

引用格式: Yuan Yirong, Wang Jiyan, Yang Jiawei, *et al.* Research on FPAR Estimation of Wetland in Zoige Plateau based on Vegetation Index[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(5): 1267–1276. [袁艺溶, 王继燕, 杨嘉葳, 等. 基于植被指数的若尔盖高原湿地光合有效辐射吸收比例估算研究[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(5): 1267–1276.]

DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2022.5.1267

基于植被指数的若尔盖高原湿地光合有效辐射吸收比例估算研究

袁艺溶, 王继燕, 杨嘉葳, 熊俊楠

(西南石油大学 土木工程与测绘学院, 测绘遥感地理信息防灾应急研究中心, 四川 成都 610500)

摘要: 植被光合有效辐射吸收比例(FPAR)是湿地生态系统碳收支和气候变化的关键参量, 直接反映湿地植被生长发育状况。基于植被指数的经验统计方法简单高效, 被广泛运用于草原、森林及作物等植被FPAR的模拟, 却较少用于湿地, 缺乏不同植被指数对湿地FPAR估算适应性的系统研究。研究对比了14种常见的植被指数, 选出最优植被指数用于反演若尔盖高原湿地生长季FPAR。结果表明: 常见的植被指数中, MSAVI指数动态考虑了土壤信息, 能较好地适应湿地植被FPAR的估算, 误差和 R^2 均优于其他植被指数。若尔盖高原湿地生长季FPAR取值在0.22—0.80之间, 整体分布较为均匀, 泥炭湿地、湿草甸及沼泽湿地平均FPAR分别为0.46、0.63和0.58; 生长季期间若尔盖高原不同类型湿地FPAR随时间呈现先增加后降低趋势。

关键词: 若尔盖高原; 湿地; 光合有效辐射吸收比例; 植被指数; 时空分布

中图分类号: P422.2; TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2022)05-1267-10

1 引言

湿地是陆地生态系统的重要组成部分, 承载了陆地15%的碳储量, 是全球最大的碳库之一^[1-2], 同时也是全球气候变化的“稳定器”^[3]。光合有效辐射吸收比例(Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation, FPAR)是评价陆地生态系统碳储量、研究全球气候变化的关键参量之一^[4-5], 常用于反映湿地植被光合作用能力, 与湿地植被生长发育状况直接相关^[6-7], 已经成为全球陆地生态系统碳循环与气候变化研究的重要课题之一^[8]。准确、快速地获取湿地植被FPAR, 对正确评估湿地生态系统固碳能力、稳定全球气候变化具有重要意义。

遥感影像具有覆盖范围广、获取及时的特点,

能够获取大面积、长时序FPAR。目前, 利用遥感影像反演FPAR的方法, 主要有经验统计模型和辐射传输方程^[9]。其中, 基于植被指数和植被类型的经验统计方法运算简单、参数少、效率高且可以获取全球尺度FPAR, 被广泛运用于植被FPAR的估算^[10]。然而, 植被指数众多, 不同植被指数用于不同地区FPAR估算具有不同的适应性^[11]。王保林等^[12]对比多种植被指数, 发现转换型土壤调整植被指数(TSAVI)由于加入了土壤调整因子, 减小了土壤背景对植被光谱特征的影响, 能够较好地模拟不同植被覆盖度的草地FPAR。梁守真等^[13]通过分析FPAR与各植被指数的相关关系, 指出增强植被指数(EVI)在森林FPAR估算中具有优势。陈雪洋等^[14-15]在利用不同植被指数模拟玉米生育期FPAR

收稿日期: 2021-08-20; 修订日期: 2022-07-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41701428), 四川省应用基础研究项目(2022NSFSC1179), 西南石油大学科研“启航计划”项目(2017QHZ026)、西南石油大学测绘遥感青年科技创新团队(2017CXTD09)联合资助。

作者简介: 袁艺溶(1998—), 女, 四川乐山人, 硕士研究生, 主要从事生态遥感研究。E-mail: yuanyirong09@163.com

通讯作者: 王继燕(1982—), 女, 河南新乡人, 副教授, 博士, 主要从事定量遥感、数据同化、生态模型研究。E-mail: wangjiyan@swpu.edu.cn

时发现,归一化植被指数(NDVI)与 FPAR 具有更高的相关性,能够有效提高玉米 FPAR 的估算精度。可知,现有植被指数估算 FPAR 的研究多集中在草原、森林及作物等方面^[12-17],较少用于湿地植被 FPAR 的反演,尚且缺乏不同植被指数在湿地 FPAR 估算中的适应性的系统研究。

若尔盖高原位于青藏高原东北缘,是我国泥炭湿地发育最大、最典型的地区,碳储量丰富^[18-20],同时极易受到全球气候变化的影响^[21],是研究湿地植被 FPAR 的典型区域。因此,以若尔盖高原作为研究区,基于常见的 14 种植被指数反演湿地植被 FPAR,对比分析不同植被指数估算湿地植被 FPAR 的适应性,选出最优植被指数用于若尔盖高

原湿地植被 FPAR 模拟,为湿地植被 FPAR 反演提供理论及技术支撑。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

若尔盖高原(100°36′—103°25′ E、33°10′—34°06′ N)行政上包含若尔盖县、红原县、阿坝县、玛曲县和碌曲县(图 1),面积约 42 770.02 km²,平均海拔约 3 500 m^[22-23]。该区域属于高原亚寒带湿润季风气候,长冬无夏,雨热同季,日照充足,太阳辐射强,生长季(6—9 月)降水量占全年降水量的 85%^[24]。若尔盖高原土地利用类型多样,包括森林、草原、灌木、湿地等^[25],其中湿地以泥炭地、沼泽湿地和湿草甸为主^[26]。

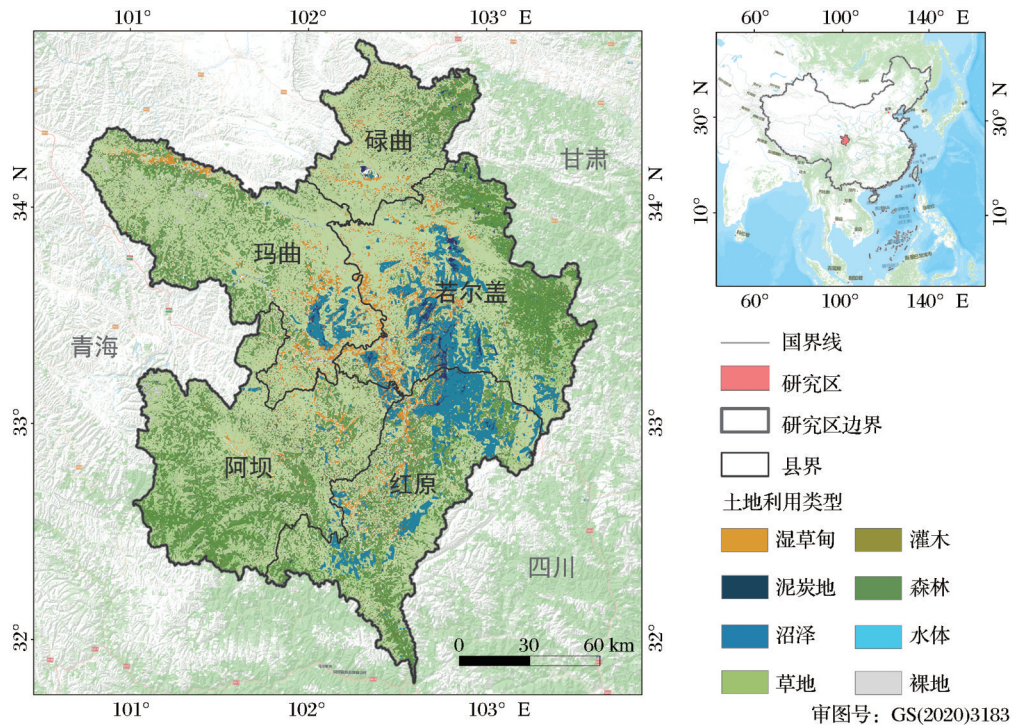


图 1 若尔盖高原概况

Fig.1 Overview of Zoige Plateau

2.2 数据来源及预处理

研究采用的数据主要包括:(1)2019 年 6—9 月 Landsat 8 OLI 遥感影像,空间分辨率 30 m(来源于 <http://glovis.usgs.gov/>),经过辐射校正、大气校正、镶嵌、掩膜提取、重采样等预处理后,主要用于各类植被指数的计算。(2)同时期 MODIS FPAR 产品(MOD15A2),分辨率为 1 000 m(来源于 <http://modis.gsfc.nasa.gov/>),利用 MRT 数据处理软件对数据进行格式转换、重投影、拼接等处理后,主要用于构建 FPAR 估算模型,验证模型估算精度。(3)2015

年土地利用/覆被遥感数据,分辨率为 30 m(来源于 <https://www.resdc.cn/>),进行投影变换、裁剪、重分类及重采样后,获得若尔盖高原土地利用类型数据。所有栅格数据的像元大小、行列数及投影方式均与 MODIS FPAR 数据保持一致。

2.3 基于不同植被指数的湿地植被 FPAR 估算模型

MODIS 提供了全球尺度的 1 000 m 分辨率的 FPAR 产品,较高的时间分辨率能够反映区域植被 FPAR 动态变化信息^[27]。为了明确植被指数估算湿地植被 FPAR 的适应性,将 MODIS FPAR 产品作

为真实值,从 Landsat 8 遥感影像提取植被指数,将土地利用类型中的湿地像元转换为矢量点,获得 4 240 组相对应的 FPAR 和植被指数数据(包含泥炭湿地 434 组,湿草甸 1 252 组,沼泽湿地 2 554 组),各类型湿地中随机选取前 70% 用于构建 FPAR 估算模型,其余(30%)用于对模型模拟结果的验证。

针对不同研究区、不同植被类型,植被指数表现存在差异^[28],本文选取较为常见的 14 种植被指

数,分析不同指数在若尔盖高原湿地的适应性,选取最优植被指数用于反演若尔盖高原湿地植被 FPAR(表 1)。

2.4 模型精度验证

为了验证 FPAR 模型估算精度,本文采用平均绝对误差(Mean Absolute Deviation, MAD)和平均相对误差(Relative Mean Deviation, RMD)评估模型估算结果,具体公式如式(1)~(2)所示。

表 1 常见植被指数

Table 1 The common vegetation index

植被指数	英文缩写(全称)	公式
差值植被指数	DVI (Difference Vegetation Index)	$\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{R}}$
比值植被指数	RVI (Ratio Vegetation Index)	$\rho_{\text{NIR}} / \rho_{\text{R}}$
归一化植被指数	NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$(\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{R}}) / (\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{R}})$
增强型植被指数	EVI (Enhanced Vegetation Index)	$\frac{G * (\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{R}})}{(\rho_{\text{NIR}} + C_1 * \rho_{\text{R}} - C_2 * \rho_{\text{B}} + L)}$
修正植被指数	MVI (Modified Vegetation Index)	$\frac{\sqrt{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{R}}}}{\sqrt{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{R}}}} + 0.5$
改进的归一化植被指数	MNDVI (Modified Normalized Difference Vegetation Index)	$\frac{c * \rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{R}}}{c * \rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{R}}}$
土壤调整指数	SAVI (Soil Adjust Vegetation Index)	$\frac{(\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{R}}) * (1 + L_1)}{(\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{R}} + L_1)}$
土壤调整简单比	SASR (Soil Adjust Simple Ratio)	$\frac{\rho_{\text{NIR}} + L/2}{\rho_{\text{R}} + L/2}$
优化土壤调整指数	OSAVI (Optimized Soil Adjust Vegetation Index)	$\frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{R}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{R}} + 0.16}$
修正土壤调整植被指数	MSAVI (Modified Soil Adjust Vegetation Index)	$\frac{(2\rho_{\text{NIR}} + 1 - \sqrt{(2\rho_{\text{NIR}} + 1)^2 - 8(\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{R}})})}{2}$
简单比值水体指数	SRWI (Simple Ratio Water Index)	$\rho_{\text{NIR}} / \rho_{\text{MIR}}$
归一化水体指数	NDWI (Normalized Difference Water Index)	$(\rho_{\text{G}} - \rho_{\text{NIR}}) / (\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{G}})$
改进的归一化水体指数	MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index)	$(\rho_{\text{G}} - \rho_{\text{MIR}}) / (\rho_{\text{G}} + \rho_{\text{MIR}})$
归一化水汽指数	NDMI (Normalized Difference Moisture Index)	$(\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{MIR}}) / (\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{MIR}})$

注:上述公式中, ρ_{NIR} 、 ρ_{R} 、 ρ_{G} 、 ρ_{B} 、 ρ_{MIR} 分别表示近红外、红光、绿光、蓝光及中红外波段反射率;G为调节系数,一般为2.5; C_1 、 C_2 为抵抗大气调节系数, $C_1=6$ 、 $C_2=7.5$;L为土壤调节因子,一般取值为L=1;c为调节系数,取值为0.5; L_1 表示土壤调节系数,由实际区域条件决定,本文取值为0.5。

$$\text{MAD} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_i - I_i| \quad (1)$$

$$\text{RMD} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_i - I_i|}{\bar{X}} \quad (2)$$

其中: X_i 和 I_i 分别表示模拟结果和MODIS-FPAR值,n表示样点数。MAD和RMD值越小,模型模拟结果与MODIS FPAR产品数值越接近,模型估算精度越高。

3 结果与分析

3.1 FPAR的植被指数估算模型

常见的 14 种植被指数与若尔盖高原湿地植被 FPAR 具有明显相关性(表 2),除 SRWI 和 NDMI,

拟合优度系数(R^2)均大于 0.5。其中,MSAVI 能较好地估算湿地 FPAR, R^2 达到 0.804, 均方根误差(RMSE)为 0.033, 平均相对误差(MAD)和平均绝对误差(RMD)分别为 3.55% 和 6.21%; 其次为 MVI 线性相关模型和 NDVI 线性相关模型, R^2 分别为 0.783 和 0.764; 而 SRWI 线性相关模型估算湿地 FPAR 结果最差, R^2 为 0.293, 均方根误差为 0.069。其他植被指数估算模型模拟的 FPAR 平均绝对误差和平均相对误差均高于 MSAVI 线性相关模型, 低于 SRWI 线性相关模型。因此, 14 种植被指数中, 可选取 MSAVI 用于若尔盖高原湿地 FPAR 模型构建。

表 2 基于常见植被指数的 FPAR 模型

Table 2 FPAR estimation model based on common vegetation indexes

植被指数	估算模型	R^2	RMSE	MAD/‰	RMD/‰
DVI	$FPAR=0.00002VI_{DVI}+0.398$	0.610	0.050	4.23	7.51
RVI	$FPAR=0.2146VI_{RVI}+0.161$	0.678	0.045	4.96	8.65
NDVI	$FPAR=0.8911VI_{NDVI}+0.298$	0.764	0.037	4.03	7.04
EVI	$FPAR=0.6597VI_{EVI}+0.3575$	0.697	0.043	5.13	8.95
MVI	$FPAR=1.5667VI_{MVI}-0.8343$	0.783	0.036	3.86	6.74
MNDVI	$FPAR=0.8179VI_{MNDVI}+0.594$	0.743	0.039	4.35	7.60
SASR	$FPAR=0.2146VI_{SASR}+0.161$	0.678	0.045	4.95	8.64
SAVI	$FPAR=0.5941VI_{SAVI}+0.298$	0.763	0.037	4.05	7.08
OSAVI	$FPAR=0.8911VI_{OSAVI}+0.295$	0.761	0.037	4.08	7.12
MSAVI	$FPAR=0.7134VI_{MSAVI}+0.2401$	0.804	0.033	3.55	6.21
SRWI	$FPAR=0.3878VI_{SRWI}+0.094$	0.293	0.069	6.69	11.64
NDWI	$FPAR=-0.903VI_{NDWI}+0.3065$	0.757	0.038	4.68	8.17
MNDWI	$FPAR=-1.0044VI_{MNDWI}+0.374$	0.572	0.051	5.78	9.61
NDMI	$FPAR=1.0152VI_{NDMI}+0.4684$	0.313	0.068	6.33	11.02

注:以上模型均满足 $P<0.01$ 的显著性检验。

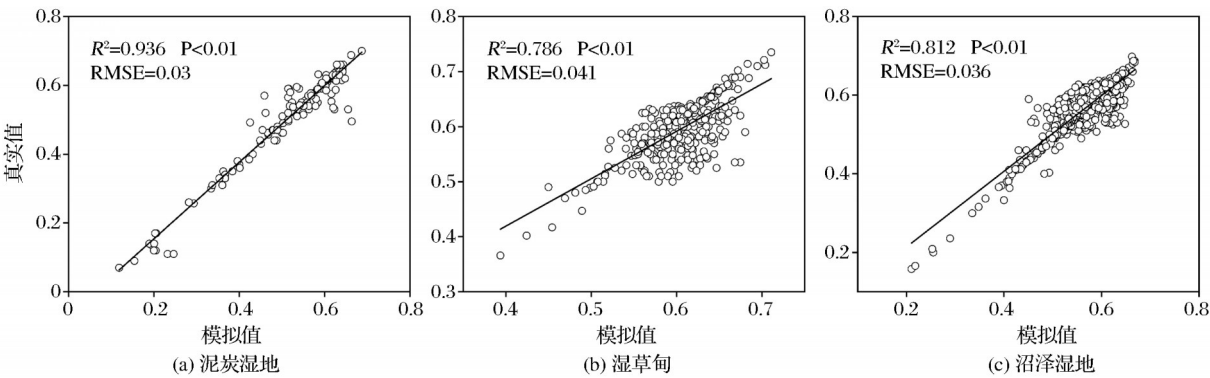


图 2 不同类型湿地 FPAR 模拟值与真实值关系

Fig.2 The relationship between simulated and actual values of FPAR in different types of wetlands

为探究 MSAVI 线性相关模型在不同类型湿地植被 FPAR 估算中的效果,将模型模拟结果同真实值进行比较,结果显示(图 2):对于泥炭地、湿草甸和沼泽湿地,基于 MSAVI 反演的不同类型湿地植被 FPAR 与真实值之间表现出良好的相关关系, R^2 均大于 0.7,其中泥炭湿地 FPAR 模拟结果最优, R^2 达到 0.936,均方根误差(RMSE)仅 0.03,其次为沼泽湿地, R^2 及 RMSE 分别为 0.812 和 0.036,湿草甸 FPAR 模拟结果在三类湿地中最差, R^2 为 0.786, RMSE 为 0.041。可知,MSAVI 在不同类型湿地 FPAR 模拟中具有良好的适应性,基于 MSAVI 的线性相关模型能较好地估算湿地植被 FPAR,优于其他植被指数,可以做进一步分析。

3.2 若尔盖高原湿地植被 FPAR 时空特征

3.2.1 FPAR 空间分布

若尔盖高原湿地 FPAR 总体分布较为均匀

(图 3),大部分地区 FPAR 在 0.5—0.7 之间,低值区域($FPAR<0.4$)主要位于若尔盖县内。研究区平均 FPAR 为 0.56,泥炭湿地、湿草甸和沼泽湿地平均 FPAR 分别为 0.46、0.63 和 0.58。不同类型湿地 FPAR 分布差异较为明显(图 4):泥炭湿地 FPAR 取值介于 0.26—0.64 之间,绝大多数像元值处于 0.4—0.55 阶段,占比达到 92.6%;湿草甸 FPAR 总体在 0.35—0.81 之间,其中 FPAR 处于 0.5—0.7 之间的像元占比为 86.6%, FPAR 低于 0.4 的像元仅占总体像元的 0.84%;沼泽湿地 FPAR 取值在 0.18—0.71 之间, FPAR 处于 0.4—0.6 之间的像元占总体的 74.3%, FPAR 小于 0.4 的像元仅占 16.3%。

3.2.2 FPAR 时间变化

若尔盖高原湿地生长季月均 FPAR 差异明显(图 5),6—9 月区域平均 FPAR 分别为 0.57、0.62、0.55 和 0.48。其中,7 月 FPAR 值最高,除若尔盖县

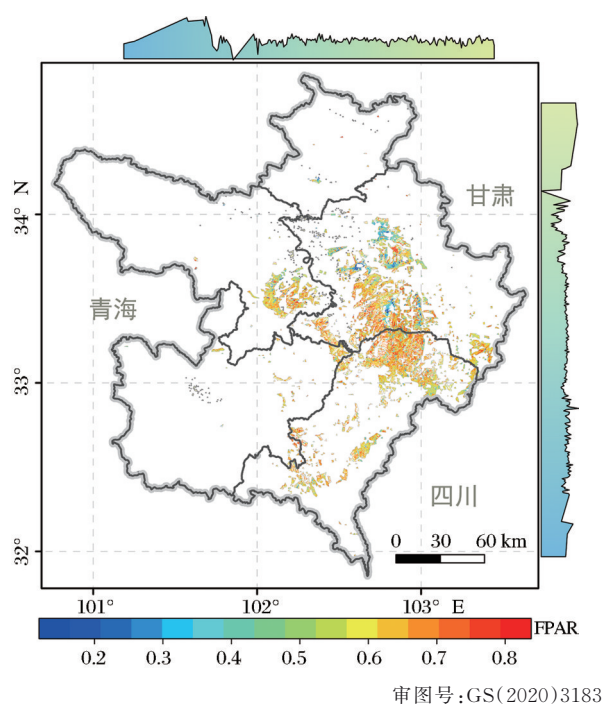


图3 若尔盖高原湿地生长季平均 FPAR

Fig.3 Average FPAR in the growing season of wetlands on the Zoige Plateau

(注:上部和右部插图为 FPAR 平均值随经纬度变化,下同)

部分地区 FPAR 低于 0.4,其余地区 FPAR 均在 0.5 以上;9 月 FPAR 明显低于生长季其他月份,FPAR 小于 0.5 的区域占研究区的 83%,FPAR 大于 0.65 的仅占 1%。生长季期间,随着时间变化,FPAR 呈现出先增加后降低的趋势。6—7 月植被生长旺盛,FPAR 增加,7—9 月植被生长速率减缓,FPAR 逐步降低。不同类型湿地平均 FPAR 随时间变化与研究区同步(图 6),呈先增加后降低趋势。其中,泥炭湿地 FPAR 随时间变化幅度最大,达到 33.3%,其次为沼泽湿地,FPAR 变化幅度为 19.0%,湿草甸 FPAR 在三类湿地中变化幅度最小,为 14.7%。各

研究时段中,泥炭湿地、湿草甸和沼泽湿地 FPAR 在 6—7 月均呈现较为平缓的增长趋势,斜率分别为 0.03、0.04、0.04;7—8 月湿草甸 FPAR 降低最为明显,斜率为 -0.08;8—9 月泥炭湿地 FPAR 变化最为急剧,呈显著降低趋势(斜率为 -0.09)。整体来看,不同类型湿地 FPAR 生长季内动态变化均呈现出较为明显的单峰特征,该曲线一定程度上反映了湿地植被生长状态变化。

4 讨论

4.1 基于植被指数的湿地植被 FPAR 估算模型构建

MODIS 提供了全球 1 000 m 分辨率 FPAR 产品,较低分辨率难以反映若尔盖高原湿地 FPAR 空间异质性,本研究采用 Landsat 8 遥感影像计算植被指数,同 MODIS-FPAR 构建适合若尔盖湿地的 FPAR 估算模型,一定程度上提高了区域 FPAR 估算精度。然而遥感影像受传感器性能、大气、云量等多种因素影响,存在部分像元信息缺失现象,造成影像空间信息的不连续性^[29],使得 FPAR 模拟存在一定误差。因此,提高数据源精度是未来 FPAR 遥感估算的研究方向之一。

不同植被指数用于不同地区 FPAR 估算具有不同的适应性,譬如,NDVI、RVI 及 DVI 更适用于植被覆盖度高地区的 FPAR 估算^[12],而 SAVI、OSAVI、MSAVI、EVI 等指数由于土壤调整系数的加入,一定程度上去除了土壤对植被光谱特征的影响,更适用于植被覆盖度较低的区域^[30]。实验综合考虑了不同植被指数在研究区的适应性,选取较常见的 14 种植被指数用于 FPAR 估算,结果发现 MSAVI 能较好地估算湿地植被 FPAR,且在泥炭湿地 FPAR 估算中效果最优,这与植被指数特性及湿地的植被特征相关。实验研究时段为 6—9 月,此时

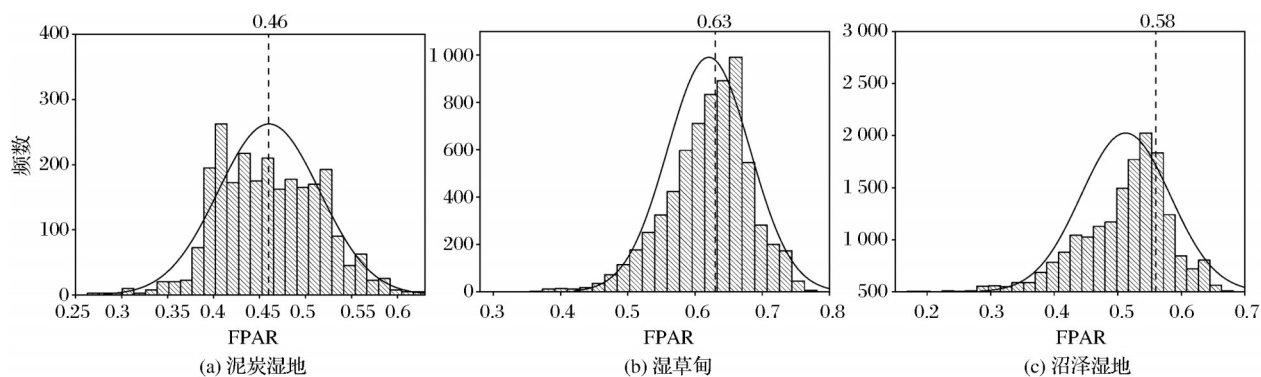
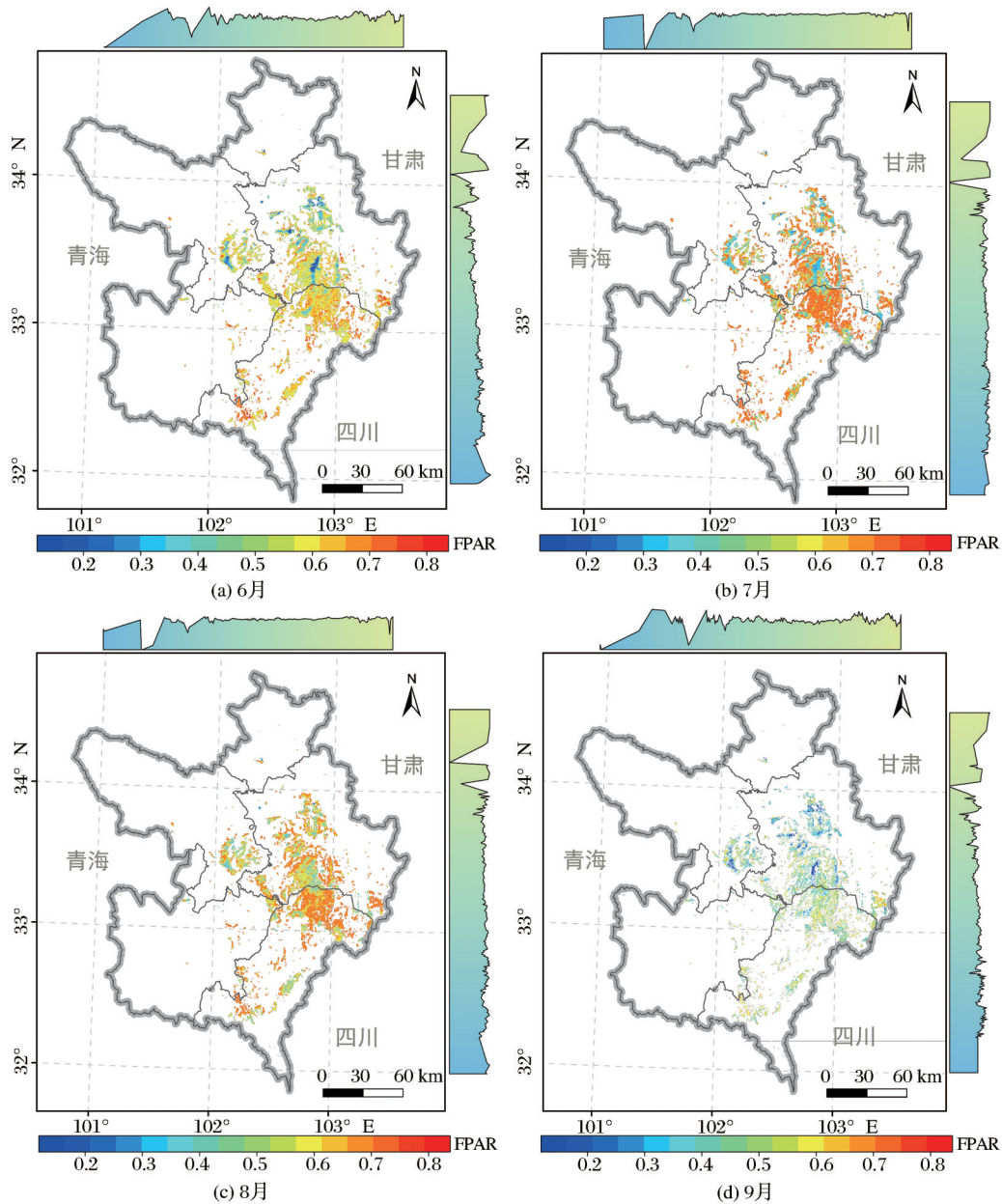


图4 不同类型湿地生长季平均 FPAR 像元统计

Fig.4 Average FPAR pixel statistics of different types of wetlands in the growing season



审图号:GS(2020)3183

图5 若尔盖高原湿地6—9月平均 FPAR

Fig.5 Average FPAR of wetlands on the Zoige Plateau from June to September

若尔盖高原湿地处于降水丰沛期,地表存在大量季节性积水,地下水位埋深较非雨季升高 0.5 m 左右^[31],导致部分植被被水体掩盖,区域植被覆盖度降低,而 MSAVI 能利用土壤调整变量函数,增加植被动态信号范围,在植被覆盖低的区域能进一步减小土壤背景的影响^[32],因此在湿地植被 FPAR 估算中较为适用。不同类型湿地中,泥炭湿地分布有大量泥炭土,植被较为稀疏,植被覆盖度在 3 类湿地中最低,而沼泽湿地为常年积水区,地表水深较高,植被覆盖度低于湿草甸^[33],因此 3 类湿地中,MSAVI 估算 FPAR 效果为泥炭湿地>沼泽湿地>湿草甸。

综合来看,MSAVI 在湿地 FPAR 估算中具有良好的适应性,在对模型参数进行区域性改正后,可以用于其他地区湿地 FPAR 估算。

利用植被指数构建 FPAR 估算模型,方法简单,易于推广,一定程度上克服了由于混合像元导致的区域 FPAR 反演精度低的问题。然而,在利用植被指数构建 FPAR 估算模型过程中,实验只考虑了湿地植被生长状况和土壤背景的影响,忽略了不同湿地植被类型及植被指数饱和现象所导致的不确定性^[34],这些因素是否会影响湿地植被 FPAR 模型模拟精度还有待进一步研究。此外,实验采用传

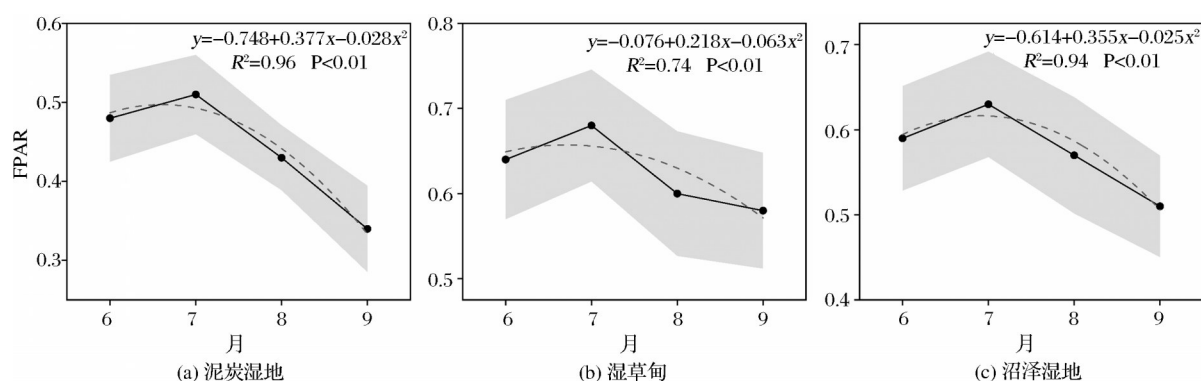


图6 不同类型湿地生长季平均 FPAR 变化曲线

Fig.6 Average FPAR change curves of different types of wetlands in the growing season

统的统计学方法建立 FPAR 估算模型,受观测时间、地域等因素影响,导致模型的机理解释不强,普适性与外推性仍有一定限制。因此,后期的研究需进一步考虑植被 FPAR 估算模型的机理,增强 FPAR 估算的普适性与科学性。

随着遥感技术的不断发展,新型传感器和高光谱数据加入到植被指数的计算过程中^[35-36],经验方法也随之进入新的阶段。为克服单一植被指数在极端条件下的不确定性^[16,37-40],可将新型植被指数和多种植被指数结合起来用于估算湿地植被 FPAR,提高植被指数估算方法的适用性。此外,遥感数据的尺度问题一定程度上影响湿地植被 FPAR 产品在区域的应用,因此,发展长时序、高时空分辨率 FPAR 数据集也是未来湿地植被 FPAR 估算的重要研究方向。

4.2 若尔盖高原湿地植被 FPAR 时空特征分析

若尔盖高原湿地位于青藏高原东北部,属于高寒亚寒带湿润季风气候,该地区雨热充足,太阳辐射强,良好的环境条件使得植被光合作用能力普遍较强。本文基于植被指数模拟若尔盖湿地生长季 FPAR 均值为 0.56,与焦雪敏等^[6]研究夏季青藏高原东北部地区 FPAR 在 0.4—0.6 之间的研究结果基本相符。

若尔盖高原湿地 FPAR 整体分布较为均匀,低值区域主要位于若尔盖县内的泥炭湿地。在 3 类湿地中,泥炭湿地 FPAR 明显低于湿草甸及沼泽湿地,这是由于其土壤特性和群落组成不同。一方面,泥炭湿地常年积水,限制了土壤中有有机物的分解,使得泥炭湿地排出 CO₂ 较少而储存较多的碳,不利于植被光合作用^[41];另一方面,泥炭湿地优势种植物为木里苔草,而沼泽湿地和湿草甸为垂穗披碱

草,后者为草地禾本科,具有更高的净光合速率,对光合有效辐射的吸收能力更强^[42],因此泥炭湿地 FPAR 在 3 类湿地中最低。

生长季期间,随着时间变化,若尔盖高原 3 类湿地 FPAR 均呈现出先增加后降低的趋势,这与该区域太阳辐射、气温、降水的月度变化有很高的相关性^[43]。6—7 月,若尔盖高原湿地太阳辐射增强,到达植被冠层的光合有效辐射增加,同时,适宜的气温及降水使得湿地植被具备良好的光合反应条件,植被的光合能力提升,FPAR 逐渐增大^[44]。7 月为当地高温时段,太阳辐射达到最强,地表径流和降水集中于此时,良好的环境条件使得若尔盖湿地植被处于生长最佳时期,FPAR 为全年最高值,基本都在 0.6 以上。9 月若尔盖高原进入秋季,气温下降、降水减少、太阳辐射逐步降低,该区域植被逐渐枯黄,FPAR 值较 7、8 月明显降低。

5 结 论

为准确获取若尔盖高原湿地 FPAR,本文基于 Landsat 8 数据和 MODIS 数据,利用常见的 14 种植被指数构建 FPAR 反演模型,对比不同植被指数的适应性,选出最优植被指数模型用于若尔盖高原湿地 FPAR 反演,主要结论如下:

(1) 常见的植被指数中,MSAVI 由于加入了土壤调整变量函数,能较好地估算湿地植被 FPAR,平均绝对误差和相对误差分别为 3.55% 和 6.21%,且该指数在若尔盖高原不同类型湿地 FPAR 反演中表现良好, R^2 均在 0.7 以上,优于其他植被指数。

(2) 若尔盖高原湿地生长季 FPAR 取值在 0.22~0.80 之间,平均值为 0.56,整体分布较为均匀,低值区域主要位于若尔盖县内。不同类型湿地

FPAR分布差异明显,泥炭湿地、沼泽湿地和湿草甸平均FPAR分别为0.46、0.58和0.63。

(3)若尔盖高原湿地6—9月平均FPAR分别为0.57、0.62、0.55和0.48,随时间呈现为先增加后降低趋势,不同类型湿地FPAR变化同研究区一致,其中泥炭湿地FPAR随时间变化幅度最大,达到33.3%。

参考文献(References):

- [1] Peng Wenhong, Mou Changcheng, Chang Yihui, *et al.* Carbon storage of forest-swamp wetland ecosystem in permafrost regions of Northeast Cold Temperate Zone[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(6):1526-1538.[彭文宏, 牟长城, 常怡慧, 等. 东北寒温带永久冻土区森林沼泽湿地生态系统碳储量[J]. *土壤学报*, 2020, 57(6):1526-1538.]
- [2] Wang Bowei, Mou Changcheng, Wang Biao. Carbon storage of primitive coniferous forest wetland ecosystem in Changbai Mountain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(9): 3344-3354.[王伯炜, 牟长城, 王彪. 长白山原始针叶林沼泽湿地生态系统碳储量[J]. *生态学报*, 2019, 39(9):3344-3354.]
- [3] Wang Jiyan, Li Ainong, Jin Huaan. Sensitivity analysis of the denitrification and decomposition model for simulating regional carbon budget at the wetland-grassland area on the Zoige Plateau, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2016, 13(7): 1200-1216.DOI: 10.1007/s11629-015-3520-z.
- [4] Dong Taifeng, Wu Bingfang, Meng Jihua, *et al.* Sensitivity analysis of retrieving fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation (FPAR) Using Remote Sensing Data[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(1): 1-7.
- [5] Gao Liming, Zhang Lele, Chen Kelong, *et al.* Photosynthetic active radiation characteristics of Alpine Wetland in Qinghai Lake Basin[J]. *Arid Zone Research*, 2018, 35(1): 50-56.[高黎明, 张乐乐, 陈克龙, 等. 青海湖流域高寒湿地光合有效辐射特征[J]. *干旱区研究*, 2018, 35(1): 50-56.]
- [6] Jiao Xuemin, Zhang Helin, Xu Fubao, *et al.* Analysis of the temporal and spatial changes of FPAR on the Qinghai-Tibet plateau from 1982 to 2015[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2020, 35(4): 950-961.[焦雪敏, 张赫林, 徐富宝, 等. 青藏高原1982~2015年FPAR时空变化分析[J]. *遥感技术与应用*, 2020, 35(4): 950-961.]
- [7] Zhang Jincheng, Zhou Wenzuo. Analysis on the spatio-temporal changes of the photosynthetically active radiation absorption Ratio of vegetation in Qinba Mountains from 2006 to 2015[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 5(38): 1453-1463.[章金城, 周文佐. 2006~2015年秦巴山区植被光合有效辐射吸收比例的时空变化分析[J]. *生态学杂志*, 2019, 5(38): 1453-1463.]
- [8] Madani N, Kimball JS, Affleck DLR, *et al.* Improving ecosystem productivity modeling through spatially explicit estimation of optimal light use efficiency[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2014, 119(9): 1755-1769. DOI: 10.1002/2014JG002709.
- [9] Tian Dingfang, Fan Wenjie, Ren Huazhong. Research progress of vegetation photosynthetically active radiation absorption ratio by remote sensing[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2020, 24(11): 1307-1324.[田定方, 范闻捷, 任华忠. 植被光合有效辐射吸收比率遥感研究进展[J]. *遥感学报*, 2020, 24(11): 1307-1324.]
- [10] Liang S Z, Sui X Y, Hou X H, *et al.* Simulation and analysis on green fraction of absorbed photosynthetically active radiation of deciduous broadleaved forest canopy through remote sensing model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(10): 3415-3424.DOI: 10.5846/stxb201603080405.
- [11] Ge Meixiang, Zhao Jun, Zhong Bo, *et al.* Comparison of FY-3/VIRR, MERSI and EOS/MODIS vegetation index and analysis of the difference[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2017, 32(2): 262-273.[葛美香, 赵军, 仲波, 等. FY-3/VIRR及MERSI与EOS/MODIS植被指数比较与差异原因分析[J]. *遥感技术与应用*, 2017, 32(2):262-273.]
- [12] Wang Baolin, Yang Yong, Zheng Shuhua, *et al.* Estimation of photosynthetic effective absorption ratio in typical grassland based on vegetation index[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 24(3): 689-692.[王保林, 杨勇, 郑淑华, 等. 基于植被指数的典型草原光合有效吸收比例估算研究[J]. *草业学报*, 2016, 24(3): 689-692.]
- [13] Liang Shouzheng, Ma Wandong, Wang Meng, *et al.* The relationship between canopy green FPAR and vegetation index and its sensitivity to aerosol[J]. *Surveying and Spatial Information Technology*, 2018, 41(12): 11-14.[梁守真, 马万栋, 王猛, 等. 冠层绿色FPAR与植被指数关系及其对气溶胶的敏感性分析[J]. *测绘与空间地理信息*, 2018, 41(12):11-14.]
- [14] Chen Xueyang, Meng Jihua, Wu Bingfang, *et al.* Summer corn FPAR remote sensing monitoring model based on HJ-1 CCD[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(S1): 241-245.[陈雪洋, 蒙继华, 吴炳方, 等. 基于HJ-1 CCD的夏玉米FPAR遥感监测模型[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(增刊1): 241-245.]
- [15] Zhao L, Liu Z G, Xu S, *et al.* Retrieving the diurnal FPAR of a maize canopy from the Jointing Stage to the Tasseling Stage with Vegetation Indexes under different water stresses and light conditions[J]. *Sensors*, 2018, 18(11): 3965. DOI: 10.3390/s18113965.
- [16] Tan C W, Wang D L, Zhou J, *et al.* Remote sensing Fraction of Photosynthetically Active Radiation (FPAR) for wheat canopies based on hyperspectral vegetation indexes[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 766(9): 1-9. DOI: 10.3389/fpls. 2018. 00776.
- [17] He Jia, Guo Yan, Zhang Yan, *et al.* Dynamic estimation of summer maize FPAR by remote sensing based on GF-1 data[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 53(4): 164-172.[贺佳, 郭燕, 张彦, 等. 基于GF-1数据的夏玉米FPAR遥感动态估算[J]. *农业工程学报*

- 报, 2022, 53(4): 164-172.]
- [18] Li Qing, Wang Hongtao, Liu Wen, *et al.* Estimating the potential of Alpine grassland vegetation net primary productivity based on HJ-1 satellite remote sensing data: Taking Ruogai grassland as an example[J]. China Desert, 2013, 33(4): 1250-1255.[李庆, 王洪涛, 刘文, 等. 以HJ-1卫星遥感数据估算高寒草地植被净第一性生产力的潜力评估——以若尔盖草地为例[J]. 中国沙漠, 2013, 33(4): 1250-1255.]
- [19] Guo Bin, Wang Shan, Wang Mingtian. Spatiotemporal changes of net primary productivity in Zoige Grassland Wetland from 1999 to 2015[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(2): 424-432.[郭斌, 王珊, 王明田. 1999~2015年若尔盖草原湿地净初级生产力时空变化[J]. 应用生态学报, 2020, 31(2): 424-432.]
- [20] Bian J H, Li A N, Deng W. Estimation and Analysis of net primary productivity of Ruogai Wetland in China for the recent 10 years based on remote sensing[J]. Procedia Environmental Sciences, 2010, 2: 288-301. DOI: 10.1016/j.proenv.2010.10.035.
- [21] Li Meng, Hu Rong, Pu Yulin, *et al.* Soil nitrogen mineralization characteristics and temperature effects of different degraded alpine Marsh Wetlands in Zoige [J]. Acta Grassland, 2021, 29(5): 1025-1033.[李梦, 胡容, 蒲玉琳, 等. 若尔盖不同退化程度高寒沼泽湿地土壤氮矿化特征及温度效应[J]. 草地学报, 2021, 29(5): 1025-1033.]
- [22] Zhai Xing, Wang Jiyan, Yu Bing, *et al.* Remote sensing monitoring of grazing intensity in Zoige Plateau based on above-ground Net Primary Productivity and above-ground biomass [J]. Pragmatic Science, 2021, 38(3): 544-553.[翟星, 王继燕, 于冰, 等. 基于地上净初级生产力与地上生物量的若尔盖高原放牧强度遥感监测[J]. 草业科学, 2021, 38(3): 544-553.]
- [23] Liu Lijuan, Liu Xinwei, Ju Peijun, *et al.* Development and carbon dynamics of peatland in Zoige Plateau since 15 000 years [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(18): 6493-6501.[刘利娟, 刘欣蔚, 鞠佩君, 等. 15000年以来若尔盖高原泥炭地发育及其碳动态[J]. 生态学报, 2018, 38(18): 6493-6501.]
- [24] Zhang Zhengjian, Li Ainong, Bian Jinhu, *et al.* Estimation of aboveground biomass of Zoige Grassland based on UAV image visible light vegetation index[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016, 31(1): 51-62.[张正健, 李爱农, 边金虎, 等. 基于无人机影像可见光植被指数的若尔盖草地上生物量估算研究[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(1): 51-62.]
- [25] Fei Yi, Wang Jiyan, Wang Zegen. Quantitative analysis of land desertification and its Causes in Zoige Plateau [J]. Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(8): 146-152.[费怡, 王继燕, 王泽根. 若尔盖高原土地沙化及其成因定量分析[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(8): 146-152.]
- [26] Yuan Yue, Zhang Liang, Cui Linlin. Temporal and spatial changes of water conservation function of Zoige Plateau ecosystem [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(8): 2713-2723.[苑跃, 张亮, 崔林林. 若尔盖高原生态系统水源涵养功能时空变化特征[J]. 生态学报, 2020, 39(8): 2713-2723.]
- [27] Yin Xiaojun, Zhu Honghui, Gao Jerry, *et al.* NPP simulation of farming and pastoral areas based on the fusion of Landsat and MODIS data [J]. Journal of Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 163-170.[尹小君, 祝宏辉, GAO Jerry 等. 基于 Landsat 和 MODIS 数据融合的农牧区 NPP 模拟[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 163-170.]
- [28] Chen Minghua, Chai Peng, Chen Wenxiang, *et al.* Comparative study on estimation of vegetation coverage with different vegetation indices [J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2016, 28(1): 52-56.[陈明华, 柴鹏, 陈文祥, 等. 不同植被指数估算植被覆盖度的比较研究[J]. 亚热带水土保持, 2016, 28(1): 52-56.]
- [29] Chen Baolin, Zhang Bincai, Wu Jing, *et al.* Application of historical average method to pixel cloud compensation in MODIS Image: Taking Gansu Province as an example [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2021, 33(2): 85-92.[陈宝林, 张斌才, 吴静, 等. 历史平均值法用于 MODIS 影像像元云补偿——以甘肃省为例[J]. 国土资源遥感, 2021, 33(2): 85-92.]
- [30] Niu Yaxiao, Zhang Liyuan, Han Wenting, *et al.* Winter wheat coverage extraction method based on UAV remote sensing and vegetation index [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 212-221.[牛亚晓, 张立元, 韩文霆, 等. 基于无人机遥感与植被指数的冬小麦覆盖度提取方法[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 212-221.]
- [31] Li Zhiwei, Lu Hanyou, Hu Xuyue. Water balance calculation of typical peat wetland in Zoige Plateau [J]. Advances in Water Science, 2018, 29(5): 655-666.[李志威, 鲁瀚友, 胡旭跃. 若尔盖高原典型泥炭湿地水量平衡计算[J]. 水科学进展, 2018, 29(5): 655-666.]
- [32] Liu Yuqing, Yan Feng, Chen Junhan. Remote sensing estimation of biomass in arsenic area based on Landsat-8 OLI data [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(2): 135-140, 148.[刘雨晴, 闫峰, 陈俊翰. 基于 Landsat-8 OLI 数据的砒砂岩区生物量遥感估算[J]. 水土保持研究, 2021, 28(2): 135-140, 148.]
- [33] Jiang Jingang, Li Ainong, Bian Jinhu, *et al.* Research on wetland changes in Zoige County from 1974 to 2007 [J]. Wetland Science, 2012, 10(3): 318-326.[蒋锦刚, 李爱农, 边金虎, 等. 1974~2007年若尔盖县湿地变化研究[J]. 湿地科学, 2012, 10(3): 318-326.]
- [34] Cristiano P M, Posse G, Bella C M D, *et al.* Uncertainties in FPAR estimation of grass canopies under different stress situations and differences in architecture [J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(15): 4095-4109. DOI: 10.1080/01431160903229192.
- [35] Wang Y T, Yan G J, Xie D H, *et al.* Generating long time series of high spatiotemporal resolution FPAR images in the remote sensing trend surface framework [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60(1): 1-15. DOI:

- 10.1109/TGRS.2021.3067913.
- [36] Arturo S A, Lain S, Paul D G, *et al.* Calibration of Co-located identical PAR sensors using wireless sensor networks and characterization of the in situ FPAR variability in a tropical dry forest [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14 (12) : 2752. DOI: 10.3390/rs14122752.
- [37] Dong J W, Xiao X M, Wagle P, *et al.* Comparison of four EVI-based models for estimating gross primary production of maize and soybean croplands and tallgrass prairie under severe drought [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 2(162): 154-168. DOI: 10.1016/j.rse.2015.02.022
- [38] Majasalmi T, Rautiainen M, Stenberg P. Modeled and measured FPAR in a boreal forest: Validation and application of a new model [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 189(204): 46-47. DOI: 10.1016/j.agrformet.2014.01.015.
- [39] Luke A B, Courtney M, Harry M, *et al.* Evaluation of global leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation products over North America using copernicus ground based observations for validation data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 247 (1) : 1-22. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111935.
- [40] Chen B X, Zhang X Z, Sun Y F, *et al.* Alpine grassland FPAR change over the Northern Tibetan Plateau from 2002 to 2011 [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2017, 8 (2): 108-116. DOI: 10.1016/j.accre.2017.05.008
- [41] Zhou Zijuan, Su Peixi, Shi Rui, *et al.* Light use efficiency of plants and the environmental impact factors in different Alpine ecosystems [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36 (6) : 1570-1577. [周紫鹃, 苏培玺, 侍瑞, 等. 不同高寒生态系统植物光能利用效率及其环境影响 [J]. *生态学杂志*, 2017, 36 (6): 1570-1577.]
- [42] Liu Yanxia, Liu Yangyang, Chen Shiwei, *et al.* Photosynthetic and physiological characteristics of plants along the slope gradient of Alpine meadow on the eastern edge of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Soil and Crops*, 2015, 4(3): 104-112. [刘晏霞, 刘洋洋, 陈世伟, 等. 青藏高原东缘高寒草甸坡向梯度上植物光合生理特征研究 [J]. *土壤与作物*, 2015, 4(3): 104-112.]
- [43] Deng Chenhui, Bai Hongying, Gao Shan, *et al.* Temporal and spatial changes of vegetation coverage in Qinling Mountains and its dual response to climate change and human activities [J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(3): 425-438. [邓晨晖, 白红英, 高山, 等. 秦岭植被覆盖时空变化及其对气候变化与人类活动的双重响应 [J]. *自然资源学报*, 2018, 33(3): 425-438.]
- [44] Rao Junfeng, Zhang Xianfeng, Lian Jingfang. The influence of the uncertainty in the retrieval of atmospheric precipitation from satellite remote sensing on the simulation of total solar radiation [J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(4): 639-648. [饶俊峰, 张显峰, 练静芳. 大气可降水量卫星遥感反演不确定性对太阳总辐射模拟的影响 [J]. *自然资源学报*, 2016, 31(4): 639-648.]

Research on FPAR Estimation of Wetland in Zoige Plateau based on Vegetation Index

Yuan Yirong, Wang Jiyan, Yang Jiawei, Xiong Junnan

(School of Civil Engineering and Geomatics, Southwest Petroleum University, Surveying and Mapping Remote Sensing Geographic Information Disaster Prevention Emergency Research Center, Chengdu 610500, China)

Abstract: The Fraction of absorbed Photosynthetically Active Radiation (FPAR) is a key parameter for carbon balance and climate change in wetland ecosystems, which directly reflects the growth and development of wetland vegetation. The empirical statistical method based on vegetation indexes is simple and efficient, and which has been widely used in the simulation of FPAR of grassland, forest and crop vegetation, but it is rarely used in wetlands. There is a lack of systematic research on the adaptability of different vegetation indexes to wetland FPAR estimation. In this paper, 14 common vegetation indexes are compared, and the optimal vegetation index is selected to invert the FPAR of the wetland in the Zoige Plateau during the growing season. The results indicate that the MSAVI index dynamically considers soil information, and can better adapt to the estimation of wetland vegetation FPAR among the common vegetation indexes, and its error and R^2 are better than other vegetation indexes. The FPAR value of the Zoige Plateau wetland in the growing season is between 0.22 and 0.8, and the overall distribution is relatively uniform. The average FPAR of peat wetland, wet meadow and marsh wetland are 0.46, 0.63 and 0.58 respectively. During the growing season, the FPAR of different types of wetlands on the Zoige Plateau showed a trend of first increasing and then decreasing with time.

Key words: Zoige Plateau; Wetland; FPAR; Vegetation index; Temporal and spatial distribution