DOI: 10.3724/SP.J.1006.2020.94121

品种和生育时期对冠层光谱指数(NDVI)估测马铃薯植株氮素浓度的影响

杨海波 张加康 杨 柳 贾禹泽 刘 楠 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, 内蒙古呼和浩特 010018

摘 要: NDVI 是反映作物叶绿素相对含量及氮素水平的重要参数, 但是作物品种和生育时期的变化对 NDVI 估测氮素营养的能力有重要影响。本研究在内蒙古阴山北麓马铃薯主产区进行了多年多品种田间试验, 于 2014—2016 年 7 月上旬至 8 月中旬马铃薯关键生育时期, 利用便携式主动作物传感器 GreenSeeker 获取马铃薯冠层光谱指数 NDVI, 对比了品种和生育时期对 NDVI 估测结果的影响。结果表明, 块茎形成期 NDVI 与马铃薯植株氮素浓度相关性较差, 随着生育时期的推进, NDVI 与植株氮素浓度的线性相关性增强, 块茎膨大期与淀粉积累期组合会显著提高 NDVI 与植株氮素浓度的线性建模效果。品种混合会降低 NDVI 的灵敏性, 增加数据的离散性, 基于时间序列归一化的光谱指数 TNDVI 能够克服这些问题, 尤其是在块茎膨大期 TNDVI 与植株氮素浓度的拟合决定系数(R^2)能够由原来的 0.13 提高到 0.47。TNDVI 对块茎形成期、块茎膨大期和淀粉积累期组合的线性估测建模 R^2 为 0.76, 显著高于 NDVI。株型展开型的品种在块茎膨大期和淀粉积累期更具线性拟合趋势。研究表明, 马铃薯生育时期和品种对 NDVI 估测植株氮素浓度有显著影响, 且生育时期的影响更大。构建的 TNDVI 光谱指数能够克服品种差异导致的块茎膨大期、淀粉积累期数据分异及饱和现象, 为 NDVI 在马铃薯植株氮素浓度诊断应用的普适性上提供了理论依据与方法。

关键词: 马铃薯; 品种; 生育时期; 主动作物传感器; 归一化光谱指数; 植株氮素浓度

Effect of variety and growth period on NDVI estimation of nitrogen concentration in potato plants

YANG Hai-Bo, ZHANG Jia-Kang, YANG Liu, JIA Yu-Ze, LIU-Nan, and LI Fei*

Inner Mongolia Key Laboratory of Soil Quality and Nutrient Resource / College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China

Abstract: The normalized difference vegetation index (NDVI) is an important parameter to reflect relative chlorophyll content and nitrogen level of crops, but NDVI's ability to estimate nitrogen nutrition is affected by varieties and growth period. The field experiments using several varieties were conducted in the main potato producing areas at the north foot of Yinshan mountain, Inner Mongolia. From early July to mid-August in 2014 to 2016, the canopy spectral index NDVI was measured by using the pocket active crop sensor GreenSeeker during potato critical growth period. The effects of cultivars and growth stages on NDVI estimation of nitrogen concentration in potato plants were compared. The linear correlation between NDVI and plant nitrogen concentration (PNC) was poor in tuber initiation, but increased in process of growth period. The combination of tuber bulking period and starch accumulation period significantly improved the linear modeling effect of NDVI and PNC. Variety combination reduced the sensitivity of NDVI and increased the discreteness of data, which could be offset by NDVI time series normalization (TNDVI), especially the fitting coefficient of determination (R^2) of TNDVI and PNC increased from 0.13 to 0.47 in the tuber bulking period. The R^2 of linear estimation model of TNDVI for the combination of tuber initiation, tuber bulking and starch accumulation period was 0.76, which was significantly higher than that of NDVI. Plant-expanded varieties had a more linear fitting

本研究由 2018 年内蒙古自治区高等学校“青年科技英才支持计划”(NJYT-18-A08)和国家自然科学基金项目(41361079)资助。

This study was supported by the “Youth Science and Technology Talents Support Program” (NJYT-18-A08) of Colleges and Universities of Inner Mongolia Autonomous Region in 2018 and the National Natural Science Foundation of China (41361079).

* 通信作者(Corresponding author): 李斐, E-mail: feili72@163.com

第一作者联系方式: E-mail: hbyang93@163.com

Received (收稿日期): 2019-08-17; Accepted (接受日期): 2019-12-26; Published online (网络出版日期): 2020-01-14.

URL: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20200114.1708.002.html>

trend during tuber bulking and starch accumulation. The growth period and potato varieties had significant effects on NDVI estimation of PNC, and growth period had a greater effect. The established TNDVI spectral index overcame the data differentiation and saturation phenomenon during tuber bulking and starch accumulation caused by variety difference, which provides a theoretical basis and method for the application of NDVI in the diagnosis of nitrogen concentration in potato plants.

Keywords: potato; varieties; growth stage; active crop sensor; NDVI; PNC

我国是世界上马铃薯种植面积和产量最多的国家,但是由于施肥管理水平粗放,马铃薯单产普遍较低。氮肥是保证马铃薯产量和品质的重要营养元素,合理的氮肥供应不仅能够满足作物的生长需求,还能降低氮素损失带来的环境风险。了解作物的氮素营养状况是合理施肥的前提,尤其是对于生育期内多次追肥的作物。前人研究表明,作物冠层、叶片光谱反射率及其衍生参数能够反映作物长势及氮素营养状况,并为农田氮素养分管理提供理论指导^[1]。其中利用植被近红外高反射率和红光强吸收特征计算的归一化光谱指数 NDVI (Normalized difference vegetation index)对作物生物化学特性敏感,被广泛应用于作物长势监测和氮素营养诊断^[2]。其中植株氮素浓度是判断作物氮素营养丰缺的重要指标,追肥前实时、快速获取植株氮素营养状况就显得尤为重要^[3-4]。

GreenSeeker 是典型的主动作物传感器,内置的发光二极管能够发射近红外(770±15) nm 和红光(660±10) nm 波段,其输出参数 NDVI 在小麦、玉米、水稻、马铃薯等多种作物的氮素营养诊断及推荐施肥上都有应用^[5-10]。然而有研究表明,NDVI 对作物的某些物理、化学及生理指标的估测具有“饱和现象”^[11-12]。其中玉米上的研究发现,当叶面积指数大于 2,生物量高于 3 t hm⁻²,或者植株吸氮量超过 80 kg hm⁻²时,NDVI 出现饱和^[13]。而水稻的“饱和现象”则出现在生物量达到 4 t hm⁻² 或者吸氮量高于 100 kg hm⁻²时^[14]。同样在马铃薯植株氮素营养诊断的研究中也发现一定生育时期和氮素浓度时指数敏感性显著降低的问题^[15-16]。有研究指出植株生物量和叶面积指数达到一定值时,红光反射率趋近于饱和是导致 NDVI 趋于饱和的根本原因^[17]。而同一作物的不同品种在整个生育时期内冠层结构和生物量会有明显的不同^[18-19],这必然会导致 NDVI 的差异。那么如何克服作物品种和生育时期对 NDVI 诊断植株生理生化参数的影响就成了亟待解决的问题。为提高 NDVI 估测的精度,前人做了大量研究,Raun 等^[20]利用 NDVI 除以 CGDD (累计生长度日)得到的 INSEY 对冬小麦的产量估测精度可达 83%,提高了

NDVI 估测作物产量的准确度。将玉米高度参数引入氮肥施用算法,得到估产系数 INSEYH,估产精度也得到大幅度提高^[21]。同样在小麦上的研究也发现考虑土壤中的含水量可以提高预产的准确性,尤其是在 Feekes5 阶段利用 NDVI 乘以种植时地表 5 cm 处体积含水量预产效果更佳^[22]。这些研究结果表明,利用 NDVI 结合其他参数对提高产量的估测能力有很好的效果。那么这种方法是否能改善 NDVI 估测不同马铃薯植株氮素浓度上存在的品种和生育时期影响?我们需要进一步探究。

植株氮素浓度是反应作物氮素营养状况的有效指标,快速准确地获得植株氮素浓度对施肥指导有重要价值。马铃薯是典型的多次追肥作物,实时获取植株氮素营养状况就显的尤为重要。前人的研究指出以 NDVI 估测马铃薯植株氮素浓度和吸氮量时受生育时期的严重影响^[15]。然而前人的研究多注重生育时期而忽略了马铃薯品种的影响,马铃薯品种是否也具有相同的变化规律以及 NDVI 对不同马铃薯品种的适用性是否有差异,我们不得而知。所以本研究通过多年多点的田间试验,针对不同马铃薯品种通过手持式光谱仪 GreenSeeker 获取关键生育时期的冠层 NDVI,分析不同马铃薯品种在块茎形成期、块茎膨大期、淀粉积累期以及不同时期组合时 NDVI 对马铃薯植株氮素浓度估测的差异,目的是探究马铃薯品种和生育时期对 NDVI 估测植株氮素浓度的影响,并寻找降低这种影响的方法,为基于 NDVI 光谱指数的马铃薯氮素营养诊断及推荐施肥量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

在内蒙古马铃薯主产区进行试验,供试马铃薯品种为当地主栽品种。其中 2014 年在武川县,选用克新 1 号,试验设 7 个氮肥梯度,分别为 0、83、135、165、180、210、252 kg N hm⁻²; 2016 年在武川县,选用夏坡蒂,设 6 个氮肥梯度,分别为 0、90、144、180、270、425 kg N hm⁻²; 2017 年在四子王旗,选用荷兰 14 号,设 4 个氮肥处理,分别为 0、90、

190、320 kg N hm⁻²。每个处理设 4 次重复, 各小区随机排列。

1.2 光谱数据获取

用美国俄克拉荷马州立大学和 Ntech 公司共同研发的便携式主动作物冠层传感器 GreenSeeker 获得 NDVI。NDVI = (R_{NIR}-R_{RED})/(R_{NIR}+R_{RED})。采集 NDVI 光谱数据时随机选取各小区长势均匀的马铃薯

薯样段两垄, 每垄长 6 m, 使 GreenSeeker 探头与马铃薯冠层垂直, 高度控制在 60~80 cm, 扣动扳机匀速扫过采样区域。与手持式主动作物冠层传感器 GreenSeeker 不同, 便携式 GreenSeeker 更加小巧轻便, 在扫描每个 6 m 样段过程中会以 0.1 秒间隔获取 75~100 个 NDVI 值, 并在扫描完成后输出测量区域平均 NDVI, 然后手动记录平均 NDVI。

图 1 试验地位置及试验小区分布

Fig. 1 Location of test site and distribution of test plot

T1~T7 分别代表由低到高的氮肥用量处理; a、b、c、d 为 4 次重复。

T1~T7 represents the treatment of nitrogen fertilizer from low to high; a, b, c, and d are four replicated.

1.3 植株样品采集及农学参数的测定

采集完 GreenSeeker 数据后, 选取采样区域 1 m 样段, 采集地下部块茎和地上部植株分别称取鲜重, 切碎混匀后取 400~600 g 亚样品带回试验室于 105℃ 下杀青后调至 70℃ 条件下烘至恒重。然后将样品粉碎混匀, 经 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮后通过凯氏定氮法测定全氮。

2 结果与分析

2.1 NDVI 与马铃薯植株氮素浓度的相关性分析

马铃薯植株氮素浓度是表现当前植株氮素养分状况的重要指标。苗期马铃薯植株氮素吸收来源主要是土壤氮素, 而且该生育时期植株矮小, 地表裸露, NDVI 受土壤背景影响较大, 因此本研究选择马铃薯关键生育时期块茎形成期、块茎膨大期及淀粉积累期进行研究。从表 1 可以看出, NDVI 与块茎形成期植株氮素浓度相关性很差, 随着马铃薯地上部冠层结构逐渐稳定, NDVI 与块茎膨大期和淀粉积累期的相关性明显提高。此外, NDVI 对连续生育时期诊断的响应不同。整体来看, 块茎膨大期与淀粉积

累期组合时表现出较高的相关性。因此生育时期显著影响 NDVI 与马铃薯植株氮素浓度的关系。此外, 对马铃薯品种进行混合时, 块茎膨大期植株氮素浓度与 NDVI 的相关性与单一品种相比明显降低, 这说明利用 NDVI 对马铃薯植株氮素浓度进行估测时受品种影响较大。

2.2 生育时期对 NDVI 估测马铃薯植株氮素浓度的影响

块茎形成期、块茎膨大期和淀粉积累期是马铃薯生长的关键生育时期。整体来看, 随着生育时期的推移, NDVI 与植株氮素浓度的线性建模趋势增强, 且无品种差异。其中块茎形成期 NDVI 与马铃薯植株氮素浓度相关性很低, 图中的数据点离散度很大, 不具备建立模型的条件(图 2-a, d, g)。块茎膨大期 NDVI 与植株氮素浓度存在指数饱和现象, 估测模型对氮素浓度的诊断灵敏性显著降低(图 2-b, e, h)。淀粉积累期 NDVI 与马铃薯植株氮素浓度的估测建模更具线性拟合趋势, 估测模型的决定系数在 0.36~0.52 之间, 且达到极显著水平。

表 1 NDVI 与马铃薯植株氮素浓度的相关性(R^2)
Table 1 Correlation between NDVI and nitrogen concentration in potato plants (R^2)

时间 Year	品种 Species	函数类型 Function types	块茎形成期 Tuber initiation (A)	块茎膨大期 Tuber bulking (B)	淀粉积累期 Starch accumulation (C)	A+B	B+C	A+B+C
2014	克新 1 号 Kexin 1	线性函数 LF	0.04	0.83**	0.44**	0.38**	0.52**	0.52**
		二次函数 QF	0.09	0.87**	0.44**	0.48**	0.52**	0.59**
		幂函数 PF	0.04	0.85**	0.44**	0.45**	0.52**	0.55**
		指数函数 EF	0.04	0.83**	0.44**	0.38**	0.52**	0.52**
2015	夏坡蒂 Xiapodi	线性函数 LF	0.04	0.37**	0.36**	0.04	0.85**	0.52**
		二次函数 QF	0.05	0.48**	0.40**	0.10	0.85**	0.67**
		幂函数 PF	0.04	0.41**	0.35**	0.03	0.83**	0.58**
		指数函数 EF	0.04	0.38**	0.35**	0.04	0.85**	0.53**
2016	荷兰 14 号 Holland 14	线性函数 LF	0.07	0.44**	0.52**	0.01	0.72**	0.52**
		二次函数 QF	0.08	0.56**	0.64**	0.15	0.76**	0.74**
		幂函数 PF	0.07	0.45**	0.55**	0.01	0.74**	0.58**
		指数函数 EF	0.08	0.44**	0.52**	0.01	0.72**	0.52**
	全部 All	线性函数 LF	0.03	0.07*	0.50**	0	0.48**	0.28**
		二次函数 QF	0.06	0.13*	0.57**	0	0.58**	0.42**
		幂函数 PF	0.03	0.08*	0.52**	0	0.50**	0.32**
		指数函数 EF	0.03	0.07*	0.49**	0	0.48**	0.28**

“全部”代表 3 个马铃薯品种克新 1 号、夏坡蒂和荷兰 14 号; * 表示 $P < 5\%$, ** 表示 $P < 1\%$ 。
“All” stands for the three potato varieties of Kexin 1, Xiapodi and Holland 14; * means $P < 5\%$, and ** means $P < 1\%$. LF: linear function; QF: quadratic function; PF: power function; EF: exponential function.

(图 2)

图 2 马铃薯块茎形成期、块茎膨大期、淀粉积累期 NDVI 与植株氮素浓度的估测模型

Fig. 2 Estimation model of NDVI and plant nitrogen concentration during potato tuber initiation stage, tuber bulking stage and starch accumulation stage

马铃薯氮素营养需求贯穿于整个营养生长与生殖生长期, 为进一步研究生育时期对 NDVI 估测植株氮素浓度的影响, 本研究将马铃薯关键生育时期

块茎形成期、块茎膨大期和淀粉积累期进行了组合(图 3)。从建模效果来看, NDVI 与马铃薯植株氮素浓度的最佳估测组合生育时期是块茎膨大期和淀粉积

图 3 马铃薯组合生育时期 NDVI 与植株氮素浓度的估测模型

Fig. 3 Estimation model of NDVI and plant nitrogen concentration during combined growth stages of potato

A, B 和 C 分别代表马铃薯块茎形成期、块茎膨大期和淀粉积累期。

A, B, and C represent potato tuber initiation stage, tuber bulking stage and starch accumulation stage respectively.

累期(图 3-b, e, h), 具备明显的线性拟合趋势, 拟合决定系数在 0.52~0.85 之间; 块茎形成期与块茎膨大期的组合效果最差, 尤其是夏坡蒂和荷兰 14 号马铃薯品种(图 3-d, g), 数据点分布混乱; 同时对马铃薯块茎形成期、块茎膨大期和淀粉积累期估测时, 最佳的拟合趋势为非线性拟合, 但存在明显的 NDVI 饱和现象, 致使 NDVI 对较高植株氮素浓度反应灵敏度丧失(图 3-c, f, i)。生育时期对 NDVI 估测马铃薯植株氮素浓度的能力有显著影响, 而导致生育时期估测效果差异的原因可能是植株冠层结构的变化。

2.3 马铃薯品种对 NDVI 估测植株氮素浓度的影响

图 4 为同一生育时期或组合生育时期条件下不同马铃薯品种混合时 NDVI 与马铃薯植株氮素浓度的估测模型。从 NDVI 的数值来看, 克新 1 号和荷兰 14 号马铃薯品种的 NDVI 值较为接近, 且明显高于夏坡蒂品种, 因此马铃薯品种的差异会导致 NDVI 值大小的不同。从单独生育时期来看, 块茎形成期不同马铃薯品种混合后, NDVI 与植株氮素浓度不具备建模效果(图 4-a), 这可能是由于该生育时期同时受到品种、冠层结构及土壤背景的多重因素影响。块茎膨大期时马铃薯已经封垄, 冠层结构

变化与土壤背景影响较小, 但是由于马铃薯品种的差异, 混合后 NDVI 与植株氮素浓度数据点存在明显的分异现象(图 4-b), 虽然 3 个马铃薯品种混合后 NDVI 与马铃薯植株氮素浓度差异能够达到显著水平, 但 R^2 很低, 仅为 0.13, 这严重影响了模型在实际应用中的价值。淀粉积累期品种的混合与单独马铃薯品种相比, 混合后 NDVI 与植株氮素浓度的建模更具非线性拟合趋势, 这说明马铃薯品种的混合改变了单一品种时的线性拟合趋势, 增加了指数的饱和性, 降低了估测的灵敏性。从组合生育时期来看, 品种混合会增加指数饱和的风险(图 4-e, f), 虽然块茎膨大期和淀粉积累期组合后数据离散度较小(图 4-e), 但是与图 3 相比, 品种混合导致了 NDVI 指数饱和。

2.4 基于 TNDVI 指数的马铃薯植株氮素浓度估测

马铃薯品种及生育时期的差异表现在随着时间变化的整个生长过程中。因此为克服马铃薯品种和生育时期对 NDVI 估测植株氮素浓度的影响, 本研究对 NDVI 进行时间序列上的归一化, 得到 TNDVI, $TNDVI = NDVI \text{ (GreenSeeker 在某个时间的测定值)} / T \text{ (播种到测定的生长天数)}$ 。从图 5 可看出, 块茎膨大期和淀粉积累期马铃薯植株氮素浓度与 TNDVI

图 4 马铃薯品种混合条件下 NDVI 和植株氮素浓度估测模型的构建

Fig. 4 Estimation model of NDVI and plant nitrogen concentration under potato variety combination

A, B 和 C 分别代表马铃薯块茎形成期、块茎膨大期和淀粉积累期。

A, B, and C represent potato tuber initiation stage, tuber bulking stage and starch accumulation stage respectively.

具有较好的线性拟合趋势, 拟合方程的 R^2 分别为 0.47 和 0.58。TNDVI 不仅克服了马铃薯在块茎膨大期和淀粉积累期估测建模时的品种差异, 而且明显降低了指数的饱和性, 提高了线性建模效果(图 5-a, b)。

从图 6 可看出, 利用 TNDVI 对混合马铃薯品种进行关键生育时期块茎形成期、块茎膨大期和淀粉积累期的估测建模时, 仍然可以得到不错的线性估测模型。TNDVI 与块茎膨大期和淀粉积累期的估测

模型为 $y = 0.0026x + 0.0016$, 拟合方程的决定系数为 0.56; 与块茎形成期、块茎膨大期和淀粉积累期的估测模型为 $y = 0.0031x + 0.0003$, 拟合方程的决定系数为 0.76, 明显高于 NDVI 直接与马铃薯植株氮素浓度建立估测模型。但从数据点的分布来看, 生育时期的影响依然较大, 这可能是 GreenSeeker 固定的红光和近红外波段本身对马铃薯植株氮素浓度的敏感性差异所致。

图 5 品种混合时马铃薯块茎膨大期和淀粉积累期 TNDVI 与植株氮素浓度估测模型的构建

Fig. 5 Estimation model of TNDVI and plant nitrogen concentration under potato variety combination during tuber bulking stage and starch accumulation stage

图 6 品种混合时马铃薯组合生育时期 TNDVI 与植株氮素浓度估测模型的构建

Fig. 6 Estimation model of TNDVI and plant nitrogen concentration under potato variety combination during combined growth stage

2.5 TNDVI 光谱指数的敏感性分析

为对比 NDVI 和 TNDVI 对马铃薯植株氮素浓度的响应程度, 采用 Vine 等提出的 Noise Equivalent (NE) 算法对估测模型的敏感性进行分析^[23]。敏感性分析选择 NDVI 直接估测建模的图 4 (b, c, e, f) 与 TNDVI 估测建模的图 5 (a, b) 和图 6 (a, b) 进行对比, NE 越小, 说明光谱指数对估测参数的敏感性越高。从图 7 可以看出, NDVI 随着马铃薯植株氮素浓度的

增加, 敏感性显著降低, 而 TNDVI 无论是在单独的生育时期, 还是在组合生育时期, 都表现出相对较高的敏感性, 尤其是在品种影响较大的块茎膨大期。淀粉积累期虽然 NDVI 受品种影响相对较小, 但是当马铃薯植株氮素含量大于 2.4% 时, 相对于 TNDVI, NDVI 的灵敏性显著降低。此外, 虽然 TNDVI 无法显著降低生育时期的影响, 但是与 NDVI 估测连续生育时期块茎形成期(A)、块茎膨大

图 7 NDVI 和 TNDVI 估测建模的敏感性分析

Fig. 7 Noise equivalent of plant nitrogen concentration estimation by NDVI and TNDVI

A、B、C 分别代表块茎形成期、块茎膨大期和淀粉积累期。

A, B, and C represent potato tuber initiation stage, tuber bulking stage and starch accumulation stage, respectively.

期(B)、淀粉积累期(C)相比, TNDVI 对马铃薯植株氮素浓度的敏感性也远高于 NDVI。

3 讨论

利用 NDVI 对马铃薯进行植株氮素营养诊断时要考虑生育时期的影响。前人研究表明, 当作物覆盖度低于 15% 时, NDVI 很难与植株生物量建立关系^[24]。马铃薯块茎形成期 NDVI 仍然在一定程度上受到土壤背景和冠层结构的干扰, 而且此时伴随着马铃薯开花, 冠层的白色、紫色等不同花色会影响冠层光谱的反射率^[16], 导致 NDVI 与马铃薯植株氮素浓度的相关性差, 这与前人的研究结果一致^[15]。随着马铃薯开花后, 块茎膨大期和淀粉积累期植株封垄, 冠层结构稳定, NDVI 对马铃薯植株氮素浓度的诊断能力也逐渐提高。而且同一品种间生育时期显著影响 NDVI 对马铃薯植株氮素浓度的估测能力, 其中以块茎膨大期和淀粉积累期组合效果最佳, 因此在田间利用 NDVI 估测植株氮素浓度时, 为提高估测的可行性与精度, 应该选择花后冠层结构稳定的生育时期进行诊断。

不同马铃薯品种的植株形态不同, 冠层光谱反射率也存在差异。在马铃薯块茎膨大期和淀粉积累期进行品种混合估测建模时(图 4-b, c), 存在明显的的数据点分异现象, 尤其是在块茎膨大期更明显。通过田间观察发现, 克新 1 号和荷兰 14 号的株型直立、茎叶浓绿, 而夏坡蒂株型开展、分支较多, 茎叶呈黄绿色。因此分异的原因很可能是不同马铃薯品种在生长过程中的冠层结构、叶片颜色不同, 而随着生育时期的推移, 这种分异现象有所减弱。此外品种间的混合会增加 NDVI 估测马铃薯植株氮素浓度时的指数饱和现象(图 4-e, f)。为消除这种分异与饱和现象, 本研究对 NDVI 进行时间序列上的归一化, 得到 TNDVI 指数, 建立其与马铃薯植株氮素浓度的关系(图 6 和图 7)。本研究发现, 与 NDVI 相比, 通过时间序列上的归一化后, 不同马铃薯品种在块茎膨大期的数据分异现象基本消除, 而淀粉积累期数据点的紧密度更高, TNDVI 使估测模型更具线性拟合趋势, 降低了品种混合时的指数饱和现象。这为 NDVI 对不同马铃薯品种进行植株氮素浓度诊断, 克服品种差异带来的数据分异及饱和现象提供了

改进方法。但值得注意的是, TNDVI 光谱指数受生育时期的影响仍然十分显著, 说明生育时期对 NDVI 估测马铃薯植株氮素的影响要大于品种之间的差异。

利用 NDVI 诊断马铃薯植株氮素浓度时存在指数饱和现象, 而 TNDVI 对马铃薯关键生育时期进行植株氮素浓度估测建模时, 不同生育时期虽然具有分异现象, 但是不同生育时期数据点的分布具有相同趋势(图 6-b), 因此要想解决马铃薯品种和生育时期同时带来的影响, 改变指数构建形式及算法优化是有效的途径之一, 所以基于波段优化算法的光谱指数研究是非常有必要的。构建新的指数算法, 综合考虑不同品种不同生育时期的最佳敏感波段, 不仅会在作物生理生化指标的估测中展现出更佳的优势, 也为便携式作物传感器的制作提供了理论依据。

4 结论

以 NDVI 估测马铃薯植株氮素浓度受生育时期和品种的影响。单一品种时冠层结构相对稳定的块茎膨大期和淀粉积累期是以 NDVI 诊断植株氮素浓度的最佳时期, 但是在块茎膨大期仍然存在指数饱和现象, 而两生育时期的组合能明显提高估测建模效果。多品种混合时 NDVI 存在数据分异和指数饱和和性增加的问题, 显著降低了 NDVI 对马铃薯植株氮素浓度的估测能力, 而 TNDVI 能够克服品种间混合建模时的数据点分异和饱和现象, 且估测模型的敏感性远高于 NDVI。

References

- [1] 张晗, 赵小敏, 郭熙, 张佳佳, 叶春, 叶英聪, 李小毛. 基于冠层高光谱信息的水稻生长监测应用研究进展. *江苏农业科学*, 2018, 46(12): 1–9.
Zhang H, Zhao X M, Guo X, Zhang J J, Ye C, Ye Y C, Li X M. Advances in application of rice growth monitoring based on canopy layer spectral information, *Jiangsu Agric Sci*, 2018, 46(12): 1–9 (in Chinese).
- [2] 张卫峰, 马林, 黄高强, 武良, 陈新平, 张福锁. 中国氮肥发展贡献和挑战. *中国农业科学*, 2013, 46: 3161–3171.
Zhang W F, Ma L, Huang G Q, Wu L, Chen X P, Zhang F S. The development and contribution of nitrogenous fertilizer in China and challenges faced by the country. *Sci Agric Sin*, 2013, 46: 3161–3171 (in Chinese with English abstract).
- [3] 魏全全, 李岚涛, 任涛, 王振, 王少华, 李小坤, 鲁剑巍. 基于数字图像技术的冬油菜氮素营养诊断. *中国农业科学*, 2015, 48: 3877–3886.
Wei Q Q, Li F T, Ren T, Wang Z, Wang S H, Li X K, Lu J W. Diagnosing nitrogen nutrition status of winter rapeseed via digital Image processing technique. *Sci Agric Sin*, 2015, 48: 3877–3886 (in Chinese with English abstract).
- [4] Nigon T J, Mulla D J, Rosen C J, Cohen Y, Alchanatis V, Rud R. Evaluation of the nitrogen sufficiency index for use with high resolution, broadband aerial imagery in a commercial potato field. *Precision Agric*, 2014, 15: 202–226.
- [5] Wei W, Xia Y, Tian Y C, Liu X J, Jun N I, Cao W X, Yan Z H. Common spectral bands and optimum vegetation indices for monitoring leaf nitrogen accumulation in rice and wheat. *J Integr Agric*, 2012, 11: 2001–2012.
- [6] 卢艳丽, 白由路, 杨俐苹, 王磊. N 利用 GreenSeeker 法诊断春玉米氮素营养状况的研究. *玉米科学*, 2008, 16(1): 111–115.
Lu Y L, Bai Y L, Yang L P, Wang L. Diagnosis on nitrogen status using GreenSeeker in spring maize. *J Maize Sci*, 2008, 16(1): 111–115 (in Chinese with English abstract).
- [7] 郭建华, 王秀, 孟志军, 赵春江, 宇振荣, 陈立平. 主动遥感光谱仪 Greenseeker 与 SPAD 对玉米氮素营养诊断的研究. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(1): 43–47.
Guo J H, Wang X, Meng Z J, Zhao C J, Yu Z R, Chen L P. Study on diagnosing nitrogen nutrition status of corn using GreenSeeker and SPAD meter. *Plant Nutr Fert Sci*, 2008, 14(1): 43–47 (in Chinese with English abstract).
- [8] 张俊华, 张佳宝, 李立平. 基于冬小麦植被指数的氮肥调控技术研究. *土壤学报*, 2007, 44: 550–555.
Zhang J H, Zhang J B, Li L P. Nitrogen regulation technology based on canopy spectral property of winter wheat. *Acta Pedol Sin*, 2007, 44: 550–555 (in Chinese with English abstract).
- [9] Raun W R, Solie J B, Johnson G V, Stone M L, Lukina E V, Thomason W E, Schepers J S. In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. *Agron J*, 2001, 93: 131–138.
- [10] Franzen D W. Nitrogen management in sugar beet using remote sensing and GIS. In: Francis J P, David C, eds. *GIS Applications in Agriculture*. New York: Taylor and Francis Group, 2007. pp 35–39.
- [11] Li F, Gnyp M L, Jia L L, Miao Y X, Yu Z H, Koppe W, Chen X P, Zhang F S. Estimating N status of winter wheat using a handheld spectrometer in the North China Plain. *Field Crops Res*, 2008, 106: 77–85.
- [12] Gnyp M L, Miao Y X, Yuan F, Ustin S L, Yu K, Yao Y K, Bareth G. Hyperspectral canopy sensing of paddy rice aboveground biomass at different growth stages. *Field Crops Res*, 2014, 155: 42–55.
- [13] Xia T T, Miao Y X, Wu D L, Shao H. Active optical sensing of spring maize for in-season diagnosis of nitrogen status based on nitrogen nutrition index. *Remote Sensing*, 2016, 8: 605.
- [14] Yao Y K, Miao Y X, Cao Q, Wang H Y. In-season estimation of rice nitrogen status with an active crop canopy sensor. *IEEE J Selected Top Appl Earth Observ Remote Sensing*, 2014, 7: 4403–4413.
- [15] 于静, 李斐, 秦永林, 樊明寿. 应用主动作物冠层传感器对马铃薯氮素营养诊断. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33: 3092–3097.
Yu J, Li F, Qin Y L, Fan M S. Active crop canopy sensor-based nitrogen diagnosis for potato. *Spectroscopy Spectral Anal*, 2013, 33: 3092–3097 (in Chinese with English abstract).
- [16] 高兴, 李斐, 杨海波, 黄绍福, 张加康, 苗杰, 黄伟杰. 基于红

- 边位置的马铃薯植株氮浓度估测方法研究. 植物营养与肥料学报, 2019, 25: 296–310.
- Gao X, Li F, Yang H B, Huang S F, Zhang J K, Miao J, Huang W J. Appropriate calculation method for the use of red edge position to estimate potato nitrogen concentration. *Plant Nutr Fert Sci*, 2019, 25: 296–310 (in Chinese with English abstract).
- [17] Wang W, Yao X, Yao X F, Tian Y C, Liu X J, Ni J, Cao W X, Zhu Y. Estimating leaf nitrogen concentration with three-band vegetation indices in rice and wheat. *Field Crops Res*, 2012, 129: 90–98.
- [18] Mistele B, Schmidhalter U. Spectral measurements of the total aerial N and biomass dry weight in maize using a quadrilateral-view optic. *Field Crops Res*, 2008, 106: 94–103.
- [19] 杨贵军, 邢著荣, 黄文江, 齐腊, 李伟国. 不同株型冬小麦冠层结构特征多时相分析. 农业工程学报, 2010, 26(7): 227–234.
- Yang G J, Xing Z R, Huang W J, Qi L, Li W G. Analysis of winter canopy structure for different plant types of growth period. *Trans CSAE*, 2010, 26(7): 227–234 (in Chinese with English abstract).
- [20] Raun W R, Solie J B, Johnson G V, Stone M L, Lukina E V, Thomason W E, Schepers J S. In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. *Agron J*, 2001, 93: 131–138.
- [21] Sharma L K, Franzen D W. Use of corn height to improve the relationship between active optical sensor readings and yield estimates. *Precision Agric*, 2014, 15: 331–345.
- [22] Walsh O S, Klatt A R, Solie J B, Godsey C B, Raun W R. Use of soil moisture data for refined GreenSeeker sensor based on nitrogen recommendations in winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Precision Agric*, 2013, 14: 343–356.
- [23] Viña A, Gitelson A A, Nguy-Robertson A L, Peng Y. Comparison of different vegetation indices for the remote assessment of green leaf area index of crops. *Remote Sensing Environ*, 2011, 115: 3468–3478.
- [24] 任建强, 陈仲新, 周清波, 唐华俊. 基于叶面积指数反演的区域冬小麦单产遥感估测. 应用生态学报, 2010, 21: 2883–2888.
- Ren J Q, Chen Z X, Zhou Q B, Tang J H. LAI-based regional winter wheat yield estimation by remote sensing. *Chin J Appl Ecol*, 2010, 21: 2883–2888 (in Chinese with English abstract).