

引用格式: Luo Ling, Mao Dehua, Zhang Bai, *et al.* Exploration and Application of NPP Estimation Model for Phragmites Australis Wetlands[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(4): 742-750. [罗玲, 毛德华, 张柏, 等. 芦苇湿地植被NPP估算方法探索与应用[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(4): 742-750.]
DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2021.4.0742

芦苇湿地植被NPP估算方法探索与应用

罗玲¹, 毛德华^{1,2}, 张柏¹, 王宗明^{1,3}, 杨桃⁴

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130102;

2. 中国科学院长春净月潭遥感实验站, 吉林 长春 130102;

3. 国家地球系统科学数据中心, 北京 100101;

4. 空军航空航天大学, 吉林 长春 130022)

摘要: 作为表征湿地生态系统健康的重要指标, 湿地植被净初级生产力(NPP)的精准估算对于理解全球变化以及区域碳循环具有重要的支撑作用。基于Landsat 8 OLI遥感影像和大量实测数据, 以光能利用率模型基本结构式为基础, 构建和评价了芦苇湿地植被NPP估算的不同遥感驱动模型, 并以东北3个典型芦苇湿地保护区为例进行了验证与应用。结果表明: 以 $NPP = f(f(VI_1)) \times f(VI_2)$ 结构与NDVI和MSAVI两个植被指数作为自变量的模型最优, 模型精度为89.2%, 明显高于NPP低空间分辨率产品和CASA模型的模拟结果。根据该模型估算的东北地区七星河、查干湖和双台河口芦苇湿地的NPP均值分别为3 001、3 050和3 621 $gC \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ 。受水文条件和人类活动影响, 各湿地样区间NPP具有典型的分布异质性。实验提出的框架模型可为小尺度上湿地生态系统健康评估或湿地生态系统恢复效果评价等指标获取提供方法借鉴。

关键词: 净初级生产力; 植被指数; Landsat; 芦苇湿地; 光能利用率模型

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2021)04-0742-09

1 引言

湿地被列为“全球三大生态系统”之一^[1]。全球气候变化背景下, 湿地生态系统作为对气候变化最为敏感的类型之一, 湿地生产力变化及其对全球变化的响应研究意义深远。湿地植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)表征着湿地植被的固碳能力, 当前针对湿地植被生产力动态及其对气候变化响应的研究已经有一定的基础。所使用的方法从传统的采样调查^[2]、回归模型^[3-4], 到目前广泛使用的生态参数模型^[5-6]均有所应用。传统的采样调查方法相对而言精度的影响因素更少, 但是需要投入的人力、物力及财力较大, 对采样时间要求严格, 最大的问题是实现大面积估算的难度较高。

经验模型规避了传统采样方法的很多不足, 可行性更强, 但缺乏植物生理生态学等理论依据。目前大尺度的植被生产力研究以生态参数模型为主, 如光能利用率模型^[7]。该类方法具有理论基础明确、时空研究连续、成本低等优点, 明显不足是模型输入参数相对较多, 参数获取难度大且直接影响结果准确度, 尤其在中小尺度上针对特定植被类型的估算精度难以保证。

国内外学者在中小尺度上基于光能利用率模型已开展了研究, 如Wu等^[8]针对小麦的总初级生产力, 以光能利用率(LUE)模型基本结构为基础, 探索了不同植被指数对光能利用率的敏感性, 并构建完全由遥感数据驱动的NPP估算模型。Irisarri

收稿日期: 2021-02-03; 修订日期: 2021-07-21

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA19040500), 国家自然科学基金项目(41771383, 41771103)。

作者简介: 罗玲(1984—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 主要从事资源环境遥感研究。E-mail: luoling@iga.ac.cn

通讯作者: 毛德华(1987—), 男, 山东临沂人, 副研究员, 主要从事生态系统遥感研究。E-mail: maodehua@iga.ac.cn

等^[9]以巴塔哥尼亚草甸地上生产力为研究对象,探讨了植被指数对植被吸收的光合有效辐射分量的敏感性,开展了基于遥感植被指数的模型构建与地上生产力格局及控制因素分析。但是总结当前研究可以发现:一方面,相比农田、草地等植被,目前针对草本湿地植被生产力的模型估算研究仍较薄弱。另一方面,当前所用的方法存在耗时费力、理论依据不充分及参数难获取及精度不高等问题^[10-11]。对于中小尺度的湿地生态系统而言,生态参数模型的应用精度难以保证,传统采样方法和经验模型又存在实施难度大和理论依据不足的问题。遥感数据具有明显的时空优势且数据易获取,能够满足研究尺度、研究对象等多种需求。因此实验尝试在保留光能利用率模型理论依据的基础上,探索利用不受时空限制且易获取的遥感数据实现湿地植被 NPP 准确估算的方法。

东北地区是我国最大的内陆沼泽湿地分布区,草本湿地在我国乃至北半球地区具有显著的代表性^[1]。实验以东北地区具有典型代表性的辽河平原双台河口、松嫩平原查干湖、和三江平原七星河 3 个芦苇湿地为研究对象,基于 Landsat 8 OLI 影像和大量的地面调查数据,以光能利用率模型基本结构为

基础,在充分考虑冠层结构、地表环境对模型输入参数影响的前提下,通过分析与叶绿素含量相关的植被指数对 LUE 和光合有效辐射分量(APAR)的敏感性,构建基于遥感植被指数的芦苇湿地植被 NPP 最优估算模型;并通过定量与定性相结合的方式验证所构建模型的精度,同时在上述 3 个芦苇湿地样区进行应用。研究目的在于验证基于植被生态学原理,以光能利用率模型基本结构式为基础,依托遥感植被指数实现芦苇湿地植被 NPP 优化估算的可行性及可信度,重点在于对方法和思路的探讨与验证,以期能为湿地保护与可持续管理提供科学支撑。

2 数据来源及主要方法

2.1 研究区概况

研究区为位于东北地区 3 个典型的芦苇湿地重要分布区,3 个芦苇湿地位于不同纬度(七星河湿地(46°N)、查干湖湿地(45°N)和双台河口湿地(41°N)),且具有明显的气象要素梯度差异。其中,七星河湿地和双台河口湿地均被列为《国际重要湿地名录》,后者也是中国中高纬度地区面积最大的滨海芦苇沼泽区,区内芦苇享誉中外,有“世界第一

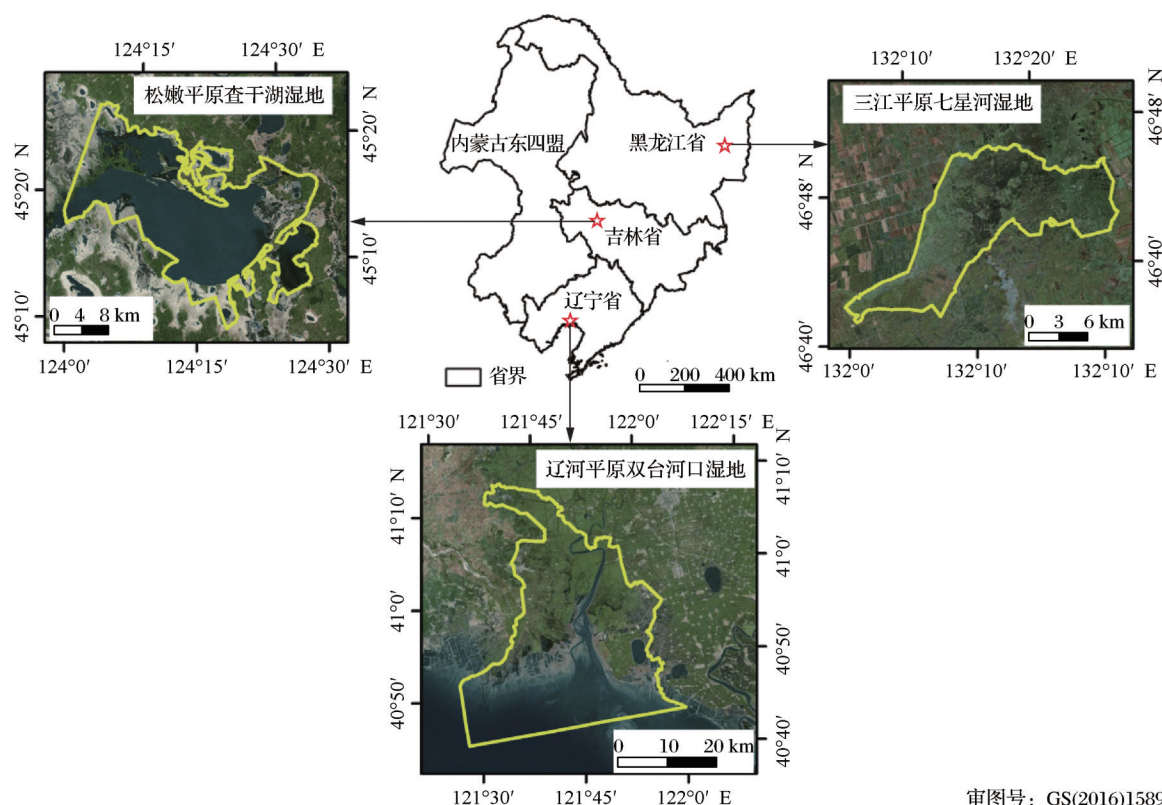


图1 研究区在东北地区位置及样区范围示意图

Fig.1 Location of study area in Northeast China and distribution of sample wetlands

大苇田”之称。查干湖湿地是国家级自然保护区,也是中国东北地区重要湖群湿地之一^[12]。

2.2 数据来源及处理

实验涉及的数据包含野外实测数据(于2014年8月份芦苇生物量最大时期采集的3个湿地样区芦苇植被的地上生物量、叶面积指数、叶片叶绿素含量、光合有效辐射)、与野外采样相同时期的遥感影像数据、土地覆被调查数据、气象数据和他人相关研究数据。

除下面所列数据情况外,其余数据信息详见罗玲等^[12]的研究。

2.2.1 气象数据

气象数据由中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>)提供,包括年平均气温、年降水量、年日照时数3个指标,由于3个湿地样区内气象站点数量有限,为保证精度,本研究收集了东北地区共116个气象站的连续观测记录,对于观测记录不完整的站点进行剔除,经空间插值获取东北全区的气象数据集。

2.2.2 相关研究结果数据

为更充分地对比验证本研究所构建的NPP估算模型的精度,收集覆盖本文湿地样区的不同方法的估算结果,具体包含:①基于MODIS BIOME-BGC模型开发的NPP数据产品(http://files.ntsg.umn.edu/data/NTSG_Products/MOD17/);②利用CA-SA模型估算的覆盖东北地区的植被NPP数据^[13]。

3 方法

3.1 芦苇湿地植被NPP遥感估算模型结构优化方法

实验利用遥感植被指数构建湿地芦苇植被NPP估算模型的前提是理清模型结构优化的思路,即了解光能利用率模型基本结构的原理解析,具体如下:

基于遥感的NPP估算光能利用率模型公式为^[14-15]:

$$NPP = LUE \times FPAR \times PAR \quad (1)$$

LUE和FPAR分别为光能利用率及植被冠层对光合有效辐射(PAR)的吸收比例。其中FPAR与PAR的乘积为植被吸收的光合有效辐射(APAR)。即:

$$NPP = LUE \times APAR \quad (2)$$

根据罗玲等^[12]的研究结果,LUE、植被指数与

叶绿素均有较好的相关性,LUE可以用遥感植被指数来估算,即:

$$LUE \propto f(VI) \quad (3)$$

当前诸多研究表明APAR与表征植被冠层结构的LAI之间具有良好的线性关系^[16-18],而LAI又可基于植被指数(VI)来估算,进而可得到:

$$APAR = f(VI) \quad (4)$$

因此,NPP可视为是基于LUE与APAR两个参数的植被指数的函数。

$$NPP = f(VI_1) \times f(VI_2) \quad (5)$$

3.2 芦苇湿地植被实测NPP计算

构建优化模型、计算所用到的实测LUE(NPP/APAR)以及模型估算结果精度验证都需要实测NPP数据。实验基于2014年8月,即植被生物量最大时期采集的部分芦苇地上生物量数据,烘干至恒重得到芦苇地上生物量干重。通过植被根冠比(R/S)(即植物地下部分与地上部分生物量干重或鲜重的比值),计算得到芦苇的总生物量干重。通过搜集、对比、分析与研究区相同或相近、自然条件类似的芦苇生物量研究相关文献,最终参考贾庆宇等^[19]针对辽河三角洲地区芦苇湿地的研究结果,因实验采样时间是8月,故取其7月和9月芦苇根冠比的平均值(1.34)作为3个湿地芦苇生物量的根冠比,地上与地下生物量干重之和即为芦苇总生物量干重。最后,根据通用的生物量干重与NPP的转换系数0.45^[20],得到3个湿地样区芦苇植被实测NPP数据。

3.3 模型精度评价方法

定量评价选取绝对误差(RMSE)和相对误差(REE)两个指标,利用预留的实测数据,对利用本文所构建方法估算得到的芦苇湿地NPP结果进行精度评估。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y'_i)^2}{N}} \quad (5)$$

$$REE = \frac{1/N \sum_{i=1}^n (Y_i - Y'_i)^2}{\bar{Y}} \times 100 \quad (6)$$

其中: Y_i 和 Y'_i 分别表示实测数据和模拟数据; \bar{Y} 为实测数据均值; N 代表样本数(验证点个数)。上述两个误差值越小,表示精度越高。

4 结果与分析

4.1 芦苇湿地植被NPP估算

以光能利用率模型为基本结构,以上文所述的

模型构建思路为指导,基于实测的NPP、APAR、LUE(NPP/APAR)及选择的两个最优植被指数,在SPSS软件中完成模型构建和评价。基于模型构建的思路,NPP估算的遥感驱动模型被归纳为4种模式:

$$(1) NPP = f(VI)$$

此模式将NPP视为最佳植被指数的单一变量回归函数。前期研究发现^[12],EVI的表征能力较差,且NDWI主要是用来表征水体的,所以只保留5个植被指数进行与NPP的相关分析。其中,MSAVI与NPP的相关性最强(表1)。因此,得到利用回归分析方法构建的以MSAVI为自变量的NPP估算函数。

$$NPP = 12\,528.594 \times MSAVI^{1.9159} \quad (7)$$

表1 芦苇湿地植被NPP与不同植被指数的相关系数
Table 1 Correlation coefficients between NPP of *Phragmites australis* wetlands and different vegetation index

植被指数	NDVI	CI _{green}	MSAVI	RVI	WDVI
相关系数	0.490**	0.257	0.633**	0.476**	0.273*

注:*,**分别表示显著性水平 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$

$$(2) NPP = f(VIs)$$

相关分析发现,MSAVI和NDVI与芦苇湿地植被NPP的相关性最强(表1)。另外,分析发现LUE和APAR的最佳遥感反演植被指数分别是NDVI^[12]和MSAVI(图2)。故可构建以MSAVI和NDVI为自变量的芦苇湿地植被NPP估算双变量回归函数,方程如下:

$$NPP = 17\,830.549 \times MSAVI - 8\,455.262 \times NDVI - 2\,716.928 \quad (8)$$

$$(3) NPP = f(VI_1) \times f(VI_2)$$

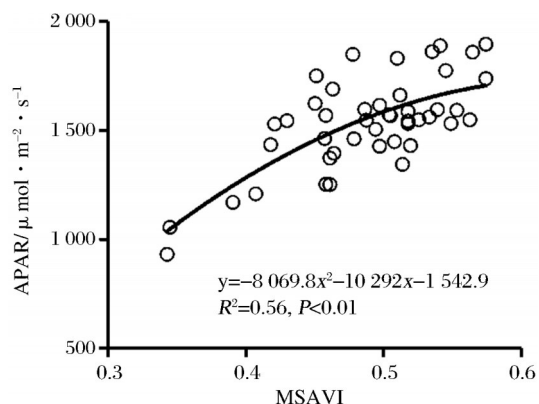


图2 东北地区典型芦苇湿地APAR与最优植被指数MSAVI间的关系

Fig.2 Relationship between APAR and best VI of MSAVI for typical *Phragmites australis* wetlands in Northeast China

根据2.1节的芦苇湿地NPP估算模型优化原理,NPP可视为LUE和APAR的两个函数的乘积。基于罗玲等^[12]的研究,LUE的最优植被指数回归模型为:

$$LUE = 8.454\,8NDVI^{1.2025} (R^2 = 0.62, P < 0.01)$$

研究发现,APAR的最优表征植被指数为MSAVI,具体关系为(图3):

$$APAR = -8\,069.8 \times MSAVI^2 + 10\,292 \times MSAVI - 1\,542.9 (R^2 = 0.56, P < 0.01)$$

因此,NPP的估算模型可表示为:

$$NPP = (8.454\,8 \times NDVI^{1.2025}) \times (-8\,069.8 \times MSAVI^2 + 10\,292 \times MSAVI - 1\,542.9) \quad (9)$$

$$(4) NPP = f(f(VI_1)) \times f(VI_2)$$

在光能利用率模型原理基础上,重新考虑LUE的获取。LUE与植被指数之间的关系是借助冠层叶绿素含量而构建的^[12],因此尝试直接将LUE视为冠层叶绿素含量的函数(图3)。

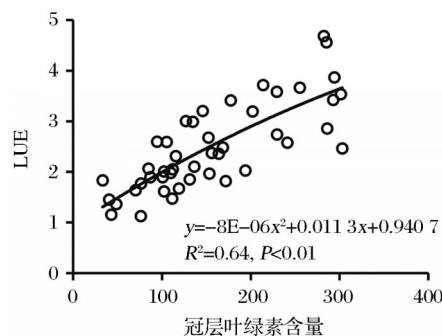


图3 东北地区典型芦苇湿地植被光能利用率(LUE)与冠层叶绿素含量间的关系

Fig.3 Relationship between LUE and canopy chlorophyll of *Phragmites australis* wetlands in Northeast China

且前面的研究发现,冠层叶绿素含量(y)可以通过植被指数NDVI来计算^[12]。

$$y = 937.36NDVI^{1.8918}$$

因此,LUE可以看作是基于NDVI来表征的冠层叶绿素含量的函数。基于此,NPP的估算模型结构可表达为:

$$NPP = [(-8 \times 10^{-6}(937.36 \times NDVI^{1.8918})^2 + 0.0113(937.36 \times NDVI^{1.8918}) + 0.9407)] \times (-8069.8 \times MSAVI^2 + 10292 \times MSAVI - 1542.9) \quad (10)$$

4.2 模型精度验证

4.2.1 模型精度定量评价

芦苇湿地植被NPP优化估算模型精度的定量评价借助绝对误差和相对误差两个参数完成。上述四个结构的模型中,结构(3)和(4)的精度相对更

高,依次为 69% 和 72%,结构(1)和结构(2)的精度分别为 64% 和 63%。因此,东北地区典型芦苇湿地植被 NPP 最优估算模型为基于光能利用率模型原理、以 NDVI 和 MSAVI 作为自变量的模型(10)。该模型可用于本文芦苇湿地植被 NPP 估算以及后续分析使用。

4.2.2 与他人结果对比验证

利用实测数据计算得到芦苇湿地植被实测 NPP 以及结构(IV)下的模型(10)计算得到 3 个典型

芦苇湿地植被的 NPP。对比发现低空间分辨率的生态系统过程模型(MODIS BIO-BGC)或光能利用率模型^[13]估算的结果均明显低于实测 NPP(表 2),基于实测 NPP,二者的估算精度分别为 12.5% 和 24.1%。而实验基于光能利用率模型优化构建的遥感驱动估算模型精度高达 89.2%,远高于上述两个研究结果。综合定量评价和与其他模型对比结果,基于光能利用率模型原理构建的芦苇湿地植被 NPP 估算优化模型优势明显、精度可靠。

表 2 不同模型不同分辨率遥感影像的芦苇植被 NPP 估算结果对比

Table 2 Results comparison of *Phragmites australis* NPP from different models with different spatial resolutions images

数据源	MODIS BIO-BGC (500 m)	CASA ^[13] (250 m)	本研究结果 (30 m)	实测 NPP
芦苇 NPP ($\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	388.0	745.0	3 439.0	3 104.0
精度/%	12.5	24.1	89.2	

注:括号中数据为遥感影像的空间分辨率

从模型需要的输入数据角度分析,BIO-BGC 和 CASA 的输入数据除遥感数据外,还包含气象数据等。但中小尺度的气象观测数据站点相对较少,很难保证所有区域气象数据的完整性。实验所用的 NPP 估算方法降低了输入参数的获取难度,而且较大地提升了估算精度。尤其对于芦苇湿地等面积较小的研究区域,具有明显的应用优势和精度保障。

4.3 典型芦苇湿地植被 NPP 空间格局及对比分析

4.3.1 芦苇湿地植被 NPP 空间分布格局

2014 年七星河芦苇湿地植被 NPP 平均值为 $3\,001\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,位于 $2\,000\sim3\,000\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 以及 $3\,000\sim4\,000\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 区域共占总面积的 90.8%。总体上西北部芦苇 NPP 稍高于东南部,但高值与低值 NPP 混杂(图 4)。查干湖芦苇湿地植被 NPP 平

均值为 $3\,050\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,呈东北高、西部低的格局。近一半区域的芦苇 NPP 值在 $3\,000\sim4\,000\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 之间, $4\,000\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 以上的区域面积占比为 12.3%,位于该湿地样区远离湖泊的东北角。双台河口芦苇湿地平均年 NPP 值为 $3\,620\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,明显高于前两个湿地样区。呈明显的西低东高空间分布格局。NPP 值在 $3\,000\sim5\,000\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 之间的区域占 78.2%,大于 $5\,000\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 的 NPP 高值区主要分布在保护区南侧、靠近海洋的小岛上。即双台河口湿地芦苇 NPP 值最高,生产能力最强,七星河湿地芦苇植被 NPP 略低于查干湖湿地。

4.3.2 典型芦苇湿地植被 NPP 空间格局影响因素分析

由于实验的 3 个芦苇湿地样区均是国家级保护

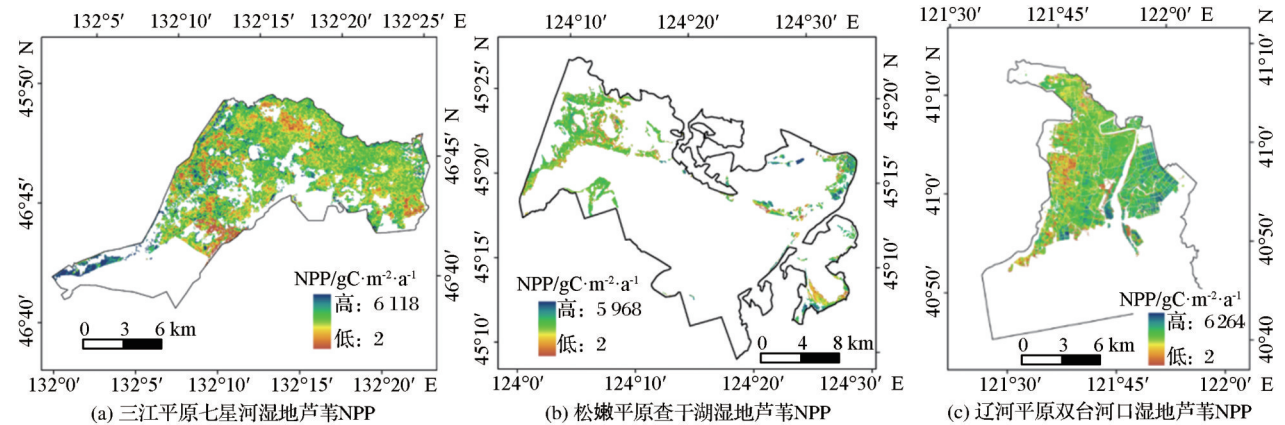


图 4 利用本文构建模型模拟的东北地区典型湿地芦苇植被 NPP 空间分布格局

Fig.4 Spatial distribution of estimated *Phragmites australis* NPP using the proposed model of three typical wetlands in Northeast China

区,七星河湿地和双台河口湿地还是国际重要湿地,3个湿地样区间受人类活动的影响差异不大。另外,由于实验所选择的3个湿地样区是呈明显纬度梯度的(图1),导致3个湿地样区间气候因子具有明显差异(图5),尤其是气温和降水量。因此,主要分析气候要素对芦苇湿地植被NPP空间分布格局的影响。由于实验重点在于方法探讨,影响因素不

做深入分析。对比各芦苇湿地植被NPP及气候因子的特点发现,3个芦苇湿地样区的年均气温、年降水量、年日照时数均呈现出双台河口湿地>查干湖湿地>七星河湿地的特征,日照时数的湿地样区间差异相对更小。这与3个芦苇湿地NPP的分布趋势一致,一定程度上证明了气象要素对芦苇湿地生产能力影响的主导地位。

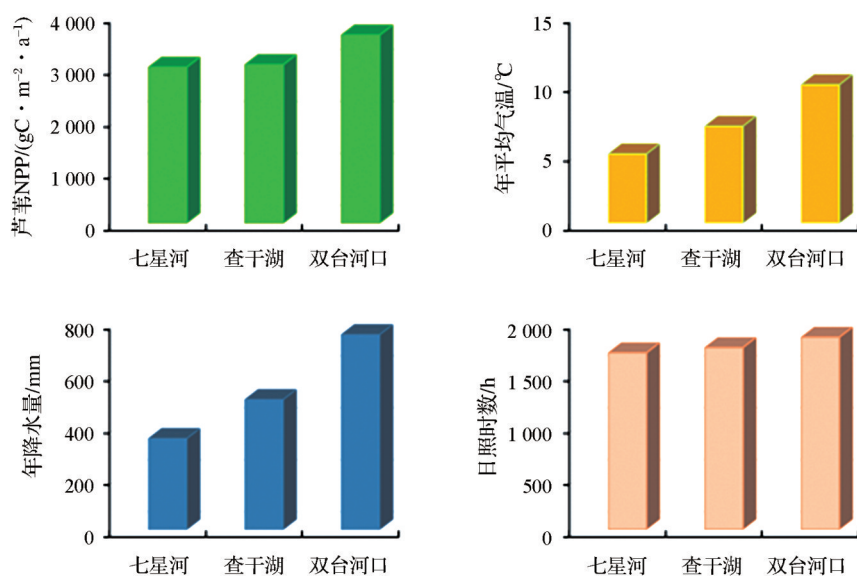


图5 3个典型芦苇湿地样区NPP及气候因子对比

Fig. 5 Comparison of *Phragmites australis* NPP and climatic factors for three typical wetlands in Northeast China

从北往南,七星河湿地、查干湖湿地和双台河口湿地的年均气温逐渐升高,植被光合作用的最适温度也逐步提升,温度对光能利用率的限制逐渐变小。因此,气温是影响芦苇湿地植被NPP空间格局的重要因子。3个芦苇湿地的降水差异明显,双台河口湿地是典型的滨海湿地,属温带大陆性半湿润气候,降水充足;七星河湿地较其他两个湿地气候干旱。实地调查发现,水位对芦苇生长影响明显,说明降水量是决定芦苇湿地生产力的关键条件。对基于光能利用率原理的模型而言,光合有效辐射是影响植被生产力的关键指标,而日照时数是反映太阳辐射的重要因子。从南向北,双台河口、查干湖和七星河3个湿地接受的日照时数呈递减趋势,对应的物候期也逐渐缩短,这与3个湿地芦苇植被NPP呈降低趋势密不可分。

5 讨论

5.1 典型芦苇湿地植被NPP差异原因分析

3个典型芦苇湿地区的影响因素以自然要素为

主,人为因素对3个典型湿地的影响差异不明显,但3个湿地区受自然条件和人文因素的影响方式不同。结合实地调查结果以及3个典型湿地的自然条件,进一步分析3个芦苇湿地植被NPP空间分布格局的原因。七星河湿地芦苇NPP的分布格局主要来自两方面影响:一是人类活动干扰,如保护区西南侧芦苇植被与保护区管理站距离较近,受施工影响;东南侧芦苇湿地植被NPP较低,主要受农耕影响^[21]。另一方面受水文条件影响,当水位过深时,芦苇植被NPP反而不高。查干湖湿地芦苇植被NPP的差异与水文、土壤以及人为因素有关。首先,水位较深的区域,芦苇植株矮小纤细,而水位较低的区域芦苇植株高大粗壮。其次,查干湖湿地西侧土壤养分含量较低,多有盐碱土和白浆土分布,导致NPP相对较低。最后,受石油开采和旅游基建等人为因素干扰^[22],查干湖东北部湖岸芦苇NPP不高。相对而言,双台河口湿地人为干扰方式较多样,保护区西侧边界受旱田作业、辽河油田及人类生活影响^[23-24],芦苇生产力较低;双台子河东侧主要

受水产养殖影响,该区域水文条件也更优越,故芦苇生产力较高。

5.2 未来工作展望

实验基于光能利用率模型结构提出了植被 NPP 遥感估算的框架模型,其他地区的应用可参考相关指数来优化模型参数实现快速估算。实验重点在于探索利用可获得性更强、时空数据更连续的遥感数据实现湿地植被 NPP 估算模型构建的可行性,并选择 3 个有代表性的芦苇湿地样区进行应用验证。实验针对芦苇湿地植被 NPP 估算的气象因素分析未采用定量手段,而是结合地理位置和各湿地的自然条件进行的宏观对比分析,尚有完善和深入的空间。未来重点将放在连续观测和影响因素深入分析上。一方面,需加强芦苇群落结构生态参数的连续观测,开展日、月、年不同时间尺度上的光合有效辐射观测,建立并完善实地调查数据库,结合通量观测设备等数据,深入探究全球变化背景下、不同尺度湿地的碳循环机理。另一方面,可以收集更多可能影响 3 个湿地样区芦苇 NPP 的有关因子数据,进行定量、细化的湿地植被 NPP 影响因素分析,如影响不同区域芦苇生长的最佳水位及生产力与降水量间的关系等,评价各主要影响因子对 3 个湿地样区芦苇植被 NPP 的影响方向及影响强度,确定各湿地样区的主导影响因子,为湿地样区保护及管理提供指导。

6 结 论

实验依托光能利用率模型基本结构式,利用野外实测数据和 Landsat 数据,构建并评价具有生态学基础的芦苇湿地 NPP 遥感估算模型。研究发现,基于 $NPP=f(f(VI_1)) \times f(VI_2)$ 结构,同时考虑叶绿素含量与 LUE 的关系,构建的基于 NDVI 和 MSA-VI 两个遥感植被指数的模型为最优模型,估算精度为 89.2%。基于该模型计算得到的 3 个典型芦苇湿地地区 NPP 发现,受气候因素影响,从北向南,七星河、查干湖和双台河口 3 个保护区芦苇植被 NPP 呈递增趋势。对于小尺度芦苇湿地而言,实验所构建的优化模型精度远高于当前常用的低空间分辨率产品和复杂模型。实验提出的框架模型方法,对于中小尺度上湿地植被 NPP 估算具有重要的参考意义。

参考文献(References):

- [1] Lu Xianguo. A review and prospect for wetland science [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2002, 17(3): 170-172.[吕宪国. 湿地科学研究进展及研究方向[J]. 中国科学院院刊, 2002, 17(3): 170-172.]
- [2] Zhou Fufang, Shi Xiuhua, Qiu Guoyu, *et al.* A comparison study on the secondary production of macrobenthos in different wetland habitats in Shenzhen bay [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(20): 6511-6518.[周福芳, 史秀华, 邱国玉, 等. 深圳湾不同生境湿地大型底栖动物次级生产力的比较研究[J]. 生态学报, 2012, 32(20): 6511-6518.]
- [3] Liang Jianping, Ma Daxi, Mao Dehua, *et al.* Remote sensing based estimation of *Phragmites australis* aboveground biomass in Shuangtai estuary national nature reserve [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2016, 28(3): 60-66.[梁建平, 马大喜, 毛德华, 等. 双台河口国际重要湿地芦苇湿地生物量遥感估算[J]. 国土资源遥感, 2016, 28(3): 60-66.]
- [4] Li Yanfeng, Mao Dehua, Wang Zongming, *et al.* Remote sensing retrieval and spatial pattern analysis of leaf area index of *Phragmites australis* in Shuangtai estuary national nature reserve [J]. Wetland Science, 2014, 12(2): 163-169.[李延峰, 毛德华, 王宗明, 等. 双台河口国家级自然保护区芦苇叶面积指数遥感反演与空间格局分析[J]. 湿地科学, 2014, 12(2): 163-169.]
- [5] Wang Liwen, Wei Yaxing. Variation analysis about net primary productivity of the wetland in Panjin region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(19): 6006-6015.[王莉雯, 卫亚星. 盘锦湿地净初级生产力时空分布特征[J]. 生态学报, 2012, 32(19): 6006-6015.]
- [6] Ma Zeqing, Liu Qijing, Wang Huimin, *et al.* Productivity observation and simulation of pine forest (*Pinus elliottii*) in central tropical constructed wetland [J]. Scientia Sinica Terrae, 2008, 38(8): 1005-1015.[马泽清, 刘琪璟, 王辉民, 等. 中亚热带人工湿地松林(*Pinus elliottii*)生产力观测与模拟[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38(8): 1005-1015.]
- [7] Dong Dan, Ni Jian. Modeling changes of net primary productivity of karst vegetation in southwestern China using the CASA model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(7): 1855-1866.[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.]
- [8] Wu C, Han X, Ni J, *et al.* Estimation of gross primary production in wheat from in situ measurements [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2010, 12: 183-189. DOI: 10.1016/j.jag.2010.02.006.
- [9] Irisarri J G N, Oosterheld M Q, Paruelo J M, *et al.* Pattern and controls of above-ground net primary production in mead-

[1] Lu Xianguo. A review and prospect for wetland science [J].

- ows of patagonia, a remote sensing approach[J]. Journal of Vegetation Sciences, 2012, 23: 114-126. DOI: 10.1111/j.1654-1103.2011.01326.x.
- [10] Chen Jilong, He Lei, Wen Zhaoifei, *et al.* Carbon sequestration potential of a phragmites salt marsh in the Liaohu river estuarine wetland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(16): 5402-5410.[陈吉龙, 何蕾, 温兆飞, 等. 辽河三角洲河口芦苇沼泽湿地植被固碳潜力[J]. 生态学报, 2017, 37(16): 5402-5410.]
- [11] Thevs N, Zerbe S, Gahlert E, *et al.* Productivity of reed (*Phragmites australis* Trin. ex Steud.) in continental-arid NW China in relation to soil, groundwater, and land-use[J]. Journal of Applied Botany and Food Quality-angewandte Botanik, 2007, 81(1): 62-68.
- [12] Luo Ling, Mao Dehua, Zhang Bai, *et al.* Remote sensing estimation for light use efficiency of *Phragmites australis* based on landsat OLI over typical wetlands[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(4): 524-533. [罗玲, 毛德华, 张柏, 等. Landsat OLI 影像的典型湿地芦苇植被光能利用率遥感反演方法初探[J]. 武汉大学学报·信息科学, 2020, 45(4): 524-533.]
- [13] Mao Dehua, Wang Zongming, Han Jixing, *et al.* Spatio-temporal pattern of net primary productivity and its driven factors in Northeast China in 1982~2010[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(9): 1106-1111.[毛德华, 王宗明, 韩信兴, 等. 1982 - 2010 年中国东北地区植被 NPP 时空格局及驱动因子分析[J]. 地理科学, 2012, 32(9): 1106 - 1111.]
- [14] Monteith J L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems[J]. Journal of Applied Ecology, 1972, 9: 747 - 766.
- [15] Monteith J L. Climate and the efficiency of crop production in Britain[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, 1977, 281: 277 - 294.
- [16] Yang Fei, Zhang Bai, Song Kaishan, *et al.* Relationship between fraction of photosynthetically active radiation and vegetation indices, leaf area index of corn and soybean[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(11): 2046 - 2052.[杨飞, 张柏, 宋开山, 等. 玉米和大豆光合有效辐射吸收比例与植被指数和叶面积指数的关系[J]. 作物学报, 2008, 34(11): 2046 - 2052.]
- [17] Wu C Y, Huang W J, Yang Q Y, *et al.* Improved estimation of light use efficiency by removal of canopy structural effect from the Photochemical Reflectance Index (PRI)[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2015, 199: 333-338. DOI: 10.1016/j.agee.2014.10.017.
- [18] Soudani K, Delpierre N, Berveiller D, *et al.* A Survey of proximal methods for monitoring leaf phenology in temperate deciduous forests[J]. Biogeosciences, 2021, 18 (11): 3391-3408. DOI: 10.5194/bg-18-3391-2021.
- [19] Clevers J G P W, van Leeuwen H J C, Verhoef W. Estimating the fraction APAR by means of vegetation indices: a sensitivity analysis with a combined prospect-sail model[J]. Remote Sensing Reviews, 1994, 9(3): 203-220.
- [20] Jia Qingyu, Zhou Li, Xie Yanbing, *et al.* Study on biomass dynamics of phragmites communis community in Panjin wetland[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2006, 22(4): 25-29.[贾庆宇, 周莉, 谢艳兵, 等. 盘锦湿地芦苇群落生物量动态特征研究[J]. 气象与作物学报, 2006, 22(4): 25-29.]
- [21] Fang Jingyun, Liu Guohua, Xu Songling. Carbon bank of china's terrestrial ecosystem[M]// Wang Gengchen, Wen Yupu (eds). In greenhouse gas concentration and emission monitoring and related processes. Beijing: China Environmental Science Press, 1996: 391 - 397.[方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统的碳库[M]// 王庚辰, 温玉璞. 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: 391 - 397.]
- [22] Yu Hongmin, Liu Henan, Pan Huasheng. Reasons for sharp reduction of Qixinghe wetland area in Heilongjiang province[J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(6): 234-239.[于宏敏, 刘赫男, 潘华盛, 等. 黑龙江七星河湿地面积锐减原因的研究[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(6): 234-239.]
- [23] Li Xuesong. Study on the health assessment of chagan lake [D]. Changchun: Jilin University, 2018.[李雪松. 查干湖湖泊健康评估研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.]
- [24] Li Mei, Xu Lanshan, Wang Xiaoyu, *et al.* The degradation analysis of reed and seepweed wetlands in Shuangtai estuary reserve [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2020, 43(4): 99 - 103, 107.[厉梅, 徐兰珊, 王晓宇, 等. 双台河口保护区芦苇和碱蓬湿地退化分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2020, 43(4): 99 - 103, 107.]
- [25] Zhao Xinsheng, Cui Lijuan, Li Wei, *et al.* Evaluation on impact from human activities on ecosystem of Shuangtaihekou wetland in Liaoning province[J]. Water Resources and Hydro-power Engineering, 2017, 48(9): 16 - 23.[赵欣胜, 崔丽娟, 李伟, 等. 人类活动对辽宁双台河口湿地生态系统影响评价[J]. 水利水电技术, 2017, 48(9): 16 - 23.]

Exploration and Application of NPP Estimation Model for *Phragmites Australis* Wetlands

Luo Ling¹, Mao Dehua^{1,2}, Zhang Bai¹, Wang Zongming^{1,3}, Yang Guang⁴

(1.Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China;

2.Changchun Jingyuetan Remote Sensing Experiment Station, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China;

3.National Earth System Science Data Center, Beijing 100101, China;

4.Air Force Aviation University, Changchun 130022, China)

Abstract: Researches on Net Primary Productivity (NPP) of wetland vegetation are of great significance to the study of global change and carbon cycle. Taking three typical wetland samples in Northeast China as study area, based on Landsat 8 OLI and a large number of field data, this paper contrasted the combination forms of the basic structural formula of light utilization model. Results show that the model based on structure of $NPP = f(f(VI_1)) \times f(VI_2)$ and two vegetation indices (NDVI and MSAVI) are optimal, with an accuracy of 89%, which was higher than those of MODIS BIO-BGC and CASA model. In 2014, mean NPP of *Phragmites australis* for Qixinghe, Chaganhu and Shuangtaihekou wetland was 3 001, 3 050 and 3 621 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$, respectively. NPP is obvious different spatially in three wetland samples, which is mainly influenced by hydrological conditions and human activities. For *Phragmites australis* wetland with small spatial scale, remote sensing method can be used to estimate NPP conveniently and efficiently. This study can provide a reference and guide for the study of wetland vegetation NPP regionally.

Key words: Net Primary Productivity (NPP); Vegetation index; Landsat; *Phragmites australis* wetland; Light utilization model