

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.02.024

杨海波, 李渊, 尹航, 等. 基于新组合光谱指数的马铃薯植株氮含量遥感估测. 土壤, 2022, 54(2): 385–395.

基于新组合光谱指数的马铃薯植株氮含量遥感估测^①

杨海波, 李渊, 尹航, 李斐*

(内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 内蒙古自治区土壤质量与养分资源重点实验室, 农业生态安全与绿色发展自治区高等学校重点实验室, 呼和浩特 010011)

摘要: 如何利用卫星搭载的常规通道蓝光(B)、绿光(G)、红光(R)和近红外(NIR)实现作物氮素营养诊断对于区域氮素优化管理及氮素循环估测具有重要意义。本研究以 2014—2016 年在内蒙古阴山北麓武川县和四子王旗布置的多年多点不同氮水平的田间试验为基础, 通过冠层高光谱仪 tec5 采集马铃薯关键生育期块茎形成期、块茎膨大期和淀粉积累期植株冠层光谱数据, 利用卫星通道的波段响应函数模拟 GF-2(GF)和 Sentinel 2A(S)卫星光谱反射率, 通过波段优化和指数组合计算波段优化归一化及其组合多光谱指数, 构建基于多光谱指数的马铃薯植株氮素含量估测模型, 并用田块数据进行验证。研究结果表明, 敏感波段的提取对卫星通道的准确筛选具有指导意义, 基于中心敏感波段筛选的绿光(G)和蓝光(B)通道计算的优化多光谱指数 GF-GBNDSI 和 S-GBNDSI 与马铃薯植株氮素含量的线性拟合决定系数(R^2)最高, 分别为 0.41 和 0.38。GBNDSI 分别与 NDVI 和 GNDVI 组合得到的多光谱指数 GBNDSI/NDVI 和 GBNDSI/GNDVI 能够显著提高对马铃薯植株氮素含量的解释能力, 其中 GF-GBNDSI/NDVI 和 GF-GBNDSI/GNDVI 与马铃薯植株氮素含量的线性拟合 R^2 分别为 0.57 和 0.56; S-GBNDSI/NDVI 和 S-GBNDSI/GNDVI 与马铃薯植株氮素含量的线性拟合 R^2 分别为 0.54 和 0.55。与红边(red edge, RE)多光谱指数相比, GBNDSI/NDVI 和 GBNDSI/GNDVI 不仅克服了大部分高分辨率卫星缺乏红边通道的缺点, 而且能够达到与红边多光谱指数 REBNDSI/NDVI($R^2=0.53$)和 REBNDSI/GNDVI($R^2=0.59$)基本相当的估测建模能力, 并在模拟的田块数据中到了良好的验证。S-GBNDSI/NDVI 估测模型的均方根误差和平均相对误差分别为 0.40%、10.48%; GF-GBNDSI/NDVI 估测模型的均方根误差和平均相对误差分别为 0.39%、10.06%。鉴于目前大多数高分辨率卫星, 尤其是国产系列卫星缺乏红边通道, 基于常规通道构建的优化光谱指数 GBNDSI/NDVI 和 GBNDSI/GNDVI 在作物植株氮素含量监测上更具备推广应用的价值。

关键词: 马铃薯; 氮素含量; 光谱指数; 卫星遥感

中图分类号: S532 **文献标志码:** A

Remotely Estimation of Plant Nitrogen Concentration in Potato Using New Combined Spectral Index

YANG Haibo, LI Yuan, YIN Hang, LI Fei*

(Inner Mongolia Key Laboratory of Soil Quality and Nutrient Resource, College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Key Laboratory of Agricultural Ecological Security and Green Development at Universities of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010011, China)

Abstract: Optimally using satellite carrying channels of blue (B), green (G), red (R) and near-infrared (NIR) to estimate crop N status play a crucial role in the management and estimation of regional N cycling. The current study was aimed to assess the performance of optimized normalized and integrated spectral indices, derived from simulated broadband GF-2 (GF) and Sentinel 2A (S) satellites data, to remotely sense plant N concentration in potato (*Solanum tuberosum* L.). Different field experiments were conducted with different N levels for two potato cultivars in Wuchuan County and Siziwangqi County at the northern Yinshan in Inner Mongolia from 2014 to 2016. The canopy reflectance data of potato at the growth stages of tuber formation, tuber bulking and starch accumulation were collected by a canopy hyper-spectrometer tec5. The estimation models of potato plant nitrogen concentration based on different spectral indices were constructed and validated by independent field

①基金项目: 内蒙古自治区关键技术攻关计划项目(2019GG248; 2020GG0038)资助。

* 通讯作者(Feili72@163.com)

作者简介: 杨海波(1993—), 男, 河北保定人, 博士研究生, 研究方向为农田氮素定量遥感与精准农业。E-mail: hbyang93@163.com

data. The results showed that the extractive sensitive bands were able to guide the selection of satellite carrying channels. The optimal multi-spectral indices GF-GBNDVI and S-GBNDVI calculated based on the green (G) and blue (B) channels selected from the sensitive central bands had the highest coefficient of determination (R^2) with plant N concentration of potato, and the R^2 was 0.41 and 0.38, respectively. The multi-spectral indices GBNDVI/NDVI and GBNDVI/GNDVI constructed by combining NDVI and GNDVI with GBNDVI, respectively, could significantly improve the explanation ability of plant N concentration of potato. The R^2 of GBNDVI/NDVI and GBNDVI/GNDVI based on GF-2 and Sentinel 2A channel ranged from 0.54 to 0.57. Compared with the red edge multi-spectral index, GBNDVI/NDVI and GBNDVI/GNDVI not only overcame the lacking the red edge channel with most high-resolution satellites, but also reached a better estimating ability like red edge based REBNDVI/NDVI ($R^2 = 0.53$) and REBNDVI/GNDVI ($R^2 = 0.59$). The validated results showed that the root mean square error and mean relative error of the S-GBNDVI/NDVI and GF-GBNDVI/NDVI models were about 0.40% and 10.27%, respectively. Since most high-resolution satellites, especially most of the domestic satellites lacking the red edge channel, the optimized GBNDVI/NDVI and GBNDVI/GNDVI involving conventional channels can be used to monitor plant N concentration in crop.

Key words: Potato; Nitrogen concentration; Spectral index; Satellite based remote sensing

遥感技术被广泛应用于作物营养诊断和长势监测,已成为精准农业管理决策系统的重要组成部分^[1-2]。其中光谱指数作为最重要的遥感参数,在植被理化指标的反演应用中已被广泛认可^[3-5]。近地面遥感虽然具有更高的估测精度,但很难在区域尺度上进行大面积监测^[6-7]。随着高空间分辨率多通道卫星数据越来越容易获取,大面积反演作物冠层参数已成为现实^[8-10]。这些高分辨率的卫星遥感数据将为大面积作物监测提供平台,有效利用这些数据是实现田块尺度监测向区域尺度发展的关键^[11-12]。

在农田氮素营养监测过程中,快速获取植株氮素营养状况是匹配土壤氮素供应和植株氮素吸收的关键。因此快速准确获取植株氮素营养状况对指导农田氮素管理十分重要。前人基于中高分辨率卫星影像的研究发现,尽管蓝光(B)、绿光(G)、红光(R)和近红外(NIR)波段能够用于植株吸氮量、氮营养指数等氮素营养指标的监测,但是估测精度有待进一步提高^[13-15]。大量研究表明,红边(red edge, RE)波段是植株氮素营养诊断的敏感波段,能够改善氮素含量较高时光谱指数“饱和”现象,提高氮素营养诊断的精度^[16]。Eitel等^[17-18]在使用模拟具有红边通道的卫星数据对小麦氮素营养估测中发现,基于红边波段构建的光谱指数在氮素含量和叶绿素含量估测中表现更佳,而且与传统归一化光谱指数(NDVI)和绿光归一化光谱指数(GNDVI)相比,基于红边的归一化光谱指数(NDRE)能够更好地识别氮素胁迫^[17-18]。红边指数在估测植株氮素水平以及叶面积指数方面明显好于基于红光建立的光谱指数^[19-21]。然而,目前部分在轨的中高分辨率卫星并不具备红边通道,尤其是近些年我国发射的

GF系列卫星。因此,如何充分发挥卫星常规通道(非红边通道)在光谱氮素营养诊断上的价值,进而打破红边通道限制,对于卫星遥感在农田氮素营养诊断中的应用具有重要研究价值。

光谱指数是农田氮素遥感诊断常用的指标之一,其中,基于简单归一化算法计算的归一化光谱指数是目前应用最为广泛的光谱指数,对于反映植被信息和活力具有重要作用^[22-23],被广泛应用于区域和全球尺度的农情遥感速报系统^[24-27]。为探究卫星常规通道在马铃薯植株氮素含量中的估测能力,本研究利用地面实测马铃薯冠层反射率数据对卫星常规和红边通道光谱反射率进行模拟,通过波段优化和指数组合算法对卫星常规通道计算的归一化光谱指数进行改进。目的是打破红边通道限制,提高未搭载红边通道的常规高分辨率卫星对马铃薯植株氮素含量的估测精度,改善卫星常规通道估测马铃薯植株氮素含量的普适性,为常规通道卫星在马铃薯植株氮素含量遥感应用中提供理论和技术支持。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

马铃薯田间试验于2014—2016年布置在我国内蒙古呼和浩特市武川县和四子王旗。2014年试验地点位于武川县大豆铺乡,供试马铃薯品种为克新1号,共设置6个氮肥施用量,分别为N0、83、135、165、180、250 kg/hm²。2015年试验地点位于武川县上秃亥乡,马铃薯品种为夏坡蒂,共设置6个氮肥梯度,分别为N0、90、144、180、270、424 kg/hm²。2016年试验地点位于四子王旗忽鸡图乡,马铃薯品

种为荷兰 14, 氮水平为 N 0、180、350 kg/hm²。每个处理设置 4 次重复, 2014 年和 2015 年试验田小区面积为 81 m², 2016 年试验田小区面积为 108 m², 各小区除氮肥用量不同外, 其他田间管理措施与当地一致。

1.2 光谱数据的采集

于马铃薯关键生长期: 苗期、块茎形成期、块茎膨大期和淀粉积累期, 在不同氮肥梯度小区随机选取长势均匀的马铃薯两垄, 长度 4~6 m, 面积 7.2~10.8 m², 利用德国斯派克公司生产的 tec5 高光谱仪扫描获得选择区域马铃薯冠层光谱数据。tec5 高光谱仪的测量头由两个光学部分组成, 其中顶端部分用于测量入射光作为参考, 与顶端部分相连的下半部分用于记录来自植被和地面的反射光。传感器具有 256 个波段, 光谱检测范围为 300~1150 nm, 光谱分辨率为 1.4 nm。高光谱数据采集时选择晴朗无风或微风天气, 测定时间在 10:00—14:00, 光谱仪探头垂直马铃薯冠层, 高度控制在 50~80 cm, 扫描时扣动扳机, 获取的光谱数据自动存入连接的电脑中, 用于马铃薯植株氮素含量估测模型的构建。同时采集试验田周边农田马铃薯冠层光谱数据用于后续模型验证。为探究卫星搭载的可见光和近红外通道的马铃薯植株氮素含量估测能力, 本研究在模拟卫星光谱反射率时选取的高光谱波段范围为 400~900 nm。

1.3 植株样品采集与测定

马铃薯冠层光谱数据采集完成后, 随机选取探头扫描区域长势均匀的马铃薯植株 1 m 样段, 取地上部植株并称鲜重、切碎混匀后取 400~600 g 样品带回实验室, 在烘箱中 105 °C 杀青, 调温至 70 °C 下烘至恒重, 烘干后将样品全部粉碎、混匀, 经 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮后, 凯氏法进行全氮含量(以质量分数计)的测定。

1.4 卫星通道介绍

卫星遥感获得的多光谱数据对大尺度遥感监测和应用具有重要意义。利用地面实测植被冠层高光谱反射率和卫星波段响应函数来模拟卫星多光谱反射率是借助地面高光谱数据研究卫星遥感的常用方法, 前人研究表明该方法模拟的卫星光谱反射率与卫星实测光谱反射率高度一致^[28-29]。因此, 本研究以国产 GF-2 和欧洲 Sentinel-2A 两个高分辨率卫星为例, 利用地面实测高光谱数据模拟卫星光谱反射率, 进而探究宽波段条件下归一化光谱指数对马铃薯植株氮素含量的定量估测能力。GF-2 卫星搭载 4 个多光谱通道: 蓝光(B) 450~520 nm, 绿光(G) 520~590 nm,

红光(R) 630~690 nm, 近红外(NIR) 770~890 nm。Sentinel-2A 卫星共搭载 13 个多光谱通道, 本研究选择可见光和近红外波段的 5 个通道, 分别为: 蓝光(B) 458~523 nm, 绿光(G) 543~578 nm, 红光(R) 650~680 nm, 红边(RE) 698~712 nm, 近红外(NIR) 785~900 nm。

1.5 卫星宽波段光谱反射率模拟

本研究利用国产 GF-2 和欧洲 Sentinel-2A 卫星波段响应函数, 将地面实测马铃薯冠层高光谱数据重采样为 1 nm, 通过公式(1)模拟多光谱卫星蓝、绿、红、近红外和红边波段光谱反射率^[29]。

$$R = \frac{\sum_{\lambda=\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_{\lambda} R_{\lambda}}{\sum_{\lambda=\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_{\lambda}} \quad (1)$$

式中: R 为模拟宽波段卫星的光谱反射率; λ_{\min} 、 λ_{\max} 为传感器光谱探测的起始和终止波长; S_{λ} 为卫星传感器在波长 λ 处的光谱响应函数值; R_{λ} 为马铃薯冠层光谱在波长 λ 处的反射率。

模拟具有红边通道的 Sentinel-2A 和国产常规通道高分辨率卫星 GF-2 的光谱反射率, 两卫星各波段传感器的光谱响应函数曲线见图 1。

1.6 光谱指数选择与数据分析

本研究以归一化光谱指数方程形式($R_{\lambda_1}-R_{\lambda_2}$)/($R_{\lambda_1}+R_{\lambda_2}$)和地面实测马铃薯冠层高光谱反射率为基础, 通过波段优化方法对比了 400~900 nm 范围内, 不同波段组合计算的光谱指数与马铃薯植株氮素含量的拟合决定系数 R^2 , 并根据 R^2 大小提取了马铃薯植株氮素含量的中心敏感波段, 并以就近原则为依据匹配 GF-2 和 Sentinel-2A 卫星的敏感通道, 并计算通道筛选后的多光谱指数, 利用比值指数组合的方法构建新的组合光谱指数, 从而进一步提高宽波段光谱指数的估测精度。此外, 以高光谱窄波段为依据, 进一步分析了卫星波段范围内不同窄波段组合计算的组合光谱指数与马铃薯植株氮素含量相关性 R^2 的分布变化, 探究了波段宽度对马铃薯植株氮素含量估测的影响。本研究用到的光谱指数见表 1。

2 结果

2.1 基于波段优化选择的马铃薯植株氮素含量敏感波段提取

为寻找不同波段组合的优化归一化光谱指数 NDSI($NDSI=(R_{\lambda_2}-R_{\lambda_1})/(R_{\lambda_2}+R_{\lambda_1})$)与马铃薯植株氮素含量的敏感波段, 本研究通过组合不同波段提取了多个对马铃薯植株氮素含量敏感的中心波段(表 2)。由图 2 可以看出不同波段组合的 NDSI 光谱指数与马铃薯

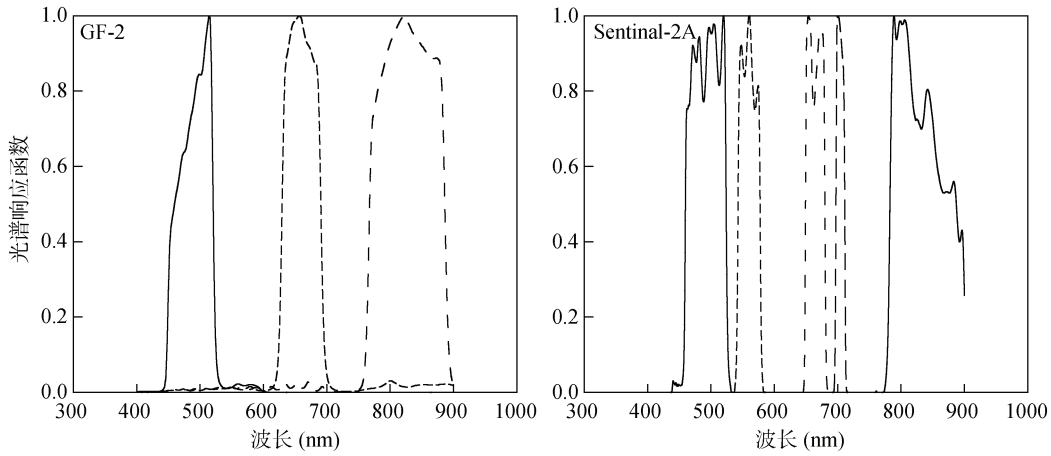


图 1 GF-2 和 Sentinel-2A 卫星在 400 ~ 900 nm 波段搭载光谱相机通道的波段响应函数
Fig.1 Spectral response functions of GF-2 and Sentinel-2A in different channels from 400 - 900 nm

表 1 本研究应用的光谱指数
Table 1 Spectral indices applied in this study

光谱指数	波段组合方式	文献
传统归一化光谱指数(NDVI)	$(NIR-R)/(NIR+R)$	[30]
绿光归一化光谱指数(GNDVI)	$(NIR-G)/(NIR+G)$	[31]
红边归一化光谱指数(NDRE)	$(NIR-RE)/(NIR+RE)$	[32]
融合光谱指数(NDRE/NDVI)	$((NIR-RE)/(NIR+RE))/((NIR-R)/(NIR+R))$	[33]
优化光谱指数 1(GBNSI)	$(G-B)/(G+B)$	本研究
优化光谱指数 2(RBNSI)	$(R-B)/(R+B)$	本研究
优化光谱指数 3(REBNSI)	$(RE-B)/(RE+B)$	本研究
优化光谱指数 4(GBNSI/NDVI)	$((G-B)/(G+B))/((NIR-R)/(NIR+R))$	本研究
优化光谱指数 5(GBNSI/GNDVI)	$((G-B)/(G+B))/((NIR-G)/(NIR+G))$	本研究
优化光谱指数 6(REBNSI/NDVI)	$((RE-B)/(RE+B))/((NIR-R)/(NIR+R))$	本研究
优化光谱指数 7(REBNSI/GNDVI)	$((RE-B)/(RE+B))/((NIR-G)/(NIR+G))$	本研究

植株氮素含量的相关性具有显著差异，蓝光(B)、绿光(G)、红光(R)和近红外(NIR)波段均存在敏感波段，其中最佳波段组合为 492、494 nm 和 434、698 nm，决定系数 R^2 均为 0.62。然而卫星通道的波段宽，相近的 R_{11} 和 R_{12} 波段组合并不适合卫星通道的应用，而差距较大的波段组合具备更好的卫星遥感诊断潜力。因此，通过对图 2 进一步分析，初步筛选了具有应用潜力的卫星通道组合，GF-2 卫星为 B 和 R、B 和 G 通道组合；Sentinel-2A 卫星为 RE(红边)和 B、G 和 B，以及 R 和 B 通道组合。将筛选的具备潜力的卫星通道与模拟的卫星光谱反射率数据相结合，计算通道优化光谱指数 GBNSI、RBNSI 和 REBNSI，进而用于探究卫星遥感估测马铃薯植株含量的能力。

2.2 基于通道优化的多光谱指数马铃薯植株氮素含量估测

光谱指数是植株长势及氮素营养诊断的重要参

数，而卫星是将这一参数由田块尺度提升到区域尺度的重要方式。根据中心敏感波段筛选的卫星通道组合以及模拟的卫星光谱反射率数据计算的归一化光谱指数可以看出，由红边(RE)通道参与计算的传统多光谱指数 S-NDRE(“S-”表示以 Sentinel-2A 卫星光谱数据为基础，类似的“GF-”表示以 GF-2 卫星光谱

表 2 基于窄波段的马铃薯植株氮素含量中心敏感波段的提取

Table 2 Selection of center sensitive bands of nitrogen concentration of potato plants

序号	R_{11} (nm)	R_{12} (nm)	R^2
1	434	698	0.62
2	492	494	0.62
3	432	588	0.61
4	472	620	0.58
5	668	672	0.55
6	886	876	0.46
7	816	818	0.53

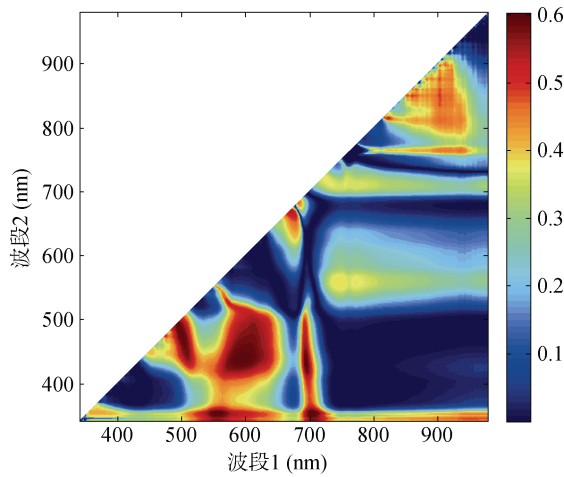


图 2 基于波段优化算法的 NDSI 光谱指数与马铃薯植株氮含量的决定系数(R^2)

Fig. 2 Determination coefficient (R^2) distribution of normalized spectral index NDSI with nitrogen concentration in potato plants

数据为基础,下同)和 RE 与 B 通道相结合的通道优化光谱指数 S-REBNDISI 与马铃薯植株氮含量具有明显的线性拟合趋势(图 3 A、3F), R^2 分别为 0.33 和 0.37, 表现出了红边通道的优势。但基于 NIR 和 G 通道组合的 GNDVI 具有相似的效果, GF-GNDVI 和 S-GNDVI 与马铃薯植株氮含量的线性拟合决定系数 R^2 分别为 0.32(图 4D)和 0.35(图 3E)。表现最佳的是基于敏感波段筛选的由 G 和 B 通道计算得到的通道优化多光谱指数 GBNDISI, GF-GBNDISI 和 S-

GBNDISI 与马铃薯植株氮含量的线性拟合决定系数 R^2 分别为 0.41(图 4A)和 0.38(图 3C)。而 R 与 B 通道组合虽然在窄波段中表现出不错的效果, R^2 可以达到 0.58(表 2), 但卫星宽波段条件下, R 与 B 通道组合计算的 RBNDISI 对马铃薯植株氮含量的解释能力显著低于 GBNDISI, 并且与传统的 NDVI 光谱指数相似, 均存在植株氮含量较高时光谱指数发生明显的“饱和”现象(图 3 B、3D; 图 4 B、4C)。

虽然红边(RE)通道在估测马铃薯植株氮含量上有优势, 但是大多数卫星并不具备红边通道, 尤其是国产 GF 系列卫星。而 B 与 G 通道是卫星搭载的常规通道, 且通道优化的 GBNDISI 具有估测的潜力(图 3 C; 图 4 A), 但是对于马铃薯植株氮含量的定量遥感, 其精度还有待进一步提高。

2.3 基于指数比值组合应用的山铃薯植株氮含量估测

对于许多高分辨率卫星, RE 通道并不常见, 尤其是国产卫星, 这些通道的缺乏对于植被氮养分定量监测具有重要影响。为了实现归一化指数在卫星上的普适性, 提高基于常规 B、G、R 和 NIR 通道的马铃薯植株养分定量监测能力, 本文对 GBNDISI 指数进行了改进, 通过比值计算将 NDVI 和 GNDVI 分别与 GBNDISI 进行组合应用, 提出了新的组合光谱指数 GBNDISI/NDVI 和 GBNDISI/GNDVI。从图 5 可以

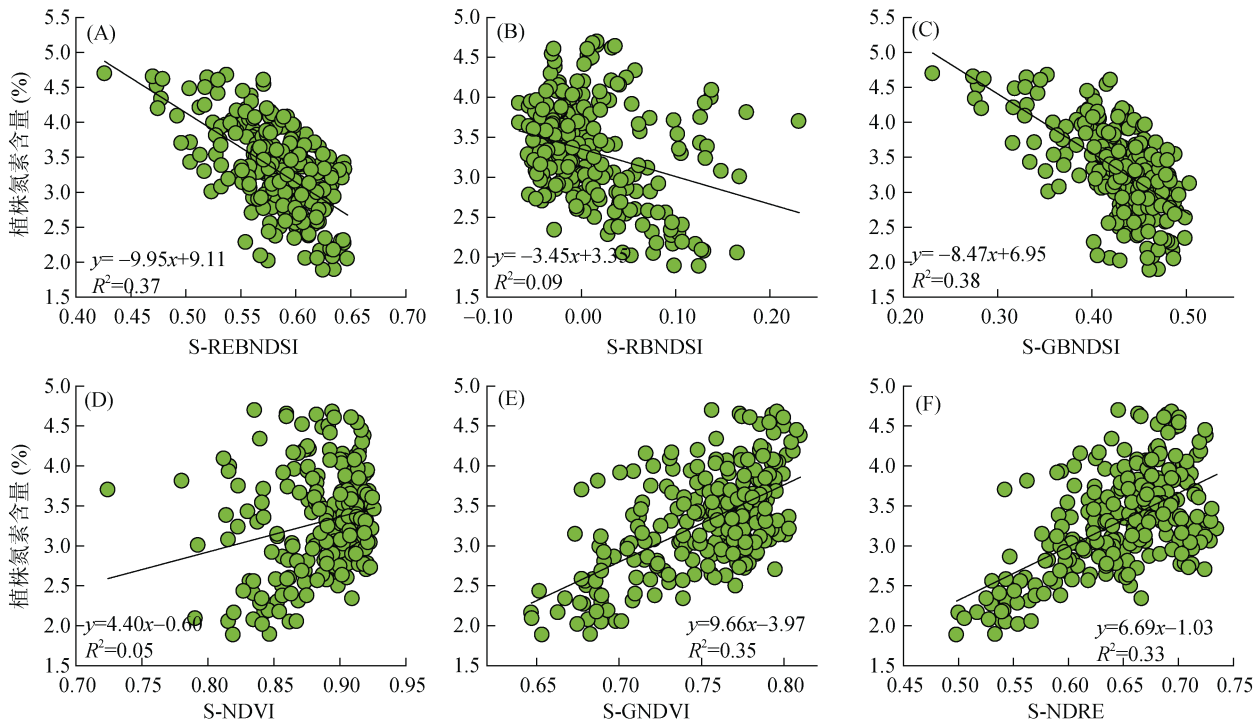


图 3 基于 Sentinel-2A 波段的山铃薯植株氮含量估测模型

Fig. 3 Relationship between REBNDISI (A), RBNDISI (B), GBNDISI(C), NDVI (D), GNDVI (E) and NDRE (F) based on Sentinel-2A satellite bands and plant nitrogen concentration

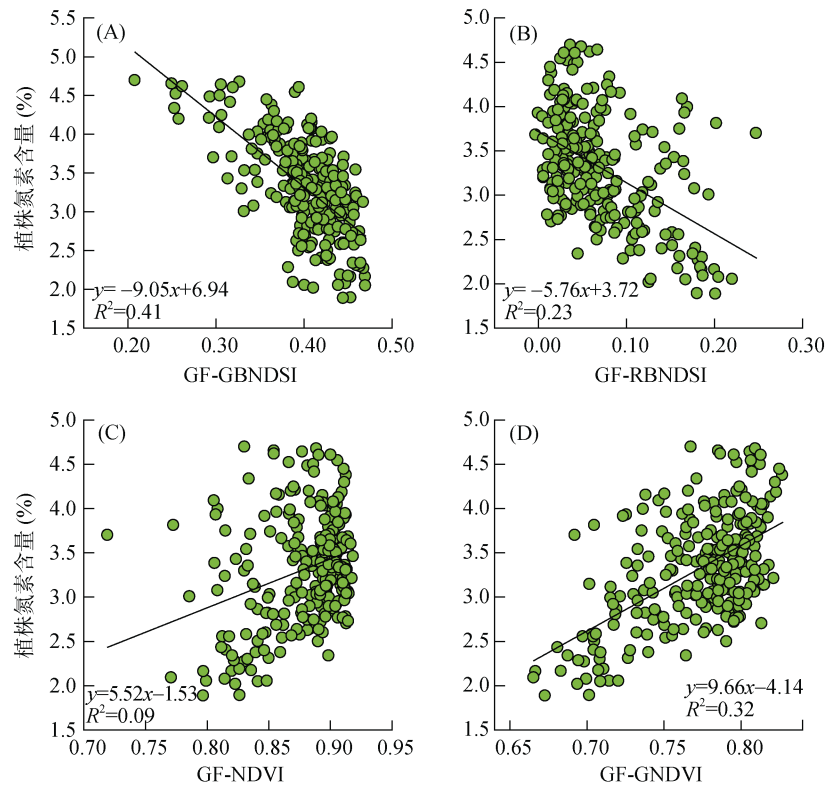


图 4 基于 GF-2 波段的马铃薯植株氮素含量估测模型

Fig. 4 Relationship between GBNDSI (A), RBNDSI (B), NDVI (C) and GNDVI (D) based on GF-2 satellite bands and plant nitrogen concentration

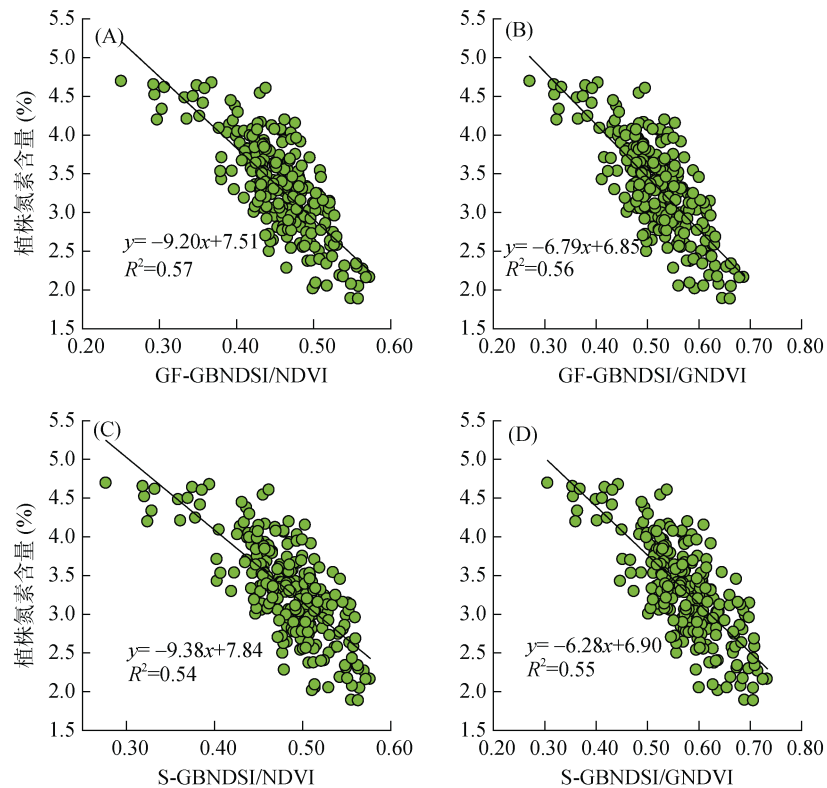


图 5 GBNDSI/NDVI 和 GBNDSI/GNDVI 与马铃薯植株氮素含量的估测模型

Fig. 5 Relationship between GBNDSI/NDVI and GBNDSI/GNDVI based on GF-2 and Sentinel-2A satellite bands and plant nitrogen concentration

看出, 新提出的组合光谱指数 GBNDVI/NDVI 和 GBNDVI/GNDVI 与马铃薯植株氮素含量的相关性得到明显提升。当 GBNDVI 与 NDVI 进行组合时, GF-GBNDVI/NDVI 与马铃薯植株氮素含量的线性拟合决定系数 R^2 从 0.41 增加到 0.57, S-GBNDVI/NDVI 与马铃薯植株氮素含量的线性拟合决定系数 R^2 从 0.38 增加到 0.54。与 GBNDVI 相比, GBNDVI/NDVI 组合光谱指数将卫星对马铃薯植株氮素含量的解释能力提高了 16%。当 GBNDVI 与 GNDVI 进行组合时, GF-GBNDVI/GNDVI 与马铃薯植株氮素含量的线性拟合决定系数 R^2 从 0.41 增加到 0.56, S-GBNDVI/GNDVI 与马铃薯植株氮素含量的线性拟合决定系数 R^2 从 0.38 增加到 0.55。与 GBNDVI 相比, GBNDVI/GNDVI 组合光谱指数将卫星对马铃薯植株氮素含量的解释能力提高了 15%~17%。因此, 改进的组合光谱指数 GBNDVI/NDVI 和 GBNDVI/GNDVI 显著提高了多光谱指数对马铃薯植株氮素含量的估测能力, 对

于利用卫星常规通道来实现马铃薯植株氮素含量估测具有重要意义。

2.4 多光谱指数估测模型的适用性

生育时期、年际、地点以及氮肥用量的变化会影响光谱指数估测模型的适用能力, 为探究生育时期、年际、地点以及氮肥用量对多光谱指数马铃薯植株氮素含量估测模型的影响, 针对不同多光谱指数进一步分析了其与马铃薯植株氮素含量的拟合决定系数 (R^2) (表 3 和表 4)。结果表明, 生育时期、年际、地点以及氮肥用量都会影响多光谱指数对马铃薯植株氮素含量的估测能力, 特别是生育时期和年际变化的影响较大。但新组合光谱指数 GBNDVI/NDVI 和 GBNDVI/GNDVI 在一定程度上降低了年际、地点和施氮量对估测模型的影响。而且相对于其他多光谱指数, 新组合的光谱指数 GBNDVI/NDVI 和 GBNDVI/GNDVI 对包括生育时期、年际、地点和施氮量变化的融合数据集具有更好的解释能力。

表 3 基于 GF-2 卫星的多光谱指数估测模型适用性分析
Table 3 Applicability analysis of multi-spectral indices estimation models based on GF-2 satellite

影响因素		GF-NDVI	GF-GNDVI	GF-RBNDVI	GF-GBNDVI	GF-GBNDVI/NDVI	GF-GBNDVI/GNDVI
生育时期	块茎形成期	0.01	0.10	0.06	0.22	0.33	0.30
	块茎膨大期	0.13	0.15	0.08	0.01	0.05	0.06
	淀粉积累期	0.57	0.53	0.60	0.01	0.37	0.36
年际	2014	0.00	0.33	0.29	0.62	0.69	0.71
	2015	0.19	0.45	0.34	0.24	0.55	0.54
	2016	0.12	0.19	0.16	0.30	0.33	0.33
地点	武川县	0.13	0.41	0.32	0.41	0.59	0.60
	四子王旗	0.12	0.19	0.16	0.30	0.33	0.33
施肥量 (kg/hm ²)	0~100	0.20	0.48	0.32	0.54	0.70	0.69
	100~200	0.01	0.19	0.16	0.45	0.56	0.56
	>200	0.10	0.27	0.17	0.26	0.43	0.42
综合		0.09	0.32	0.23	0.41	0.57	0.56

表 4 基于 Sentinel-2A 卫星的多光谱指数估测模型适用性分析
Table 4 Applicability analysis of multi-spectral indices estimation models based on Sentinel-2A satellite

影响因素		S-NDVI	S-GNDVI	S-NDRE	S-RBNDVI	S-REBNDVI	S-GBNDVI	S-GBNDVI/GNDVI	S-GBNDVI/NDVI
生育时期	块茎形成期	0.01	0.12	0.09	0.01	0.17	0.20	0.28	0.30
	块茎膨大期	0.12	0.16	0.08	0.07	0.00	0.02	0.09	0.07
	淀粉积累期	0.54	0.48	0.52	0.56	0.07	0.03	0.19	0.15
年际	2014	0.01	0.40	0.47	0.02	0.66	0.60	0.70	0.67
	2015	0.12	0.46	0.54	0.16	0.33	0.19	0.51	0.49
	2016	0.11	0.22	0.10	0.14	0.06	0.34	0.36	0.38
地点	武川县	0.08	0.43	0.53	0.13	0.43	0.37	0.59	0.56
	四子王旗	0.11	0.22	0.10	0.14	0.06	0.34	0.36	0.38
施肥量 (kg/hm ²)	0~100	0.13	0.50	0.50	0.14	0.58	0.50	0.67	0.68
	100~200	0.00	0.23	0.20	0.04	0.37	0.42	0.54	0.53
	>200	0.07	0.28	0.27	0.06	0.22	0.22	0.41	0.40
综合		0.05	0.35	0.33	0.09	0.37	0.38	0.55	0.54

2.5 基于 GBNSDI/NDVI 和 GBNSDI/GNDVI 光谱指数的马铃薯植株氮素含量估测模型的验证

利用独立的数据集对构建的估测模型进行验证是证明模型适用性和估测能力的重要内容。本文采用平均相对误差(mean relative error, MRE)和均方根误差(root mean square error, RMSE)来评价模型在应用过程中的估测精度, MRE 和 RMSE 越小, 说明估测

精度越高。从图 6 可以看出, 与 GBNSDI 相比, 改进的组合光谱指数 GBNSDI/NDVI 和 GBNSDI/GNDVI 估测模型的估测值与实测值离散度小, 紧密分布在 1:1 线周围, 验证精度明显提高。其中表现最佳的是组合光谱指数 GBNSDI/NDVI, GF-2 和 Sentinel-2A 卫星估测模型验证的 MRE 分别为 10.06% 和 10.48%, RMSE 分别为 0.39% 和 0.40%。

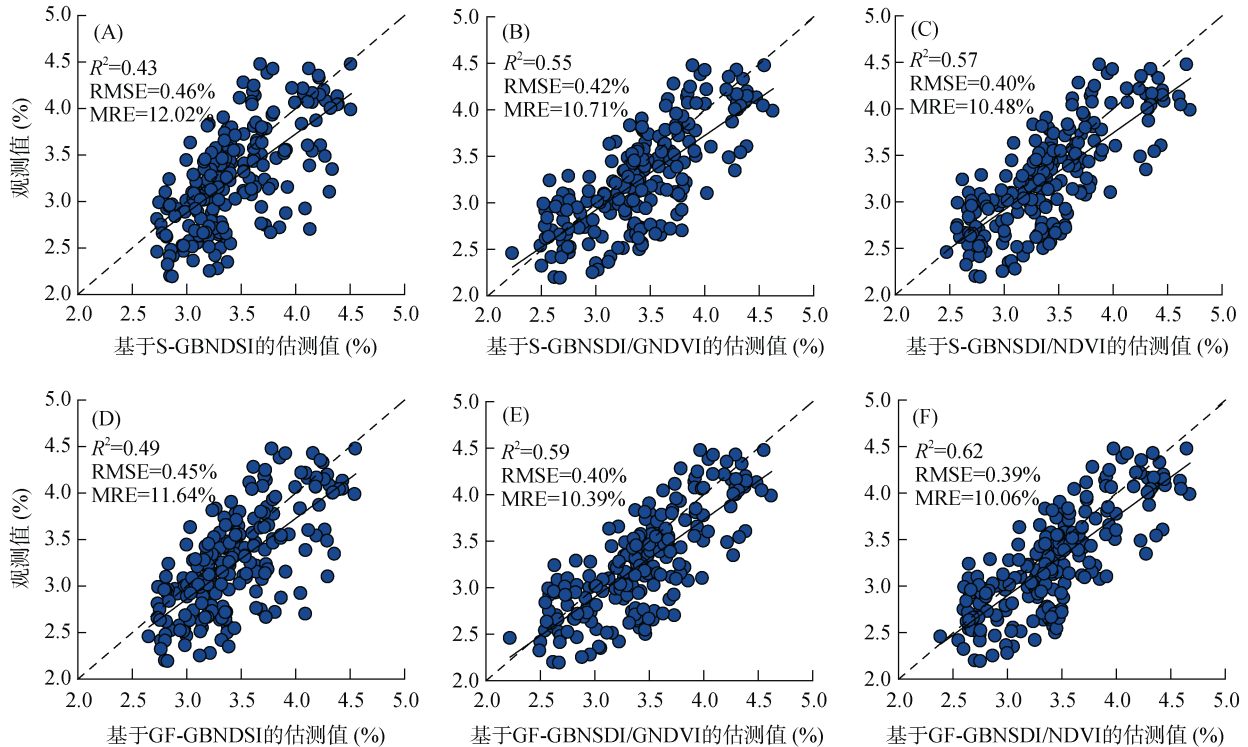


图 6 基于多光谱指数的马铃薯植株氮素含量估测模型的验证

Fig. 6 Validation of models for estimating nitrogen concentration of potato plants based on combined spectral indices

3 讨论

众所周知, 卫星通道在设计时具有一定的波段宽度, 而地面高光谱数据可以同时获取几十甚至几百个光谱波段, 丰富的信息量使其具备精确估算作物氮素营养指标的能力^[9-10]。而高光谱波段能够准确提取光谱指数的敏感波段, 波段优化选择的光谱指数对于提高估测能力具有显著效果^[34]。以中心敏感波段为依据能够快速筛选指定光谱指数所需的卫星通道, 不仅省去最佳卫星通道筛选的很多步骤, 而且提高了多光谱指数的估测能力, 这对于指导卫星在马铃薯植株氮素含量估测应用上具有重要价值^[35]。但是窄波段光谱数据优化结果显示, GBNSDI 和 RBNSDI 与马铃薯植株氮素含量的相关性差异不大, 线性拟合的 R^2 分别为 0.61 和 0.58 (表 2), 而模拟卫星宽波段计算结果表明 GBNSDI 与 RBNSDI 具有明显的差异(图 3 B、

3C, 图 4 A、4B)。通过对卫星通道宽度内不同高光谱波段组合优化光谱指数与马铃薯植株氮素含量的相关性分析可以看出, 马铃薯植株氮素含量仅在一定波段宽度内较为敏感(图 7), 而卫星通道较大的波段宽度在很大程度上影响了光谱指数的敏感性。卫星通道设计的固有宽度影响了多光谱指数的敏感性, 因此卫星通道的选择、通道宽度与估测指标敏感波段范围的相似性都会影响多光谱对指标的估测能力。

基于红光通道参与计算的多光谱指数 RBNSDI 和 NDVI 对马铃薯植株氮素含量的估测效果明显低于 GBNSDI(图 3 B、3C, 图 4 A、4B), 这与前人的研究结果一致^[16,19-21]。而且多光谱指数 NDVI 和 RBNSDI 在马铃薯植株氮素含量较高时, 存在明显的光谱指数“饱和”现象(图 3 B、3D; 图 4 B、4C)。植株氮素含量随着生育时期的推进逐渐降低, “饱和”现象也随之减弱。光谱指数是几个不同波段光谱反射

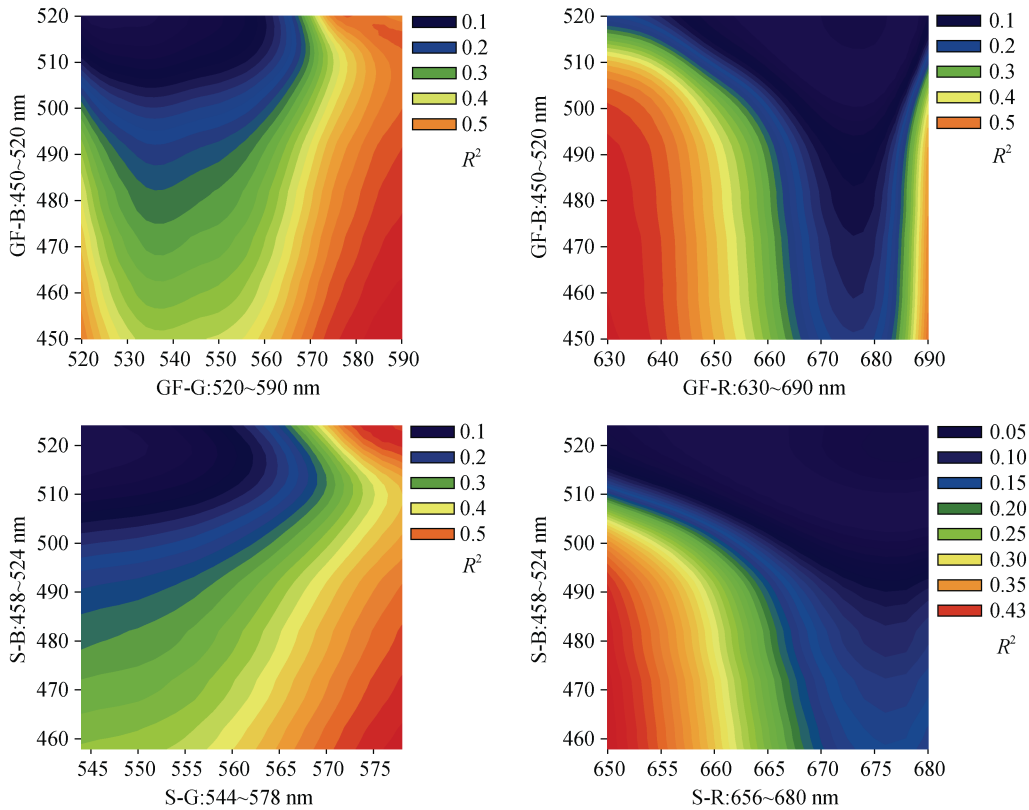


图 7 基于高光谱数据分析的马铃薯植株氮素含量敏感波段变化 (波段范围来源于 GF-2 和 Sentinel-2A 卫星对应的通道宽度)

Fig. 7 Sensitive band changes of plant nitrogen concentration of potato based on hyperspectral data (different band ranges were derived from channel widths corresponding to GF-2 and Sentinel-2A satellites)

率通过特定的方程计算得到的光谱参数,其目的是提高对估测指标的响应,降低非估测因素的干扰^[36]。本研究通过波段优化选择方法提取马铃薯植株氮素含量的敏感波段,并筛选最佳通道计算归一化多光谱指数。在通道优化的基础上通过指数组合方法改进的光谱指数 GBNDISI/NDVI 和 GBNDISI/GNDVI 显著提高了多光谱指数对马铃薯植株氮素含量的解释能力(图 5),这说明不同光谱指数和指数波段的选择对指

标估测能力有显著影响。Groten^[27]及 Verrelst 等^[37]特别指出,指数波段选择和不同光谱指数在一定程度上决定了光谱指数的敏感性。

红边对于作物生理指标定量遥感的重要性已经在很多作物中得到证实^[16-17,18-20],马铃薯植株氮素含量诊断同样表现出红边优势(图 8)。但是对于大多数中分辨率卫星,红边通道往往是缺失的,而蓝、绿、红和近红外光波段是最为普遍的搭载通道。本研究以

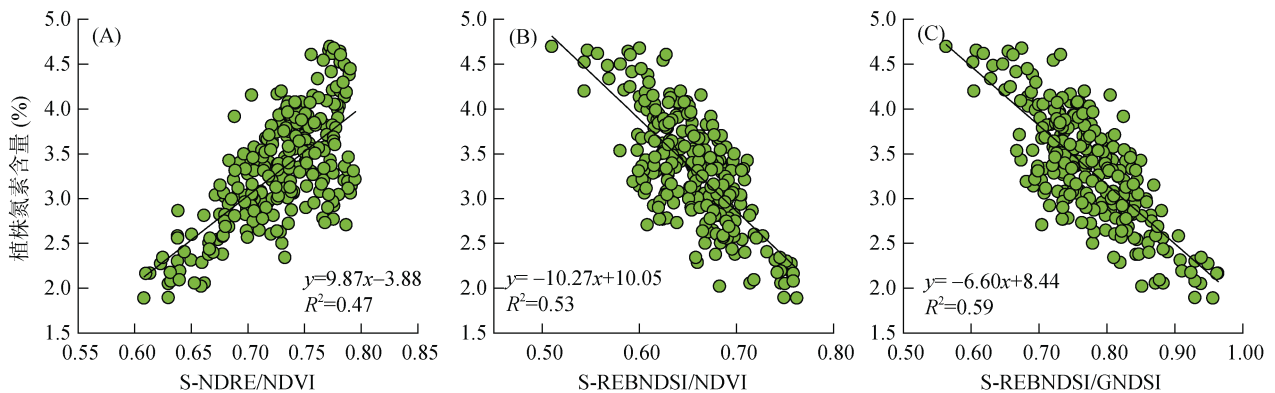


图 8 基于红边通道的组合多光谱指数与马铃薯植株氮素含量的估测模型

Fig. 8 Relationship between S-NDRE/NDVI, S-REBNDISI/NDVI and S-REBNDISI/GNDVI and plant nitrogen concentration

最为常规绿光、蓝光、红光和近红外(NIR)通道为基础,通过波段优化选择方法和指数组合方法提出了新的多光谱指数 GBNSDI/NDVI 和 GBNSDI/GNDVI。新提出的多光谱指数在马铃薯植株氮素含量估测上性能优于传统的 NDRE 和 NDRE/NDVI 光谱指数(图 5、图 3 F、图 8 A),与优化的 REBNSDI/NDVI 和 REBNSDI/GNDVI 估测能力基本相当(图 5、图 8 B、8C),但是 GBNSDI/NDVI 和 GBNSDI/GNDVI 克服

了目前大多数中高分辨率卫星,尤其是国产 GF 卫星缺少红边通道的劣势,提高了利用常规通道估测马铃薯植株氮素含量的能力。而且,红边波段范围较窄,而蓝绿光敏感波段宽度明显宽于红边(图 9),这为卫星通道应用提供了更大的价值。因此无论是从波段宽度还是卫星通道适用性上来说,GBNSDI/NDVI 和 GBNSDI/GNDVI 在马铃薯植株氮素含量估测上都更具有普适性。

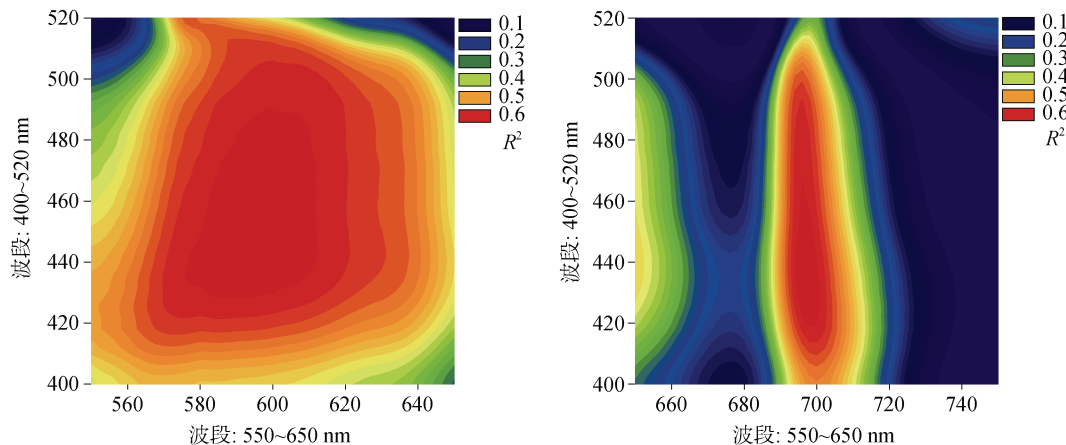


图 9 基于高光谱数据的蓝绿光和红边敏感波段宽度对比(蓝绿光和红边波段范围来源于 Sentinel-2A 卫星通道宽度)
Fig. 9 Comparison of blue-green and red-edge sensitive band widths based on hyperspectral data (band widths of blue-green light and red-edge were originated from channel width of Sentinel-2A satellite)

4 结论

基于高光谱数据,有助于卫星遥感敏感通道的准确筛选,然而特定反演指标的敏感波段宽度范围大小在一定程度上决定了卫星通道的潜在应用价值。通过模拟卫星常规绿光(G)、蓝光(B)、红光(R)和近红外(NIR)通道改进的组合指数 GBNSDI/NDVI 和 GBNSDI/GNDVI,能够显著提高马铃薯植株氮素含量的估测能力,达到与红边多光谱指数基本一致的估测效果。其中 GF-GBNSDI/NDVI 和 GF-GBNSDI/GNDVI 与马铃薯植株氮素含量的线性拟合决定系数分别为 0.57 和 0.56;S-GBNSDI/NDVI 和 S-GBNSDI/GNDVI 与马铃薯植株氮素含量的线性拟合决定系数分别为 0.54 和 0.55。因此,考虑到常规通道的普适性以及马铃薯植株氮素含量在蓝绿光波段较宽的敏感性,GBNSDI/NDVI 和 GBNSDI/GNDVI 在卫星遥感马铃薯植株氮素含量估测上更具有应用价值。

参考文献:

- [1] Atzberger C. Advances in remote sensing of agriculture: Context description, existing operational monitoring systems and major information needs[J]. Remote Sensing, 2013, 5(2): 949-981.
- [2] Wu B F, Gommers R, Zhang M, et al. Global crop monitoring: A satellite-based hierarchical approach[J]. Remote Sensing, 2015, 7(4): 3907-3933.
- [3] 曾红伟, 吴炳方, 邹文涛, 等. 灌溉区与雨养区作物长势差异比较分析——以美国内布拉斯加为例[J]. 遥感学报, 2015, 19(4): 560-567.
- [4] Xue J R, Su B F. Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications[J]. Journal of Sensors, 2017, 2017: 1-17.
- [5] Shanmugapriya P, Rathika S, Ramesh T, et al. Applications of remote sensing in agriculture - A review[J]. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 2019, 8(1): 2270-2283.
- [6] 邹文涛, 吴炳方, 张森, 等. 农作物长势综合监测——以印度为例[J]. 遥感学报, 2015, 19(4): 539-549.
- [7] 杨海波, 高兴, 黄绍福, 等. 基于卫星波段的马铃薯植株氮素含量估测[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(9): 2686-2692.
- [8] 李粉玲, 王力, 刘京, 等. 基于高分一号卫星数据的冬小麦叶片 SPAD 值遥感估算[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 273-281.
- [9] Croft H, Chen J M, Zhang Y, et al. Modelling leaf chlorophyll content in broadleaf and needle leaf canopies from ground, CASI, Landsat TM 5 and MERIS reflectance data[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 133: 128-140.

- [10] Haboudane D, Miller J R, Tremblay N, et al. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(2/3): 416–426.
- [11] Huang S Y, Miao Y X, Zhao G M, et al. Satellite remote sensing-based in-season diagnosis of rice nitrogen status in northeast China[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(8): 10646–10667.
- [12] Mulla D J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps[J]. *Biosystems Engineering*, 2013, 114(4): 358–371.
- [13] Beeri O, Phillips R, Carson P, et al. Alternate satellite models for estimation of sugar beet residue nitrogen credit[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, 107(1): 21–35.
- [14] Claverie M, Demarez V, Duchemin B, et al. Maize and sunflower biomass estimation in southwest France using high spatial and temporal resolution remote sensing data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 124: 844–857.
- [15] 唐延林, 黄敬峰, 王人潮, 等. 水稻遥感估产模拟模式比较[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(1): 166–171.
- [16] Prey L, Schmidhalter U. Simulation of satellite reflectance data using high-frequency ground based hyperspectral canopy measurements for in-season estimation of grain yield and grain nitrogen status in winter wheat[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, 149: 176–187.
- [17] Eitel J U H, Long D S, Gessler P E, et al. Using *in situ* measurements to evaluate the new RapidEye™ satellite series for prediction of wheat nitrogen status[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(18): 4183–4190.
- [18] Eitel J U H, Vierling L A, Litvak M E, et al. Broadband, red-edge information from satellites improves early stress detection in a New Mexico conifer woodland[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(12): 3640–3646.
- [19] Asam S, Fabritius H, Klein D, et al. Derivation of leaf area index for grassland within alpine upland using multi-temporal RapidEye data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(23): 8628–8652.
- [20] Kim H O, Yeom J M. Multi-temporal spectral analysis of rice fields in south Korea using MODIS and RapidEye satellite imagery[J]. *Journal of Astronomy and Space Sciences*, 2012, 29(4): 407–411.
- [21] Ramoelo A, Skidmore A K, Cho M A, et al. Regional estimation of savanna grass nitrogen using the red-edge band of the spaceborne RapidEye sensor[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 19: 151–162.
- [22] 焦俊男, 石静, 田庆久, 等. 多光谱影像 NDVI 阴影影响去除模型[J]. *遥感学报*, 2020, 24(1): 53–66.
- [23] 田庆久, 闵祥军. 植被指数研究进展[J]. *地球科学进展*, 1998, 13(4): 327–333.
- [24] 吴炳方. 中国农情遥感速报系统[J]. *遥感学报*, 2004, 8(6): 481–497.
- [25] 吴炳方, 蒙继华, 李强子, 等. “全球农情遥感速报系统 (CropWatch)”新进展[J]. *地球科学进展*, 2010, 25(10): 1013–1022.
- [26] Wu B F, Meng J H, Li Q Z, et al. Remote sensing-based global crop monitoring: Experiences with China’s CropWatch system[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2014, 7(2): 113–137.
- [27] Groten S M E. NDVI—crop monitoring and early yield assessment of Burkina Faso[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(8): 1495–1515.
- [28] Trigg S, Flasse S. Characterizing the spectral-temporal response of burned savannah using *in situ* spectroradiometry and infrared thermometry[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(16): 3161–3168.
- [29] 李粉玲, 常庆瑞, 申健, 等. 基于 GF-1 卫星数据的冬小麦叶片氮含量遥感估算[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(9): 157–164.
- [30] Schell J A. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS[J]. *Nasa Special Publication*, 1973, 351: 309.
- [31] Gitelson A A, Merzlyak M N. Remote sensing of chlorophyll concentration in higher plant leaves[J]. *Advances in Space Research*, 1998, 22(5): 689–692.
- [32] Gitelson A, Merzlyak M N. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation[J]. *Journal of Plant Physiology*, 1994, 143(3): 286–292.
- [33] Fitzgerald G, Rodriguez D, O’Leary G. Measuring and predicting canopy nitrogen nutrition in wheat using a spectral index—The canopy chlorophyll content index (CCCI)[J]. *Field Crops Research*, 2010, 116(3): 318–324.
- [34] Verrelst J, Malenovsky Z, Tol C, et al. Quantifying vegetation biophysical variables from imaging spectroscopy data: A review on retrieval methods[J]. *Surveys in Geophysics*, 2019, 40(3): 589–629.
- [35] Li F, Mistele B, Hu Y C, et al. Optimising three-band spectral indices to assess aerial N concentration, N uptake and aboveground biomass of winter wheat remotely in China and Germany[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, 92: 112–123.
- [36] Glenn E P, Huete A R, Nagler P L, et al. Relationship between remotely-sensed vegetation indices, canopy attributes and plant physiological processes: What vegetation indices can and cannot tell us about the landscape[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2008, 8(4): 2136–2160.
- [37] Verrelst J, Camps-Valls G, Muñoz-Mari J, et al. Optical remote sensing and the retrieval of terrestrial vegetation bio-geophysical properties - A review[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 108: 273–290.