

基于卫星波段的马铃薯植株氮素含量估测

杨海波^{1,2}, 高兴^{1,2}, 黄绍福^{1,2}, 张加康^{1,2}, 杨柳^{1,2}, 李斐^{1,2*}

1. 内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010011

2. 内蒙古农业大学内蒙古自治区土壤质量与养分资源重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010011

摘要 植株氮素浓度是反应作物氮素营养状况的关键指标, 对作物的产量与品质具有重要的影响。作物大面积氮素营养的实时监测不仅对区域上氮肥投入提供决策, 而且还对区域上氮素循环的估算提供依据。传统的地面传感器虽然有较高的精度, 但很难在区域尺度上大面积获取数据, 且目前存在的高光谱卫星影像如 MODIS, Hyperion 的空间分辨率普遍不高。随着卫星遥感的发展, 近些年来高空间分辨率的多通道卫星逐渐发射升空, 这些高分辨率的卫星遥感数据将对大尺度上植被生理生化指标反演提供可能。该研究从 2014 年—2016 年在内蒙古阴山北麓武川县进行了三年不同氮水平的马铃薯田间试验, 借助地面马铃薯冠层高光谱实测数据, 模拟近几年发射的具有红边波段的多通道卫星 WorldView-2 和 VEN μ S 不同宽度波段, 并构建多种光谱指数, 建立光谱指数与马铃薯地上部植株氮素浓度的估测模型, 进行马铃薯关键生育期冠层氮素营养的实时监测。结果表明, 波段宽度和波段位置的选择决定着光谱指数对氮素浓度的响应程度, 基于红边波段的光谱指数具有更高的灵敏性。生育时期显著影响光谱指数对马铃薯地上部氮素浓度的估测能力, 苗期土壤背景对光谱反射率具有显著干扰, 马铃薯块茎形成期后植株氮素浓度的预测效果最佳。基于 WorldView-2 和 VEN μ S 卫星红光、红边和近红外特定波段构成的融合光谱指数 NDRE/NDVI 相对其他指数来说在马铃薯植株氮素浓度估测上更具优势, 与不同生育时期马铃薯植株氮素浓度都具有较高的相关性, 相关系数 r 在 0.63~0.81 之间。其中, 生殖生长期基于 VEN μ S 卫星红光、红边和近红外通道构成的融合光谱指数 VEN μ S-NDRE/NDVI 与马铃薯植株氮素浓度相关性最高 ($r=0.81$), 模型验证结果的决定系数为 0.56, 且验证误差较小, RMSE 和 RE% 分别为 0.38%, 10.45%, 模型估测值与实测值的验证斜率最接近 1, 为 0.82; WorldView-2-NDRE/NDVI 与马铃薯植株氮素浓度也具有较高的相关性 ($r=0.74$), 模型验证结果的决定系数为 0.49, 验证误差 RMSE 和 RE% 分别为 0.41% 和 11.12%, 模型估测值与实测值的验证斜率为 0.78。多通道卫星模拟的结果证明, 基于红边宽波段的融合光谱指数能用来进行马铃薯植株氮浓度的监测。

关键词 马铃薯; 含氮量; 光谱指数

中图分类号: S131

文献标识码: A

DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)09-2686-07

引言

氮素是作物体内含量最高且在生命活动中比较敏感的营养元素, 过量和不足都会影响着作物叶绿素、核酸、蛋白质等物质的合成从而最终影响经济产品的产出及品质的形成。与普通大田作物小麦玉米不同, 马铃薯根系主要集中在 0~40 cm, 若水分管理不当很容易使适量氮肥淋溶到根层以下造成植株的氮素营养缺乏。然而氮肥投入过多又会导致马铃

薯生长营养过剩, 氮肥利用率降低, 施入土壤中多余的氮肥经过一系列转化还会引起地下水和大气污染。因此, 马铃薯种植过程中氮肥管理尤为重要^[1-2]。为了使农业生产中管理好氮肥防止不必要的投入浪费和环境风险, 发达国家于 20 世纪 80 年代中期就提出了以精确氮肥管理为重要内容的精确农业, 而精确的氮素营养管理是以实时监测作物地上部长势及其氮素营养状况为重要前提, 经典的氮素营养诊断方法虽然测定精度高, 但费时费力, 对田间指导有一定的滞后性^[3-4]。

收稿日期: 2018-08-22, **修订日期**: 2018-12-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41361079), 公益性行业(农业)科研专项项目(201503106), 内蒙古自治区高等院校创新能力提升与人才团队建设专项资金项目(NJYT-18-A08)资助

作者简介: 杨海波, 1993 年生, 内蒙古农业大学草原与资源环境学院硕士研究生 e-mail: hbyang93@163.com

* 通讯联系人 e-mail: feili72@163.com

多年来为了实现氮素无损监测,借助遥感技术对氮素营养的快速实时诊断一直是农业应用的研究热点。基于非成像高光谱技术的作物氮素快速、精确、无损检测研究已经得到长足发展,利用高光谱反射率以及其衍生出来的光谱指数对氮素的无损监测已成功实现并应用在多种作物上^[5-7],其中以绿光、蓝光和红光波段组成的光谱指数对水稻植株氮含量比较敏感^[8],表现出了对高氮素营养的响应强度。算法影响指数对氮素指标的估测能力,基于高光谱的冬小麦氮素营养指数估测研究指出,线性内插法红边位置、修正红边单比指数、比值指数等对氮素营养指标具有很好的估测表现,以线性内插法红边位置相关性最高($r=0.93$)^[9];李丹等借助优化波段构成的光谱指数 $R_{766}/R_{738}-1$,很好的估测了玉米小麦冠层氮素含量^[10],证明了波段优化指数对不同作物的普适性。

高光谱数据因其丰富的信息量,具备精确估算作物氮素含量、叶绿素等生理生化指标的潜力,但是基于地面的传感器很难在区域尺度上大面积获取数据,而目前存在的高光谱卫星影像如 MODIS、Hyperion 的空间分辨率普遍不高。随着卫星遥感的发展,近些年来高空间分辨率的多通道卫星逐渐发射升空,这些高分辨率的卫星遥感数据将对大尺度上植被生理生化指标反演有决定性意义^[11-12]。基于 SPOT-5 卫星影像分析的冬小麦拔节期生物量及氮累积量监测结果表明卫星影像数据能够估测小麦生物量及氮累积量^[13]。而且模拟 GF-1 卫星光谱反射率,不仅建立了冬小麦叶片氮含量诊断模型,还证明了卫星实测光谱反射率与模拟卫星宽波段光谱反射率具有很高的相似度,模拟宽波段卫星光谱反射率具有可适用性^[14]。因此本文借助地面高光谱仪实测马铃薯冠层高光谱数据,模拟具红边波段的多通道高分辨率卫星 WorldView-2 和 VEN μ S 波段构建多种光谱指数,建立光谱指数与地上部氮素浓度的估测模型,为进一步探究卫星宽波段光谱大尺度估测作物氮素营养诊断提供理论与实践基础。

1 实验部分

1.1 试验设计

不同氮水平的滴灌马铃薯田间试验于 2014 年—2016 年在内蒙古阴山北麓武川县进行,共三试验,每个小区面积

70~150 m²,设四次重复。试验 1 共设置四个氮水平,分别为 0, 135, 180, 250 kg·N·ha⁻¹;试验 2 共设置四个氮水平,分别为 0, 90, 180, 270 kg·N·ha⁻¹;试验 3 设置三个氮水平,分别为不施氮肥,优化施氮 160 kg·N·ha⁻¹,农民常规施氮 320 kg·N·ha⁻¹。磷钾肥的施用是基于土壤测试作为底肥一次性施入。

1.2 光谱数据的采集

马铃薯冠层光谱反射率数据的获取是利用德国生产的被动高光谱仪(tec5, oberursel),该仪器的光谱波长范围为 300~1 150 nm,波段宽度为 2 nm。于上午 10:00 至下午 14:00 之间,选择晴朗无风或微风天气,光谱仪探头距马铃薯冠层高度为 50~80 cm,随机选取两段代表性植株各 4~6 m,采集冠层光谱反射率数据,并存储在配套的电脑中。

1.3 农学参数的测定

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,取地上部植株和地下块茎分别称鲜重、切碎混匀后取 400~600 g 亚样品带回实验室,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,凯氏法进行全氮的测定。

1.4 数据预处理

Worldview-2 卫星选用波段通道为 G: 510~580 nm, R: 630~690 nm, RE: 705~745 nm, NIR: 770~896 nm; VEN μ S 卫星选用波段通道为 G: 535~575 nm, R: 652~682 nm, RE1: 688~716 nm, RE2: 734~750 nm, NIR: 774~790 nm。采用卫星通道波段宽度,借助地面实测马铃薯冠层高光谱数据对卫星光谱反射率进行如下模拟

$$R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i$$

式中: R 是模拟卫星波段光谱反射率值,为对应波段 n 个样本光谱反射率的平均值, R_i 为第 i 个样本的光谱反射率值。

利用模拟卫星光谱反射率计算各种已发表光谱指数,并将 75% 数据用于模型的构建,25% 用于对模型进行检验。从中选取相关性较大,且达到 0.01 显著水平的指数用于马铃薯地上部植株氮素浓度估测模型的建立与验证,具体光谱指数的选择见表 1。

表 1 本研究选取的光谱指数

Table 1 Spectral indices used in this study

Vegetation index	Definition	Reference
Normalized difference vegetation index (NDVI)	$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$	Rouse et al. (1974)
Soil Adjusted Vegetation Index(MSAVI)	$(2NIR + 1 - \sqrt{4(NIR + 1)^2 - 8(NIR - R)}) / 2$	Qi et al. (1994)
Green Normalized difference vegetation index (GNDVI)	$GNDVI = (NIR - G) / (NIR + G)$	Gitelson et al. (1996)
Normalized difference red edge index (NDRE)	$NDRE = (NIR - RE) / (NIR + RE)$	Barnes et al. (2000)
Red edge chlorophyll index (CIred edge)	$CIred\ edge = NIR / RE - 1$	Gitelson et al. (2005)
CIred-edge/MSAVI		Wu et al. (2008)
NDRE/NDVI		Fitzgerald et al. (2010)
NDRE/GNDVI		Fitzgerald et al. (2010)
CIred-edge/NDVI		Li et al. (2012)
CIred-edge/GNDVI		Li et al. (2012)

2 结果与讨论

2.1 光谱指数与马铃薯植株氮素浓度的关系

马铃薯全生育期地上部植株氮素浓度变化范围在 1.56%~5.51% 之间, 平均 3.43%, 变异系数为 21.71%, 具有较大的变异性(表 2)。马铃薯植株在生长过程中冠层结构的变化显著影响着光谱指数与植株氮素浓度的响应关系。从表 3 数据可以看到, 生育时期对光谱指数与氮素浓度的相关性有重要影响, 大部分指数全生育期和营养生长期与植株氮素浓度的相关性很差, 而在生殖生长期相关性显著提高。在模拟 WorldView-2 卫星通道下, CI_{re-edge1} 与营养生长期马铃薯植株氮素浓度的相关系数为 -0.27, 全生育时期为 0.34, 而生殖生长期大幅度提高到 0.76。同样的表现还出现在 GNDVI 和 NDRE 等指数上, 且两卫星波段下具有相同变化。Wordview-2 和 VEN_{μS} 都是高分辨率卫星, 但其通道的波段宽度和位置不同, 构建的光谱指数与马铃薯植株氮素浓度的相关性也不同。在马铃薯生殖生长期, 同样是 NDVI 与植株氮素浓度的相关系数, Wordview2-NDVI 为 0.48, VEN_{μS}-NDVI 为 0.42。而且同样模拟 VEN_{μS} 卫星两个红边通道, 马铃薯生殖生长期 NDRE1 和 NDRE2 与植株氮素浓度的相关性差别显著, 分别为 0.75 和 0.60; CI_{re-edge1} 和 CI_{re-edge2} 与植株氮素浓度的相关性分别为 0.75 和 0.59。因此红边位置和波段宽度的选择显著影响光谱指数与植株氮素浓度的关系, 说明波段选择的重要性。

表 2 不同生育时期马铃薯植株氮浓度描述

Table 2 Descriptive statistics of plant N concentration in different growth periods of potato

Growth period	n	Plant N concentration/%			
		Range	Mean	SD	CV/%
Vegetative period	124	1.86~5.51	3.77	0.84	22.25
Reproductive period	299	1.56~4.64	3.29	0.65	19.86
All	423	1.56~5.51	3.43	0.74	21.71

马铃薯冠层光谱数据含有丰富的信息量, 不同的光谱指数在对马铃薯植株氮素浓度信息的表现能力上不同。在马铃薯生殖生长期, VEN_{μS} 波段通道下的 NDVI 和 NDRE1 光谱指数与马铃薯植株氮素浓度的相关性分别为 0.42 和 0.75, 但当两指数相互组合后, NDRE1/NDVI 指数与马铃薯植株氮素浓度的相关系数明显提高到 0.81。并且光谱指数在马铃薯全生育时期对植株氮素浓度的响应上, 基于红边波段组合的融合光谱指数与马铃薯植株氮素浓度的相关性普遍高于单一的红边指数, 尤其是 NDRE1/NDVI 光谱指数。其中, Wordview-2 卫星通道下的 NDVI 和 NDRE1 与马铃薯植株氮素浓度的相关性分别为 -0.18 和 0.34, 而 NDRE1/NDVI 与马铃薯植株氮素浓度的相关性为 0.72。同样在 VEN_{μS} 卫星波段通道下, NDRE1/NDVI 与马铃薯植株氮素浓度的相关性为 0.74, 与单一的红边指数相比显著提高 0.41 左右(表 3)。因此融合光谱指数 NDRE1/NDVI 在马铃薯植株氮素浓度的估测上更具普适性。

表 3 光谱指数与马铃薯植株氮素浓度的相关系数

Table 3 Correlation coefficients for the relationships between spectral indices and plant N concentration

Spectral index	Wordview-2			VEN _{μS}		
	Vegetative period	Reproductive period	All	Vegetative period	Reproductive period	All
NDVI	-0.49**	0.48**	-0.18**	-0.50**	0.42**	-0.22**
NDRE1	-0.27**	0.76**	0.34**	-0.37**	0.75**	0.23**
NDRE2	—	—	—	-0.31**	0.60**	0.27**
GNDVI	-0.41**	0.67**	0.14**	-0.38**	0.72**	0.24**
CI _{re-edge1}	-0.27**	0.76**	0.34**	-0.34**	0.75**	0.28**
CI _{re-edge2}	—	—	—	-0.31**	0.59**	0.27**
MSAVI(Qi2)	-0.49**	0.47**	-0.20**	-0.51**	0.42**	-0.24**
CI _{re-edge1} /MSAVIQ	-0.02	0.77**	0.51**	-0.30**	0.77**	0.34**
NDRE1/NDVI	0.63**	0.74**	0.72**	0.68**	0.81**	0.74**
NDRE2/NDVI	—	—	—	0.44**	0.53**	0.51**
NDRE1/GNDVI	0.10	0.69**	0.49**	-0.35**	0.61**	0.15**
NDRE2/GNDVI	—	—	—	0.01	0.34**	0.20**
CI _{re-edge1} /NDVI	0.42**	0.76**	0.65**	-0.25**	0.78**	0.41**
CI _{re-edge1} /GNDVI	-0.10	0.74**	0.44**	-0.34**	0.75**	0.27**

2.2 氮浓度估测模型的建立

马铃薯植株氮素浓度是评价马铃薯氮素营养状况的重要指标。苗期是马铃薯重要的营养生长阶段, 氮素营养主要由基肥和土壤基础无机氮供应, 追氮从块茎形成期开始也不晚。从全生育期来看, NDRE1/NDVI 光谱指数与植株氮浓

度的相关性最好, 且生殖生长期更好。与其他光谱指数相比, 营养生长期和生殖生长期同样具有较高的相关性(表 3), 而块茎形成期后的生殖生长期是马铃薯氮素营养诊断的关键生育时期, 因此选择具有稳定性的 NDRE1/NDVI 光谱指数对生殖生长期马铃薯植株氮素浓度构建估测模型。从图 1 构

建的模型可以看出，马铃薯生殖生长期植株氮素浓度与 NDRE1/NDVI 光谱指数具有较好的线性拟合关系。其中 Wordview-2 卫星通道下 NDRE1/NDVI 与马铃薯植株氮素浓度的线性拟合方程为： $y=22.0x-4.1$ ， R^2 为 0.55[图 1

(a)]; VEN μ S 卫星通道下 NDRE1/NDVI 与马铃薯植株氮素浓度的线性拟合方程为： $y=11.6x-5.2$ ， R^2 为 0.66[图 1 (b)]。

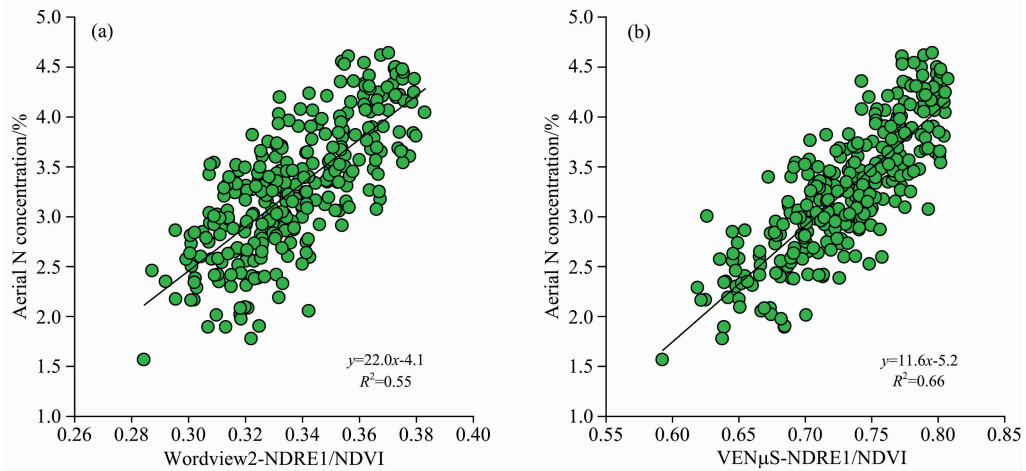


图 1 生殖生长期马铃薯植株氮素浓度估测模型的构建

Fig. 1 Estimation model of nitrogen concentration in reproductive period of potato

2.3 估测模型的检验

数学模型的鲁棒性不仅取决于模型建立时的拟合优度 R^2 ，还应经得起实践的验证，才能证明其实用性与稳定性。针对本研究建立的估测模型，利用 25% 验证集光谱数据对马铃薯植株氮素浓度进行估测，并对实测马铃薯地上部植株氮素浓度对模型的精度进行验证(图 2)。马铃薯生殖生长期，基于 NDRE1/NDVI 光谱指数的马铃薯植株氮素浓度估测模型具有很好的验证性。其中，WorldView-2 通道下的 NDRE1/NDVI 指数与马铃薯植株氮素浓度估测模型的验证

斜率为 0.78， R^2 为 0.49，具有较小的 RMSE 和 RE%，分别为 0.41% 和 11.12%。相比 WorldView-2 卫星而言，VEN μ S 卫星红边通道更窄，预测精度更高，NDRE1/NDVI 指数与马铃薯植株氮素浓度估测模型的验证斜率为 0.82，最接近 1，且具有较高 R^2 为 0.56 和最低的 RMSE 和 RE%，分别为 0.38% 和 10.45%。两卫星波段宽度下建立的 NDRE1/NDVI 指数对马铃薯植株氮素浓度的估测模型验证结果显示，VEN μ S 卫星在马铃薯植株氮素浓度的估测中更具优势。

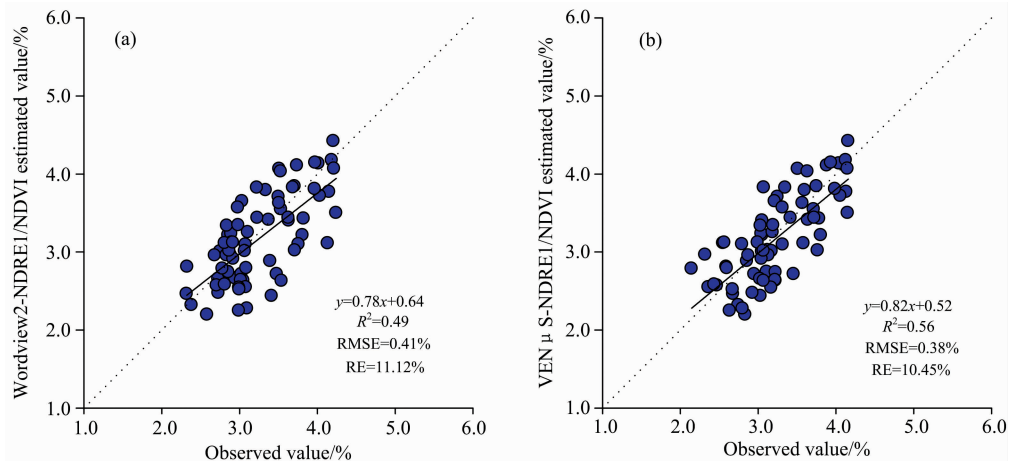


图 2 基于 NDRE1/NDVI 光谱指数的马铃薯植株氮素浓度估测模型的验证

Fig. 2 NDRE1/NDVI based relationship between the estimated and observed plant N concentration for the validation datasets

多年数据研究分析表明，基于 WorldView-2 和 VEN μ S 卫星通道计算的红边光谱指数对马铃薯植株氮素浓度的估测具有明显优势，红边波段宽度和位置的选择显著影响光谱指

数对氮素浓度的敏感性，而且马铃薯生育时期严重影响光谱指数与马铃薯植株氮素浓度估测模型的构建。在众多的光谱指数中，融合光谱指数 NDRE1/NDVI 在营养生长期、生殖

生长期及全生育时期都表现出较好的相关性,体现出了基于红边融合光谱指数普适性的优势。

北方马铃薯种植株距一般在 20~30 cm,与小麦、水稻相比种植密度小,幼苗初期马铃薯植株矮小,叶片稀疏,冠层光谱信息受地面干扰很大,导致 NDVI 和 NDRE1 光谱指数与马铃薯植株氮素浓度关系的散点图中幼苗初期数据离散度很大,基本完全偏离整体趋势[图 3(a, b, d, e, 蓝色部分)]。由于受冠层结构的影响,归一化光谱指数 NDVI 在对马铃薯植株氮素浓度的估测中存在明显的指数饱和现象[图 3(a, d)],而基于红边位置构建的光谱指数 NDRE1 能够明

显降低指数饱和现象[图 3(b, e)],这表明红边光谱指数 NDRE1 对马铃薯氮素浓度更加敏感,具有更强的预测能力^[15]。当 NDRE1 与 NDVI 相结合后,融合光谱指数 NDRE1/NDVI 在马铃薯全生育时期植株氮素浓度估测中表现出独有的稳定性和普适性优势。这是因为基于 WorldView-2 和 VEN μ S 卫星通道计算的归一化光谱指数 NDVI 在营养生长期与马铃薯植株氮素浓度具有较高的相关性,分别为 0.49 和 0.50,且达到极显著水平,表现出 NDVI 对裸露地面有较好的抗干扰能力^[16],当氮浓度敏感指数 NDRE1 与地面抗干扰指数 NDVI 结合为融合光谱指数 NDRE1/NDVI

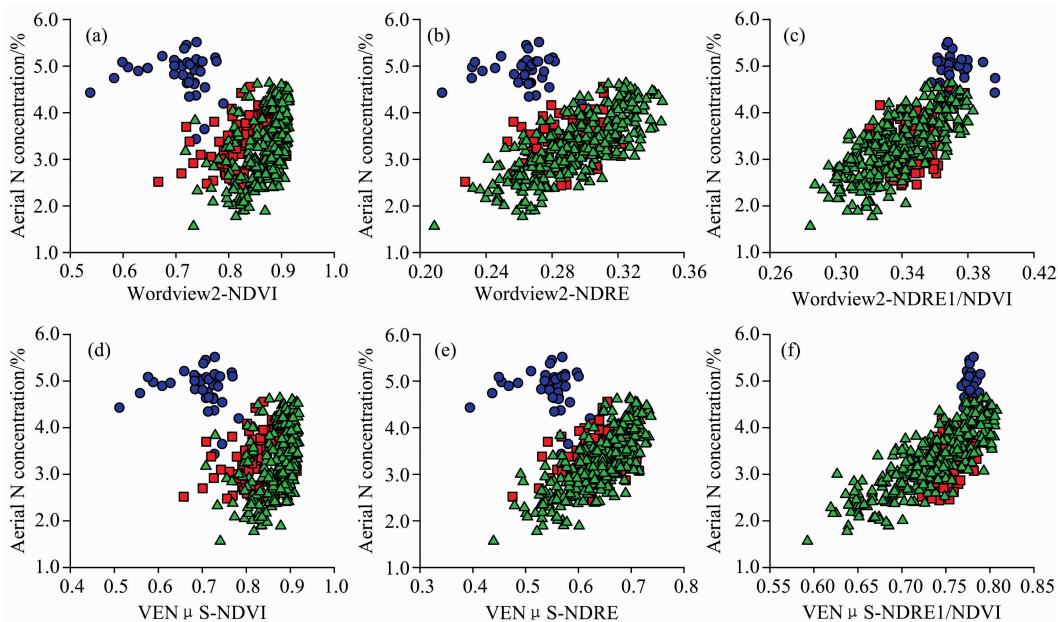


图 3 基于 WorldView-2 和 VEN μ S 卫星波段的 NDVI, NDRE 和 NDRE1/NDVI 光谱指数与马铃薯植株氮浓度的散点图
蓝色和红色为营养生长期,其中蓝色为幼苗初期,红色为幼苗中后期;绿色为生殖生长期

Fig. 3 Relationships between NDVI, NDRE, NDRE1/NDVI based on WorldView-2 and VEN μ S satellite bands and plant N concentration in reproductive period

Blue and red dots represent the vegetative period

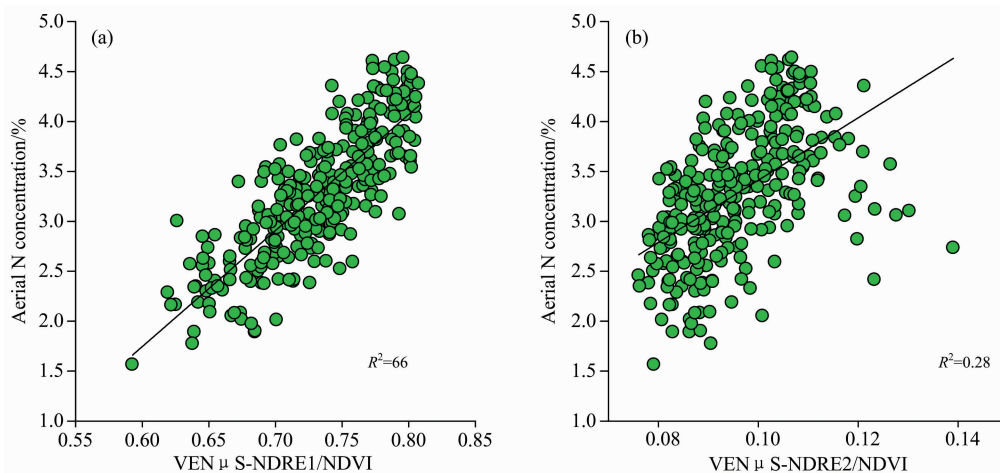


图 4 基于 VEN μ S 卫星波段的 NDRE1/NDVI 和 NERE2/NDVI 光谱指数与马铃薯植株氮浓度散点图

Fig. 4 Relationships between VEN μ S-NDRE1/NDVI, VEN μ S-NDRE2/NDVI and plant N concentration in reproductive period

时,既降低了苗期地面裸露和冠层结构改变的影响,又提高了马铃薯植株氮素浓度的估测能力,使 NDRE1/NDVI 光谱指数在马铃薯全生育时期内植株氮素浓度的估测上也表现出了良好的效果。

波段宽度和位置显著影响光谱指数对氮浓度的敏感性^[17-18]。同为 NDRE1/NDVI 光谱指数,WorldView-2 和 VEN μ S 卫星对马铃薯全生育时期氮浓度估测的敏感性差异显著,WorldView2-NDRE1/NDVI 光谱指数更具线性拟合趋势[图 3(c)],而 VEN μ S-NDRE1/NDVI 光谱指数对苗期氮浓度解释能力差[图 3(f)]。而且同为 VEN μ S 卫星红边通道,NDRE1 红边中心波段为 702 nm,波段宽度为 24 nm,NDRE2 红边中心波段为 742 nm,波段宽度为 16 nm,NDRE1 和 NDRE2 与生殖生长期马铃薯植株氮素浓度的相关系数分别为 0.75 和 0.60(表 3),且 NDRE 与 NDVI 组合的融合光谱指数 NDRE1/NDVI 与马铃薯生殖生长期植株氮素浓度的相关系数为 0.81, R^2 为 0.66,显著高于 NDRE2/NDVI 光谱指数与植株氮素浓度的 R^2 , 0.28(图 4)。波段宽度越宽,所包含的光谱信息虽然越多,但其中的重复与干扰信息也会增多,并且很大程度上会掩盖马铃薯植株氮素浓度最敏感的波段,进而影响最终模型构建的准确性,因此更加

精准的光谱指数氮营养估测模型构建的前提是对光谱波段进行优化,筛选最为敏感的波段。

光谱技术用于植株氮素营养诊断有其先进性与可行性,但也存在一些问题,需要进一步研究抗干扰能力、敏感性更强的光谱指数或更好的光谱数据处理方法,在接下来马铃薯植株氮素浓度的估测研究中会进一步优化对氮浓度敏感的波段,构建更为普适性与稳定性的光谱指数。

3 结 论

(1)波段宽度和位置的选择决定着光谱指数对氮素浓度的响应程度。

(2)生育时期显著影响光谱指数对马铃薯地上部氮素浓度的估测能力,且马铃薯生殖生长期诊断效果最佳。

(3)VEN μ S-NDRE1/NDVI 指数与植株氮素浓度具有最好的拟合效果, R^2 为 0.66,估测值与实测值的 RMSE 和 RE 最低,分别为 0.38%, 10.45%。由红光和红边指数构成的融合光谱指数 VEN μ S-NDRE1/NDVI 相对其他指数来说在马铃薯生殖生长期植株氮素营养诊断上更具优势。

References

- [1] Hadden D, Grelle A. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 243: 1.
- [2] Gilliam F S, Billmyer J H, Walter C A, et al. *Atmospheric Environment*, 2016, 146: 261.
- [3] Lui Y T, Song Y Z, Ma X Y, et al. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2018, 2: 029.
- [4] Cheng T, Yang Z G, Zhu Y, et al. *Remote Sensing*, 2016, 8(2), 116.
- [5] Zhao B, Liu Z, Ata-Ul-Karim S T, et al. *Field Crops Research*, 2016, 185: 59.
- [6] Zhao C, Li H, Li P, et al. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(1): 236.
- [7] Li H, Zhao C, Yang G, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 169: 358.
- [8] Tian Y C, Gu K J, Chu X, et al. *Plant and Soil*, 2014, 376(1-2): 193.
- [9] WANG Ren-hong, SONG Xiao-yu, YANG Gui-jun, et al(王仁红, 宋晓宇, 杨贵军, 等). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报)*, 2014, 30(19): 191.
- [10] LI Dan, LI Fei, HU Yun-cai(李 丹, 李 斐, 胡云才). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2016, 36(4): 1150.
- [11] Croft H, Chen J M, Zhang Y, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 133: 128.
- [12] Li J, Fan K, Zhou L. *Remote Sensing*, 2017, 9(7): 628.
- [13] WANG Bei-zhan, FENG Xiao, WEN Nuan, et al(王备战, 冯 晓, 温 暖, 等). *Scientia Agricultura Sinica(中国农业科学)*, 2012 45(15): 3049.
- [14] LI Fen-ling, CHANG Qing-rui, SHEN Jian, et al(李粉玲, 常庆瑞, 申 健, 等). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报)*, 2016, 32(9): 157.
- [15] Li F, Mistele B, Hu Y, et al. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, 92: 112.
- [16] Samborski S M, Gozdowski D, Walsh O S, et al. *Agronomy Journal*, 2015, 107(6): 2097.
- [17] Marx A, Kleinschmit B. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 2017, 10(4): 659.
- [18] Manzo C, Mei A, Salvatori R, et al. *Construction and Building Materials*, 2014, 61: 147.

Satellite Bands Based Estimation of Nitrogen Concentration in Potato Plants

YANG Hai-bo^{1,2}, GAO Xing^{1,2}, HUANG Shao-fu^{1,2}, ZHANG Jia-kang^{1,2}, YANG Liu^{1,2}, LI Fei^{1,2*}

1. College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010011, China

2. Inner Mongolia Key Laboratory of Soil Quality and Nutrient Resources, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010011, China

Abstract Plant nitrogen concentration (PNC) is one of the most important nutrient elements that directly affects crop growth and yield. High-throughput ground-based remote sensing, passive or active reflectance sensors, has the potential to provide more information for making better-informed management decisions for nitrogen fertilizer inputs at the canopy scale in real time but it is difficult to obtain data at the regional scale. For that multi-channel satellites with high spatial resolution (WorldView-2 and VEN μ S satellites with red edge bands) were tested in this study to estimating PNC on large scale at different growth stages of potato varieties. Experiments were conducted in 2014, 2015 and 2016 to remotely estimate the PNC of diverse potato varieties under different nitrogen levels in Wuchuan County of Northern Yin mountain, Inner Mongolia. The results showed that the combined spectral index NDRE/NDVI based on the red, red edge and near-infrared channels of the VEN μ S and WorldView-2 satellite is superior to other indices in estimating the PNC of potato varieties. The spectral index (NDRE/NDVI) of VEN μ S and WorldView-2 satellites had a high correlation with PNC at different growth stages, and the correlation coefficient ranged between 0.63 and 0.81. The spectral index (NDRE/NDVI) of VEN μ S had the highest correlation coefficient with PNC ($r=0.81$) at reproduction growth stage. The growth stages significantly affected the spectral index to estimate the PNC. The calibration models of spectral index (NDRE/NDVI) of two satellites based on the data of three years was validated to predict the PNC at reproduction growth stage. The predictive model of VEN μ S-NDRE/NDVI had the highest coefficient of determination (0.56), the lowest RMSE (0.38%) and RE (10.45%) with a slope of 0.82, as well as the predictive model of WorldView-2-NDRE/NDVI had higher coefficient of determination (0.49), lower RMSE (0.41%) and RE (11.12%) with a slope of 0.78. In conclusion, the results of multi-channel satellite simulations showed that the combined spectral index based on the red edge width band can be used to monitor the PNC of potato varieties.

Keywords Potato; Nitrogen concentration; Spectral index

(Received Aug. 22, 2018; accepted Dec. 26, 2018)

* Corresponding author