indices

要素	EVI	NDVI	PsnNet
相关系数	0.833**	0.863**	0.845**
P值	0.000	0.000	0.000

注:**在置信度(双侧)为0.01时呈显著相关。

建模结果如表2所示。所有模型均通过显著性检验($P < 0.01$), R^2 都在0.5以上。对比来看,基于NDVI的线性模型决定系数最高,为0.72,拟合效果最佳。基于NDVI的指数模型决定系数为0.64,精度为80%,为所有模型中最高;均方根误差最小,为42.91 kg/hm^2 。综合考虑,选择基于NDVI的指数模型用于产草量反演。

表2 基于不同建模参数的中蒙铁路沿线(蒙古段)产草量遥感估算模型及精度对比

Tab. 2 Estimation models of grassland production along the China-Mongolia railway (Mongolia) based on different vegetation indices and accuracy comparison

建模参数	模型	方程	R^2	Sig.	RMSE/(kg/hm ²)	精度/%
NDVI	线性模型	$Y=-12.687+208.515X_1$	0.72	0.000	56.89	75
	指数模型	$Y=10.074\exp(3.897X_1)$	0.64	0.000	42.91	80
EVI	线性模型	$Y=-11.687+316.114X_2$	0.66	0.000	63.89	72
	指数模型	$Y=10.582\exp(5.799X_2)$	0.57	0.000	48.05	78
PsnNet	线性模型	$Y=6.887+2989.807X_3$	0.68	0.000	81.65	69
	指数模型	$Y=17.236\exp(50.095X_3)$	0.55	0.000	60.03	73

4.2 估算结果

4.2.1 产草量空间分布

选用最优的基于NDVI的指数模型, $Y=10.074\exp(3.897X)$,反演得到中蒙铁路沿线(蒙古段)地区2000—2019年产草量数据,其空间分布如图4所示。

产草量空间分布结果直观显示,2000—2019年,中蒙铁路沿线(蒙古段)产草量空间分布总体呈现由西北部沿铁路向东南递减的趋势。西北部的色楞格、达尔汗乌拉、布尔干、肯特等地区的产草量显著高于东南部的东戈壁、中戈壁等地区。研究区产草量可划分为3个等级:①由北向南,苏赫巴托尔至乌兰巴托段沿线地区主要为深绿色斑块,此地区产草量最高;②乌兰巴托至乔伊尔段沿线地区主要为浅绿色/浅黄色斑块,此地区产草量处于中等水平;③乔伊尔至扎门乌德段沿线地区主要为深黄色/红色斑块,此地区产草量最低。

4.2.2 时间分布

中蒙铁路沿线(蒙古段)产草量统计值见表3,时间分布特征如图5所示。20年产草量分布变化趋势可分为3个阶段:①2000—2009年,产草量波动较小,稳定在平均线上下;②2010—2014年产草量显著增加;③2015—2019年产草量则呈现较大波动,总体而言,呈现波动中略增的趋势。由表3可知,2017年产草量最低,为 1510.57×10^4 t,2012年产草量最高,为 2654.97×10^4 t。研究区20年平均产草量为 2117.38×10^4 t,有11个年份产草量在平均线以上,主要集中在后10年。获取的持续20年的产草量结果印证了本插值方法在产草量长时空序列估算中的适用性和应用潜力,能够为境外更大时空范围的草地资源状况监测提供方法和数据支持。

5 讨论

本研究针对蒙古国产草量估算研究中野外采样点稀疏且分布不均匀的问题,引入P-BSHADE法,实现对均匀分布的模拟样点产草量插值,改善数据源,从而提高产草量估算的精度。基于2019年获取的56个实测采样点数据和NASA官网获取的2000—2019年同期的MODIS-NDVI数据,对P-BSHADE法和Kriging法进行了插值实验与精度对比。结果显示,P-BSHADE法得到的估算值RMSE/MAE分别为8.22 g/4.77 g,均优于Kriging法的8.71 g/5.23 g,可用于模拟样点产草量插值。利用实测样点和插值样点结合3种植被指数NDVI、EVI、PsnNet进行建模。选取最优的基于NDVI的指数模型对中蒙铁路沿线(蒙古段)2000—2019年产草量分布进行反演估算,得到20年的产草量数据。

与Kriging法相比,P-BSHADE法在产草量样点值估算方面具有一定理论优势。Kriging法假设目标分布的均匀性,在很多情况下是不现实的。P-BSHADE法考虑了目标空间分布的非均匀性^[21-22],更符合实际情况。方法中的非均匀性指标由各样点多年的NDVI数据求得,用以代表样点间产草量的比值,同时,相关性和协方差也是由多年NDVI数据求得。与Kriging法选择地理空间位置上的临近点不同,P-BSHADE法是根据点间相关性而非地理位置,选取与模拟样点相关性较强的实测样点作为参考点。P-BSHADE法的实现综合考虑以下3点因素:①通常情况下,相邻的地理位置具有相似的地表特征,临近的样点间具有更强的相关性;②受局部因素影响,如地形、海拔、土地利用的突然变化等,距离远的样点比距离近的样点相关性更强;③基于NDVI与产草量的强相关性,认为20年

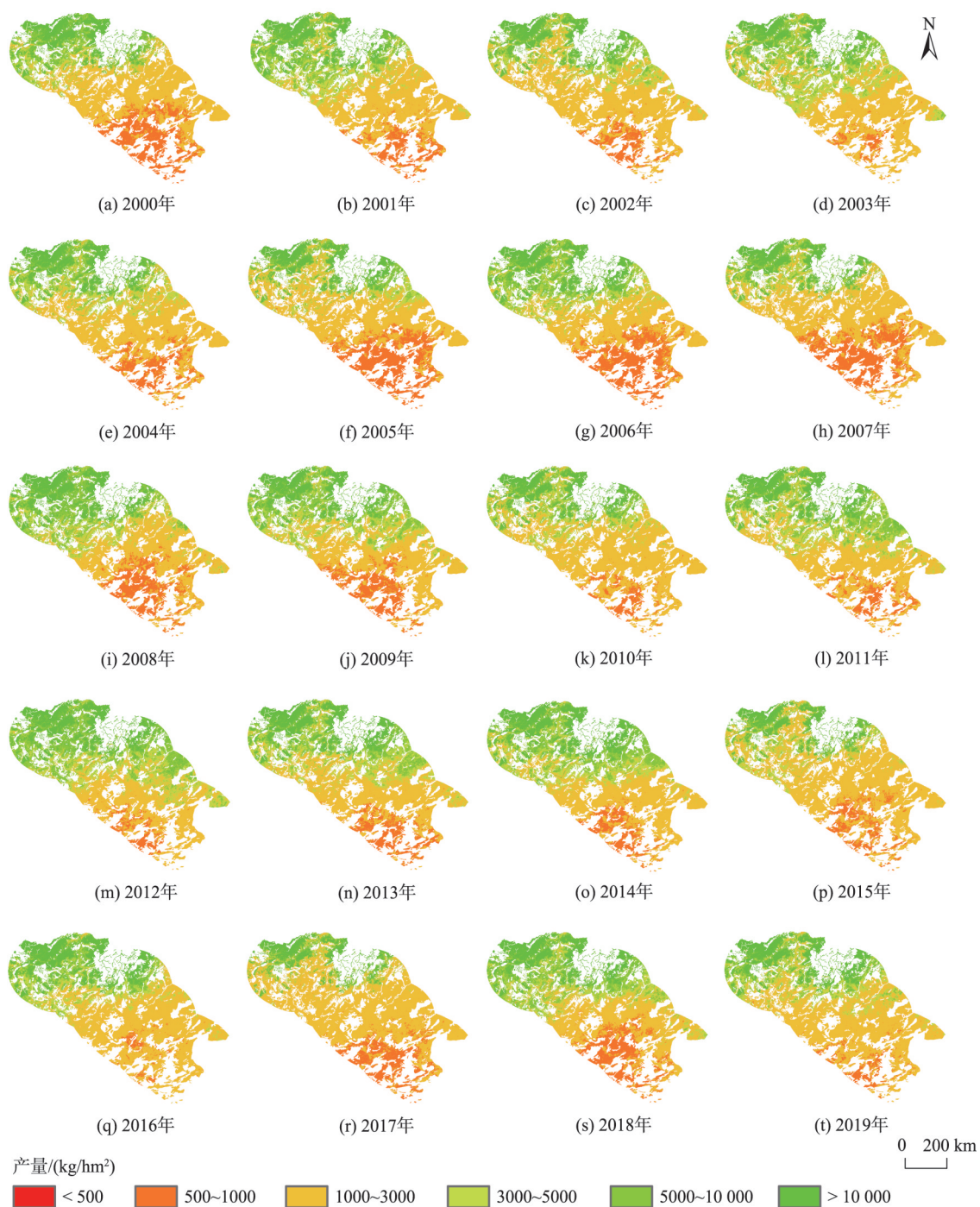


图4 2000—2019年中蒙铁路沿线(蒙古段)产草量空间分布

Fig. 4 The spatial distribution of grassland production along the China-Mongolia railway (Mongolia) from 2000 to 2019

NDVI数据构造的点间关系可以代表点间产草量关系,这是应用此方法的根本依据。

区别于现有方法直接对地面实测数据和遥感信息进行统计分析建模,本研究考虑草地空间分布的地域分异规律,引入P-BSHADE方法,采用与产草量紧密相关的长时间序列植被指数数据,构造样

点间产草量分布关系,对稀疏且不均匀分布的实测样点进行扩展,实现对有缺陷的地面信息的完善补充,然后将实测样点和插值样点共同用于建模,在理论上对现有方法进行了改进。采用3种植被指数分别建立一元线性和指数共6种模型,其中最优模型精度达到80%,相比于同区域已有研究的模

表3 2000—2019年中蒙铁路沿线(蒙古段)产草量统计

Tab. 3 Statistics of annual grassland production along the China-Mongolia Railway (Mongolia) from 2000 to 2019

年份	单产/(kg/hm ²)	总产/10 ⁴ t
2000	4063.23	1862.97
2001	4734.25	2170.49
2002	4178.61	1915.84
2003	4603.98	2110.93
2004	4551.33	2086.81
2005	3982.20	1825.84
2006	4721.28	2164.76
2007	3696.65	1694.92
2008	5054.46	2317.36
2009	4741.86	2174.14
2010	4361.11	1999.63
2011	5143.61	2358.30
2012	5790.50	2654.97
2013	5203.05	2385.58
2014	5431.39	2490.22
2015	3758.04	1723.11
2016	5156.34	2364.27
2017	3294.82	1510.57
2018	5092.15	2334.79
2019	4802.51	2202.00
平均	4618.07	2117.38

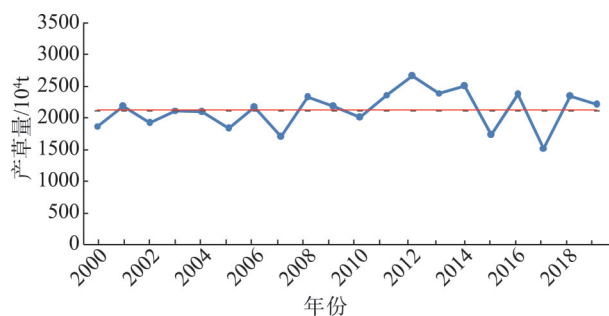


图5 2000—2019年中蒙铁路沿线(蒙古段)产草量时间变化

Fig. 5 Annual grassland production along the China-Mongolia railway (Mongolia) from 2000 to 2019

型精度(78%)有一定提高。Li等^[7]研究发现在2006—2015年中蒙铁路沿线(蒙古段)产草量总体呈波动中略增趋势,与本研究得到的结果基本一致;产草量分布沿铁路由西北部至东南部区域逐渐减少,草地类型从森林草原过渡到荒漠草地。2种方法得到的结果空间分布格局基本吻合,这进一步印证了本方法的可行性和可靠性。

6 结论

本研究面向蒙古国产草量估算中实测样点稀疏且分布不均的问题,分析探究适用于产草量样点插值的方法。利用插值得到的样点和野外实测样点,构建产草量估算最优模型,反演获取中蒙铁路沿线(蒙古段)2000—2019年产草量分布数据,并对方法的可行性和结果的可靠性进行评定。主要研究结论包括:

(1)基于SPA方法的思想,引入P-BSHADE方法用于产草量样点插值。采用长时间序列的植被指数数据构造样点间比值和协方差2个参数,分析样点间产草量的分布关系,根据实测样点值估算得到均匀分布的模拟样点的值。

(2)利用插值样点和实测样点,结合NDVI、EVI、PsnNet 3种植被指数建立一元线性和指数模型共6种估算模型,选用精度最优的基于NDVI的指数模型反演得到研究区2000—2019年产草量分布数据。结果显示研究区产草量前10年较稳定,后10年出现较大波动,总体呈现波动中略增加的趋势。产草量空间分布由西北部沿铁路向东南呈“苏赫巴托尔—乌兰巴托段”、“乌兰巴托—乔伊尔段”、“乔伊尔—扎门乌德段”3个等级逐级递减。

(3)P-BSHADE法相对Kriging法更适用于产草量样点插值,效果更优。建立的最优估算模型精度达到80%,与现有方法相比有一定提高。与同区域的现有研究结果对比发现,2种方法获取的产草量空间分布格局及年际变化趋势均保持一致。

数据源是产草量遥感建模的基础,通过插值的方式改善数据源从而提高估算精度是一种全新的思路与尝试,本研究初步验证了其可行性。不过,所用的P-BSHADE法中用于代表样点间产草量关系的比值和协方差等参数均由NDVI指数求得,还不够完善。如何对参数进行优化改良,使之在产草量估算研究中的样点插值结果更为精准可靠,有待更进一步的研究。

参考文献(References):

- [1] 高黎明,张乐乐.青海湖流域植被盖度时空变化研究[J].地球信息科学学报,2019,21(9):1318-1329. [Gao L M, Zhang L L. Spatialtemporal dynamics of the vegetation coverage in Qinghai lake basin[J]. Journal of Geo-information Science, 2019,21(9):1318-1329.]
- [2] 谢高地,张钰铨,鲁春霞,等.中国自然草地生态系统服务

- 价值[J]. 自然资源学报, 2001, 16(1): 47-53. [Xie G D, Zhang Y L, Lu C X, et al. Study on valuation of range-land ecosystem services of China[J]. Journal of Natural Resources, 2001, 16(1): 47-53.]
- [3] 赵同谦, 欧阳志云, 贾良清, 等. 中国草地生态系统服务功能间接价值评价[J]. 生态学报, 2004, 24(6): 1101-1110. [Zhao T Q, Ouyang Z Y, Jia L Q, et al. Ecosystem services and their valuation of China grassland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(6): 1101-1110.]
- [4] 刘兴元, 龙瑞军, 尚占环. 草地生态系统服务功能及其价值评估方法研究[J]. 草业学报, 2011, 20(1): 167-174. [Liu X Y, Long R J, Shang Z H. Ecosystem services and their valuation of China grassland[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2011, 20(1): 167-174.]
- [5] Zhou H K, Zhao X Q, Tang Y H, et al. Alpine grassland degradation and its control in the source region of Yangtze and Yellow Rivers, China[J]. Grassland Science, 2005, 51(3): 191-203.
- [6] 刘建红, 黄鑫, 何旭洋, 等. 基于MODIS的青海草原产草量及载畜平衡估算[J]. 草业科学, 2018, 35(10): 228-237. [Liu J H, Huang X, He X Y, et al. Estimation of grassland yield and carrying capacity in Qinghai Province based on MODIS data[J]. Pratacultural Science, 2018, 35(10): 228-237.]
- [7] Li G, Wang J L, Wang Y J, et al. Spatial and temporal variations in grassland production from 2006 to 2015 in Mongolia along the China-Mongolia Railway[J]. Sustainability, 2019, 11(7): 2177.
- [8] 中国国家发展和改革委员会. 建设中蒙俄经济走廊规划纲要[EB/OL]. http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbghwb/201609/t20160912_818326.html, 2016-6-23. [National Development and Reform Commission. Planning outline of a China-Russia-Mongolia economic corridor [EB/OL]. http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbghwb/201609/t20160912_818326.html, 2016-6-23.]
- [9] 朱会义, 刘述林, 贾绍凤. 自然地理要素空间插值的几个问题[J]. 地理研究, 2004, 23(4): 425-432. [Zhu H Y, Liu S L, Jia S F. Problems of the spatial interpolation of physical geographical elements[J]. Geographical Research, 2004, 23(4): 425-432.]
- [10] 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. [Lin Z H, Mo X G, Li H X, et al. Comparison of three spatial interpolation methods for climate variables in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(1): 47-56.]
- [11] 崔晓临, 程贇, 张露, 等. 基于DEM修正的MODIS地表温度产品空间插值[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(12): 1768-1776. [Cui X L, Cheng Y, Zhang L, et al. Spatial interpolation of MODIS land surface temperature products based on DEM correction[J]. Journal of Geo-information Science, 2018, 20(12): 1768-1776.]
- [12] 耿融, 赵康, 伍红玲. 基于GIS的土地利用程度Kringing空间插值方法研究[J]. 科技创新与应用, 2014(25): 65-66. [Geng R, Zhao K, Wu H L. Research on Kringing spatial interpolation method of land use degree based on GIS[J]. Technology Innovation and Application, 2014(25): 65-66.]
- [13] 朱芮芮, 李兰, 王浩, 等. 降水量的空间变异性和空间插值方法的比较研究[J]. 中国农村水利水电, 2004(7): 25-28. [Zhu R R, Li L, Wang H, et al. Comparative study on the spatial variability of rainfall and its spatial interpolation methods[J]. China Rural Water and Hydropower, 2004(7): 25-28.]
- [14] 黎阳, 张晶, 李刚勇. 新疆天然草原鲜草产量空间插值制图应用[J]. 草食家畜, 2016(4): 50-53. [Li Y, Zhang J, Li G Y. Comparison of spatial interpolation mapping methods for natural grassland biomass in Xinjiang[J]. Grass-feeding Livestock, 2016(4): 50-53.]
- [15] 李冬, 汪传建, 王伟强, 等. 基于采样的草地生物量估算空间插值方法比较研究[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(2): 206-210. [Li D, Wang C J, Wang W Q, et al. Comparative study on spatial interpolation methods of grassland biomass based on sampling[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(2): 206-210.]
- [16] Wang J F, Reis B Y, Hu M G, et al. Area disease estimation based on sentinel hospital records[J]. PLoS ONE, 2011, 6(8): e23428.
- [17] Xu C D, Wang J F, Hu M G, et al. Interpolation of missing temperature data at meteorological stations using P-BSHADE[J]. Journal of Climate, 2013, 26(19): 7452-7463.
- [18] Wang J F, Hu M G, Xu C D, et al. Estimation of citywide air pollution in Beijing[J]. PLoS ONE, 2013, 8(1): e53400.
- [19] National Aeronautics and Space Administration (NASA) [DB/OL]. <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>, 2019-08-09.
- [20] 中国科学院数据云-资源学科创新平台[DB/OL]. <http://www.data.ac.cn>, 2019-08-09. [Resource Discipline Innovation Platform, Data Cloud of CAS [DB/OL]. <http://www.data.ac.cn>, 2019-08-09.]
- [21] Wang J F, Christakos G, Hu M G. Modeling spatial means of surfaces with stratified nonhomogeneity[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(12): 4167-4174.
- [22] Wang J F, Robert H, Cao Z D. Sample surveying to estimate the mean of a heterogeneous surface: Reducing the error variance through zoning[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(4): 523-543.