

基于氮处理的不同生育期冬小麦光能利用率和光化学植被指数的关系

郑腾飞^{1,2}, 郭建茂^{1,2}, 于鑫^{1,2}, 王琦^{1,2}, 吴玮^{1,2}

(1. 江苏省农业气象重点实验室, 江苏 南京 210044;
2. 南京信息工程大学应用气象学院, 江苏 南京 210044)

摘要: 基于2011年南京信息工程大学农业气象试验站的小麦数据, 利用 Gamon, Penuelas 等提出关于光能利用率和光化学反射植被指数的定义算法确定 LUE 和 PRI 的取值, 使用氮处理的方法探究对不同生育期冬小麦 LUE 和 PRI 关系的影响。结果表明, 处于2个不同生育期的冬小麦在3种氮处理条件下, LUE 和 PRI 的值都有显著增加; 2个生育期处于3种氮处理条件下的 LUE 和 PRI 表现出递增的相关关系, 且由于抽穗初期比拔节初期接受更长时期的氮处理, 所以同比吸收的氮量更多, 相关性更大。

关键词: LUE; PRI; 氮处理

中图分类号: P49

文献标识码: A

引言

太阳辐射是地球万物之源。植物光合作用作为不可或缺的纽带, 维系着地球一切生命活动与太阳辐射之间的联系。定量估算陆地生态系统的光合作用, 是估算作物生产力和产量的基础, 同时对认识和了解区域乃至全球气候变化及其影响和碳收支等重大环境问题具有重要意义。围绕陆地生态系统的光合—呼吸过程, 国内外学者已建成不同尺度的植被初级生产力(GPP)和净初级生产力(NPP)估算模型, 如 CASA, Bio-BGC, BEPS, GLO-PEM, TURC, PSN 等^[1], 其中基于光能利用率(Light Use Efficiency, LUE)的植被初级生产力、净初级生产力模型已成为大尺度植被初级生产力、净初级生产力估算的主要方法^[2]。所以准确获取 LUE 的值对估算净初级生产力(NPP)有着极为重要的意义。

近 20 a 来, 利用遥感技术探测植被性质的方法已被广泛应用^[3]。从事此方面研究的工作人员探究了很多方法来构建植被指数, 并已成功用于估算植被的各种生化组成部分进而达到监测植物的生

长状况的目的。光化学植被指数 PRI (photo2 chemical reflectance index) 是由 Gamon et al 等研究发现并在 1992 年提出其定义为 531 nm 和 570 nm 处反射率的归一化植被指数^[4-5]。这 2 个波段的反射率均受到叶黄质循环的影响, 当入射光强超过光合作用的负荷值时, 就会引起叶黄质从环氧化状态向脱氧化状态转变, 从而散失掉多余的热量以保护光合器官不受损伤^[6-7]。因此, 可以确定这一过程是和光合作用密切相关的。研究人员相继发现, 叶片位于 531 nm 处的反射率变化是和叶黄质循环相关联的。570 nm 处的反射率作为一个参考波段, 可以最大程度地削弱除叶黄质循环以外其他因素对 531 nm 处的反射率影响。PRI 反应的绿波段附近 2 个反射峰值的相对差异是可以探测到叶黄质的循环过程的, 因此能很好地反映叶片的光合作用进而达到估算 LUE 的目的。PRI 为估算叶片的 LUE 提供了一种新的方法, 并且对于掌握气候变化和区域性的碳收支具有重要意义^[8]。

随着对 PRI-LUE 关系的不断深入研究, 科研人员发现 PRI 和 LUE 在叶片^[9-11]、冠层^[4, 12-13]以及

收稿日期: 2012-08-17; 改回日期: 2012-09-07

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41071282)“基于多角度高光谱遥感的光化学反射植被指数与光能利用率研究”; 江苏省自然科学基金“基于遥感与作物生长模型的江苏水稻生产评估方法研究”(BK2009412); 公益性行业(气象)科研专项经费项目“农用天气预报关键技术研究”(GYHY200906021); 江苏高校优势学科建设工程共同资助。

作者简介: 郑腾飞(1986-), 男, 硕士研究生, 主要从事极端气象灾害和气候变化方面的研究。E-mail: zhengteng_fei@126.com

景观^[14-15]尺度上都有很好的相关关系。但是随着尺度的变化,很多其他因素会对这一关系产生干扰,如水分、氮元素含量、叶面积指数和太阳高度角等^[16-19],从而削弱了 PRI 和 LUE 的线性关系。所以对于不同干扰因素对 PRI-LUE 关系的影响仍然需要更多的探讨和研究。本文主要研究氮处理条件下处于拔节初期和抽穗初期冬小麦的 PRI-LUE 关系的变化情况。

1 材料和方法

1.1 田间试验设计

试验场地设于南京信息工程大学农业气象试验站(32°14'N,118°51'E)。前茬为水稻,耕作土壤质地为黄棕黏土,土质细腻均匀,PH 值为 7.2(误差值 < 0.1),0~30 cm 土层有质含量为 12.2 g/kg,全氮 0.07%,速效磷 15.08 mg·kg⁻¹,速效钾 174.65 mg·kg⁻¹,碱解氮 80.275 mg·kg⁻¹。试验作物为当地主栽品种“宁麦 12”。试验田分 A、B、C 3 个区域。A 区施氮水平为 100 kg·hm⁻²纯氮,此区域施肥量设定为 1 N。以此为标准设定 B 区域施肥量为 0.5 N,C 区域为 2 N。60% 作基肥,40% 拔节肥(拔节肥的施肥时间为 2012 年 2 月 24 日,施肥时期选在返青期即将结束时),配施 P₂O₅ 150 kg·hm⁻²和 K₂O 150 kg·hm⁻²,全部用作基肥。2011 年 10 月 6 日播种,2012 年 5 月 29 日收获。管理措施与高产大田栽培相同。本试验观测时间分别为 2012 年 3 月 17 日(冬小麦拔节初期)和 2012 年 4 月 18 日(冬小麦抽穗初期)。观测当天天气均为晴朗,阳光充足,试验田上空无云。拔节初期正处于小麦越冬返青后的生长恢复期,氮处理条件开始对小麦的生理因素产生影响,抽穗初期正处于小麦生长旺盛期,小麦由于经历长时间氮处理条件,所以此时期对小麦的生理影响较为明显。

1.2 测量项目与方法

1.2.1 测定计算 PRI 的相关量

PRI 最初由 Gamon 等在对向日葵生化特性的短期变化探测基础上提出的,当时名称为 Physiological Reflectance Index (PRI),并认为 PRI 与净光合作用有关。后来,Penuelas 等对其进行修正,并改名为 Photochemical Reflectance Index^[10]。PRI 定义如下:

$$PRI = (R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570}) \quad (1)$$

式中, R_{531} 和 R_{570} 分别表示 531 nm 和 570 nm 处的反射率。一般将 531 nm 称为测量波段,570 nm 称为参照波段。

R_{531} 和 R_{570} 的数据是使用 ASD 便携式光谱仪(FS-2500,ASD,USA)获取的。波长范围是 350~2500 nm,间隔为 1 nm,将 5° 视场角探头对准冠层测量反射率,垂直距离约冠层上方 60 cm,观测测量时间为 10:00~11:00。矫正白板使用的是 99.9% 的朗伯体白板(USA)。每个区域选取均匀分布的 9 个采样点(1 个区域分 3 行,每行 3 个点),每个点重复测量 3 次,然后取均值得到所需波段反射率数值。

1.2.2 测量计算 LUE 的相关量

LUE 被 Gamon 定义为冠层吸收的每摩尔光合有效辐射中碳的固定量^[11]。LUE 公式如下:

$$LUE = P_{NetCO_2} / PPFD \quad (2)$$

式中, P_{NetCO_2} 表示净光合速率,PPFD 表示冠层截获的光合有效辐射(incident photo synthetic photonflux density)。

P_{NetCO_2} 和 PPFD 的数据是通过使用 LI-6400 气体分析系统(LI-COR,USA)测量获取。获取 LUE 数据方法同样采用重复取值然后求平均的方法。

1.2.3 叶片绿度值测量

现有研究表明,SPAD(Soil and Plant Analyzer Development,也称绿度指数,用来表征叶片绿度特征^[20]值与叶片的叶绿素含量呈显著正相关^[21]。由于叶绿素含量与氮素含量有密切关系,而氮处理条件下可能会导致小麦叶片叶绿素含量同比升高进而促进光合作用^[22],最后可能会影响到 PRI-LUE 的线性关系,所以本次试验采集了小麦叶片 2 个生育期的叶片绿度数据,为更好地研究氮处理对 PRI 和 LUE 关系的影响提供事实依据。叶片绿度的数据是通过使用叶绿素 SPAD-502 对叶片分上、中、下 3 部分测量后取均值获取。每个区域叶绿素选取均匀分布的 9 个采样点(同上),每个点重复测量 3 次,取均值作为此点的 SPAD 值。每个待测叶片都用标签做上记号,便于 2 个生育期的比较。

2 结果和分析

2.1 不同氮处理对 2 个生育期冬小麦 SPAD 的影响

本次试验测量的 2 个时期不同氮处理条件下的 SPAD 值变化情况见表 1。

表1 2 时期不同氮处理条件下 SPAD 值的变化情况
Tab.1 SPAD for different nitrogen levels in two periods

时期	采样点	1	2	3	4	5	6	7	8	9
拔节初期	0.5 N	43.8	44.3	42.5	41.2	45.1	43.1	44.5	44.8	41.7
	2 N	46.2	47.2	46.6	44.3	47.7	46.7	47.8	43.2	46.3
抽穗初期	0.5 N	44.7	44.8	44.7	44.5	46.9	47.4	47.2	46.8	47.7
	2 N	50.7	49.8	48.9	48.5	49.7	48.2	49.8	48.6	49.4

拔节初期冬小麦的 SPAD 最大值和最小值分别出现在 0.5 N 处理和 2 N 处理过程中,且 3 种氮处理下的 SPAD 均值排序为 $SPAD_{0.5N} < SPAD_{1N} < SPAD_{2N}$ 。抽穗初期也同样。

叶片绿度试验结果表明 2 个时期氮处理条件下的小麦叶片叶绿素含量呈递增趋势,且由于后一时

期冬小麦经过更长时期的氮处理,所以叶绿素含量同比较高,更多的促进了植物的光合作用,提高了光合利用率。

2.2 不同氮处理对 2 个生育期冬小麦 LUE 的影响

小麦生育期内需要从外界获取大量养分以满足自身的正常生长发育,氮素是叶绿素中化合物的主要元素,施氮可以显著提高小麦旗叶叶绿素含量,延缓叶片衰老提高叶片净光合速率,并延长光合功能期^[22-24],所以说氮素对植物生长发育的影响是巨大的。大量研究表明,“后期施氮”或“氮肥后移”是获得较高蛋白质最有效的方法之一^[25-28]。翟丙年等^[29]和潘庆民等^[30]研究表明,冬小麦拔节初期施氮可以增加冬小麦游离氨基酸及蛋白质含量且更有利于兼顾小麦高产和优质。

在试验中,不同氮处理条件下 2 个时期冬小麦的 LUE 变化情况见图 1。

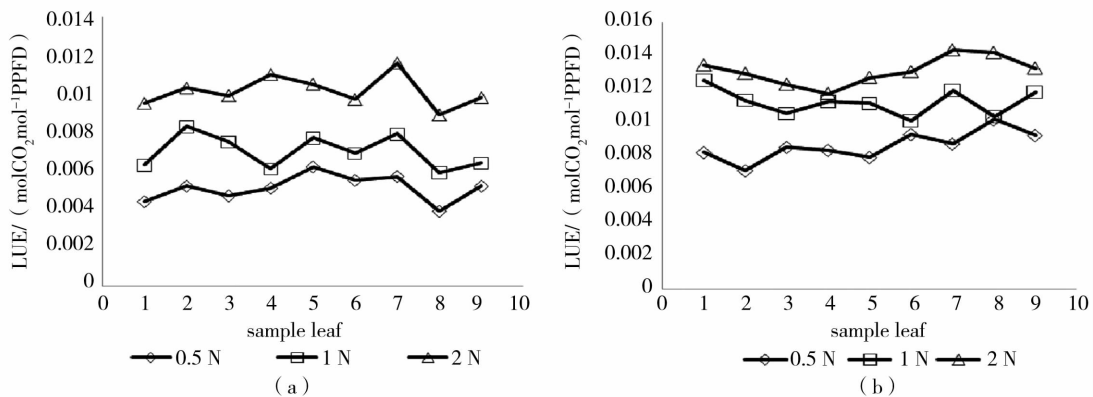


图1 拔节初期(a)和抽穗初期(b)不同氮处理下的 LUE 变化曲线
Fig.1 LUE for different nitrogen levels in jointing stage(a) and heading stage(b)

从图 1 可以看出,拔节初期 0.5 N 氮处理条件下冬小麦的 LUE 大致在 0.004 ~ 0.006 molCO₂ mol⁻¹PPFD 之间,1 N 氮处理条件下冬小麦的 LUE 大致在 0.006 ~ 0.008 mol CO₂mol⁻¹PPFD 附近,2 N 氮处理条件下冬小麦的 LUE 则上升到 0.01 molCO₂mol⁻¹PPFD 左右,最大为 0.12 molCO₂mol⁻¹PPFD。抽穗初期 0.5 N 氮素胁迫条件下冬小麦的 LUE 在 0.008 ~ 0.01 molCO₂mol⁻¹PPFD 之间,1 N 氮素胁迫条件下冬小麦的 LUE 大致在 0.01 ~ 0.012 molCO₂mol⁻¹PPFD 附近,2 N 氮素胁迫条件下冬小麦的 LUE 峰值为 0.014 molCO₂mol⁻¹PPFD。分析 2 个时期不同氮处理条件下冬小麦 LUE 的变化可以

得出:氮施肥量的增加促进了植物的光合作用,提高了叶片的 LUE;由于受到较长期的氮处理条件影响,抽穗初期冬小麦吸收了更多的氮素,所以抽穗初期冬小麦的 LUE 同比明显高于拔节初期。

2.3 不同氮处理对 2 个生育期冬小麦 PRI 的影响

由于受到不同氮处理的影响,2 个生育期的冬小麦光谱反射率发生明显变化,本次研究的反射率数据处理成图采用 ViewSpec Pro 软件,图 2a 为 2 生育期全波段光谱反射率变化曲线,图 2b 为 350 ~ 600 nm 测量波段的反射率图像。

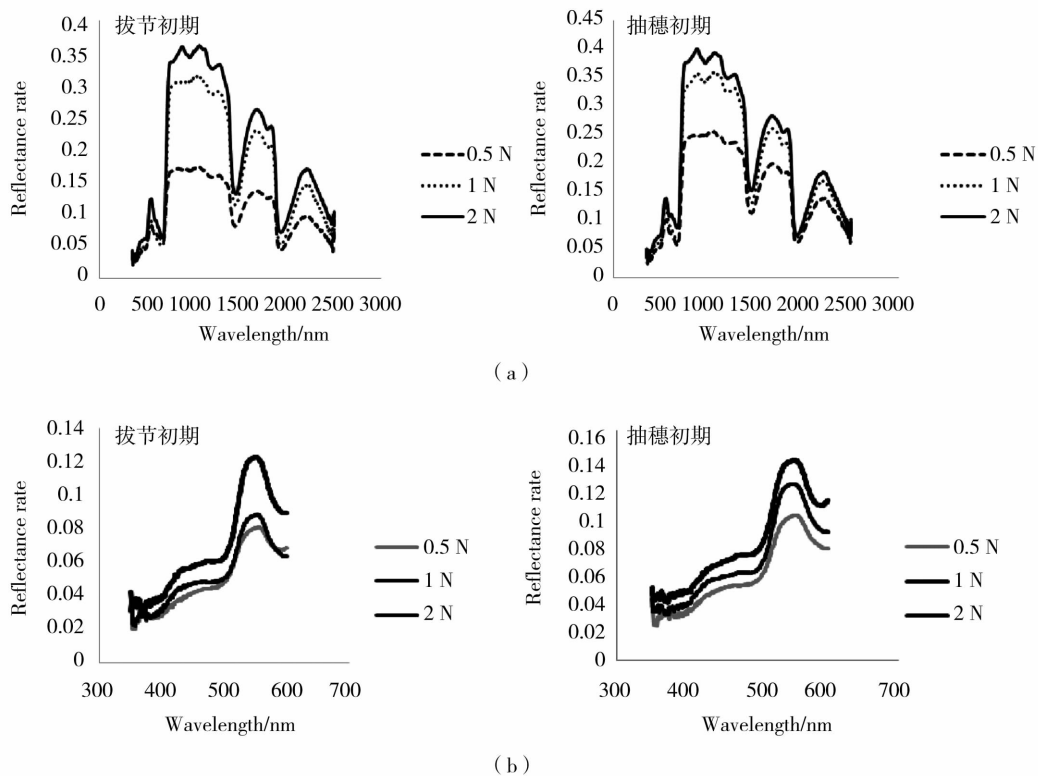


图2 拔节初期和抽穗初期不同氮处理条件下光谱反射率变化曲线

(a)全波段;(b)350~600 nm

Fig. 2 Reflectance rate for different nitrogen levels in jointing stage and heading stage

(a) for all wave band; (b) from 350 nm to 600 nm

通过分析图2a得知:2个时期光谱全波段反射率的变化幅度明显,且变化趋势相似;本文研究的光谱参照波段和测量波段处于全波段的起始部分,光谱反射率较低,且远远 $<1\ 000\ \text{nm}$ 处的峰值。

从图2b可以看出:2个生育期冬小麦处于500~600 nm之间的光谱反射率均呈上升趋势,且上升趋势明显;2个生育期光谱反射率变化趋势大体相同,但大小存在明显差异。这就说明构建的PRI指数在2个生育期将均表现为负值且由于抽穗初期500~600 nm间反射率曲线斜率更大,将表现出更加明显的PRI变化差异;由于不同水平氮处理的影响导致小麦冠层叶片的绿度发生了明显变化而引起光谱反射特性的变化;叶绿素含量与氮素含量有密切关系,因而叶片绿度可以作为叶片氮化合物状况的外在表现^[31]。由于抽穗初期较拔节初期受到更长时期的氮处理,所以叶片绿度更大,光谱反射率相对较高。PRI的值取决于531和570 nm处的反射率差值,而光谱试验结果表明531 nm处的反射率

在氮处理条件下较570 nm处走高明显,所以相对差值变大,从而导致PRI的相对变大。图3为氮处理条件下2个生育期冬小麦的PRI变化情况。

通过试验测量得出拔节初期3种氮处理条件下的PRI值分别在-0.02, -0.0175,和-0.0125左右。抽穗初期3种氮处理条件下的PRI值分别在-0.0175, -0.0125和-0.008左右,第5个采样点存在误差值。拔节初期冬小麦的PRI值在同样氮处理的条件下小于抽穗初期;2个时期冬小麦在不同氮处理条件下的PRI值在总体趋势上是增加的。

叶片绿度试验已经证明2个时期氮处理条件下的小麦叶片叶绿素含量呈递增趋势,且更加促进了光合作用。由于531 nm处的反射率只受到叶绿素含量的影响,而570 nm处的反射率除了受到叶绿素含量影响外还会受到胡萝卜素等其他因素的影响,所以又针对叶绿素值的变化情况和对应的PRI值做了相关分析。图4表示拔节初期和抽穗初期不同氮处理条件下叶绿素和PRI的相关关系。

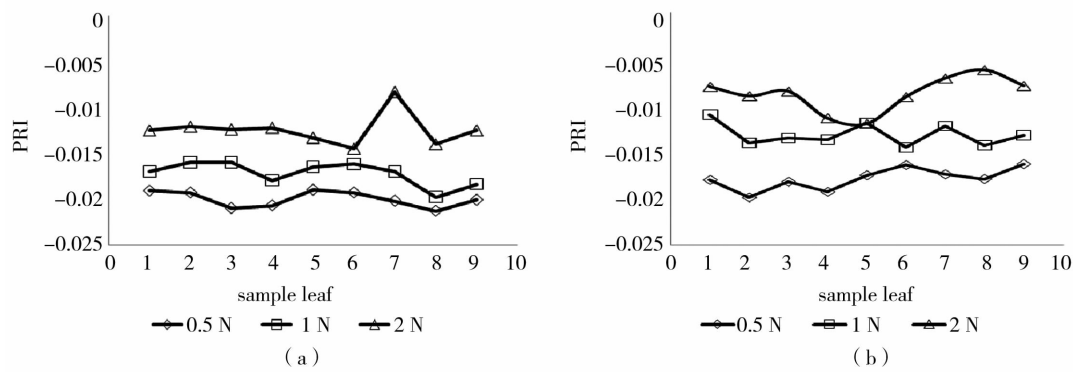


图3 拔节初期(a)和抽穗初期(b)不同氮处理下的 PRI 变化曲线
Fig.3 PRI for different nitrogen levels in jointing stage(a) and heading stage(b)

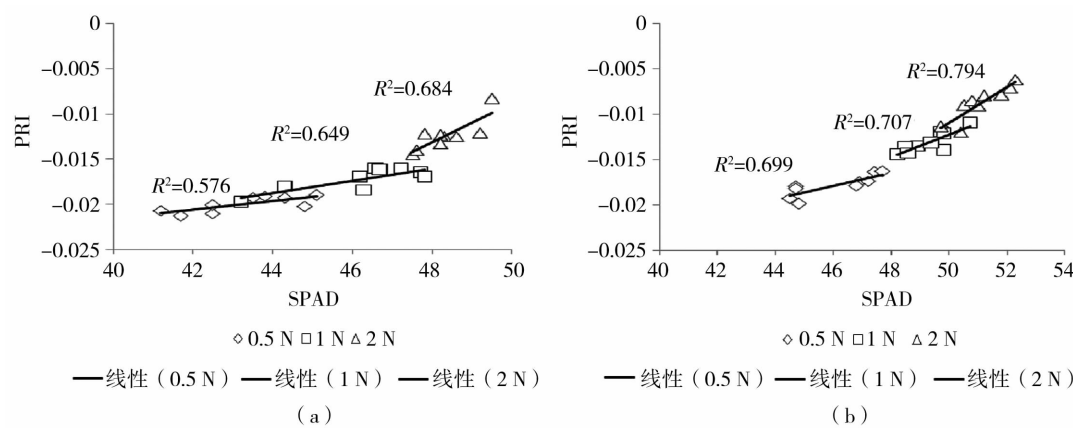


图4 拔节初期(a)和抽穗初期(b)不同氮处理条件下 SPAD 和 PRI 的相关关系
Fig.4 Correlation between SPAD and PRI for different nitrogen levels in jointing stage(a) and heading stage(b)

SPAD 和 PRI 在 3 种氮处理条件下 2 个时期的相关系数 R^2 分别为 0.576,0.649,0.684 和 0.699,0.707,0.794。相关性检验结果见表 2。

表 2 2 个时期不同氮处理条件下 SPAD 和 PRI 相关性检验

Tab.2 Correlation test between SPAD and PRI for different nitrogen levels in two periods

拔节初期			抽穗初期		
R	t	Sig(双侧)	R	t	Sig(双侧)
0.759	2.858	0.0176 *	0.836	3.733	0.0050 **
0.80	3.336	0.0087 **	0.840	3.807	0.0045 **
0.828	3.61	0.0059 **	0.891	4.813	0.0013 **

注: ** 和 * 分别代表 1% 和 5% 显著性水平

通过 t 显著性检验可知,检验结果均达到显著相关或以上水平。两者相关性随着氮素胁迫的增加而

递增,且相关性良好。这说明由于氮处理导致 3 种条件下的冬小麦叶绿素含量出现差异进而出现 PRI 值出现差异。通过比较 2 个时期的 PRI 变化曲线以及叶绿素和 PRI 相关关系曲线发现,PRI 的值是随着叶绿素含量的升高而同比升高的。此事实证明抽穗初期比拔节初期经历了更长时期的氮处理后叶绿素含量同比升高,导致 531 nm 处的反射率增值 > 570 nm 处的反射率,进而使 PRI 的值同比增加。

2.4 不同氮处理对 2 个生育期冬小麦 PRI 和 LUE 相关关系的影响

从图 5 得知,拔节初期不同氮处理条件下的 PRI 和 LUE 的相关系数 R^2 分别为:0.303,0.583,0.597。随着氮素的增加尤其是在达到 1 N 施氮水平及以上时,PRI 和 LUE 表现出更好的相关性;抽穗初期两者的相关系数 R^2 分别为:0.384,0.619,0.635。依然得出氮素增加尤其是在 1 N 施氮水平以上 2 N 施氮水平之间时,PRI 和 LUE 相关性更高的试验结果。相关

性检验结果表明在 0.5 N, 1 N 及以上施氮水平时, 表现出显著相关而且正是由于抽穗初期的氮肥吸收量高于拔节初期, 导致叶绿素含量同比升高, 表现出更好的相关关系即相关系数同比增大。

所以, PRI 可以比较好地和 LUE 建立相关关

系, 并且可以作为估算 LUE 的一种方法。氮素的处理对 PRI 和 LUE 相关关系有显著影响, 所以建立 PRI 估算 LUE 要考虑到叶片尺度上的生理因素, 即 PRI 不仅与叶黄素的脱环氧化有关, 还和叶绿素浓度有关^[32]。

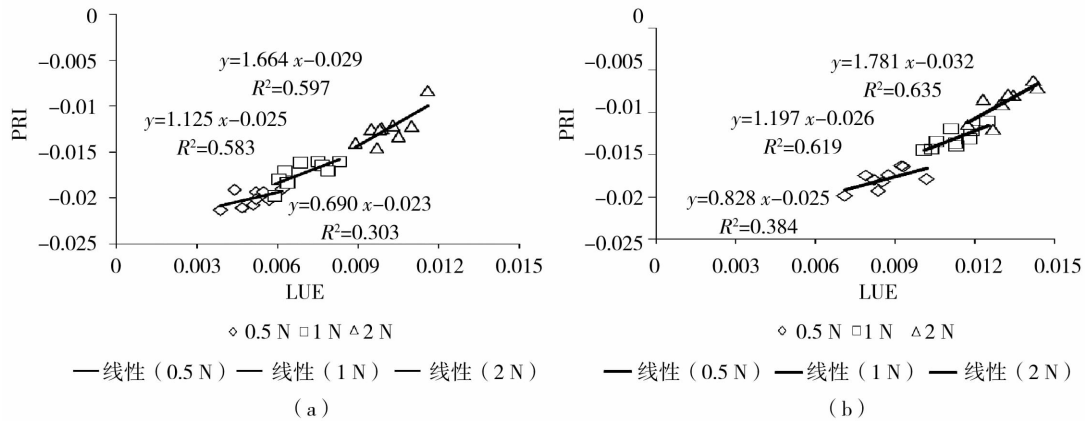


图5 拔节初期(a)和抽穗初期(b)不同氮处理下的 PRI 和 LUE 的相关关系

Fig. 5 Correlation between PRI and LUE for different nitrogen levels in jointing stage(a) and heading stage(b)

3 结论与讨论

通过分析在不同氮处理条件下, 不同生育期冬小麦的 SPAD, LUE 和 PRI 值的变化情况以及彼此之间相关关系的变化得出: 处于不同生育期的冬小麦在 3 种氮处理条件下, LUE 和 PRI 的值都有显著增加, 其主要原因是由于氮处理的作用, 使得叶绿素含量发生变化进而导致光合效率增加, PRI 值变大。2 个生育期处于 3 种氮处理条件下的 LUE 和 PRI 表现出递增的相关关系, 且由于抽穗初期比拔节初期受到的氮处理时间更长, 接受的氮量更多, 所以同比相关性更大, 相关系数更高。值得注意的是, 在 1 ~ 2 N 施氮水平时, PRI 和 LUE 表现出更好的线性相关关系, 为以后更好的研究 PRI 和 LUE 的关系提供了参考; 在叶片、冠层角度上, 很多因素都会影响 LUE 和 PRI 的相关关系, 所以在今后的研究中, 还要注意研究怎么剔除掉这些尺度上的干扰因素, 更有利于研究两者之前的关系, 为未来地面遥感的亩产估测做出更大的贡献。

参考文献:

- [1] Adams J M, Faure H, Faure - Denard L. Increases in terrestrial carbon storage from the last glacial maximum to the present[J]. Nature, 1990, 348:711 - 714.
- [2] Cramer W, Kicklighter D W, Bondeau A. Comparing global models

of terrestrial net primary productivity (NPP): Overview and key results[J]. Global Change Biology, 1999, 5:1 - 15.

- [3] Gamon J A, Filella I, Penuelas J, eds. The dynamic 531 - nanometer reflectance signal: A survey of twenty angiosperm species[A]. Current Topics In Plant Physiol[C]. 1990. 172 - 177.
- [4] Gamon J A, Penuelas J, Field C B. A narrow - waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency[J]. Remote Sens Environ, 1992, 41(1):35 - 44.
- [5] Arton C V M, North P R J. Remote sensing of canopy light use efficiency using the photochemical reflectance index model and sensitivity analysis[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 3:264 - 273.
- [6] Demmig - Adams B, Adams B. The role of xanthophyll cycle carotenoids in the protection of photosynthesis[J]. Trends in Plant Science, 1994, 1:21 - 26.
- [7] Punfele, Bilger W. Regulation and possible function of the violaxanthin cycle[J]. Photosynthesis Research, 1994, 42:89 - 109.
- [8] 马耀明, 马伟强, 胡晓, 等. 卫星遥感确定沙特阿拉伯吉达地区非均匀地表区域地表参数和能量通量[J]. 干旱气象, 2004, 12(4):10 - 13.
- [9] Trotter C M, Leathwick J R, Pairman D. Spatial information for ecosystem classification, analysis, and forecasting [A]. Spatial information and the environment [C]. London, Taylor Francis, 2001.
- [10] Penuelas J, Filella I, Gamon J A. Assessment of photosynthetic radiation use efficiency with spectral reflectance [J]. New Phytol, 1995, 131:291 - 296.
- [11] Gamon J A, Serrano L, Surfus J S. The photochemical reflectance

- index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels[J]. *Oecologia*, 1997, 112: 492 - 501.
- [12] Penuelas J, Llusia J, Filella I. Photochemical reflectance index and leaf photosynthetic radiation use efficiency assessment in mediterranean trees [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 13: 2863 - 2868.
- [13] Filella I, Amaro T, Araus J L. Relationship between photosynthetic radiation use efficiency of barley canopies and the photochemical reflectance index (PRI) [J]. *Physiological Planetarium*, 1996, 96: 211 - 216.
- [14] Nichol C J, Huemmrich K F, Black T A. Remote sensing of photosynthetic light use efficiency of boreal forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 101: 131 - 142.
- [15] Penuelas J, Inoue Y. Reflectance assessment of canopy CO₂ uptake [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21: 3353 - 3356.
- [16] Berbigier P, Bonnefond J M, Mellmann P. CO₂ and water vapour fluxes for 2 Years above euroflux forest site [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 108: 183 - 197.
- [17] Healey K D, Rickert K G, Hammer G L. Radiation use efficiency increases when the diffuse component of incident radiation is enhanced under shade [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1998, 49: 665 - 672.
- [18] Medlyn B E. Physiological basis of the light use efficiency model [J]. *Tree Physiology*, 1998, 18: 167 - 176.
- [19] Turner D P, Urbanski S, Bremer D. A cross biome comparison of daily light use efficiency for gross primary production [J]. *Global Change Biology*, 2003, 9: 383 - 395.
- [20] 李映雪, 徐德福, 谢晓金, 等. 小麦叶片 SPAD 空间分布及其与氮素营养状况的关系 [J]. *中国农业气象*, 2009, 30(2): 164 - 168.
- [21] 王春玲, 申双和, 王润元, 等. 中原地区低温对冬小麦发育期、生长量和产量的影响 [J]. *干旱气象*, 2012, 30(1): 66 - 68.
- [22] 王绍华, 曹卫星, 王强盛, 等. 水稻叶色分布特点与氮素营养诊断 [J]. *中国农业科学*, 2002, 35(12): 1461 - 1466.
- [23] Peltonen J, Virtanen. Effects of nitrogen fertilizers differing in release characteristics on the quantity of storage proteins in wheat [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 71: 1 - 5.
- [24] 岳寿松, 于振文, 余松烈, 等. 不同生育期施氮对冬小麦旗叶衰老和粒重的影响 [J]. *中国农业科学*, 1997, 30(2): 42 - 46.
- [25] 戴廷波, 孙传范, 荆奇, 等. 不同施氮水平和基追比对小麦子粒品质形成的调控 [J]. *作物学报*, 2005, 31(2): 248 - 253.
- [26] 费晓玲, 丁春兰. 甘肃黄土高原地温与冬小麦发育期的关系分析 [J]. *干旱气象*, 2009, 27(2): 148 - 149.
- [27] 刘尊英, 郭天财, 朱云集, 等. 氮素供应对小麦子粒蛋白质组分及积累动态的影响 [J]. *河南农业大学学报*, 1999, 33(4): 317 - 320.
- [28] Wuest B, Cassman G. Fertilizer - nitrogen use efficiency of irrigated wheat: I. uptake efficiency of pre - plant versus late - season application [J]. *Agron J*, 1992, 84: 682 - 688.
- [29] 翟丙年, 李生秀. 水氮配合对冬小麦产量和品质的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(1): 26 - 32.
- [30] 潘庆民, 于振文, 王月福. 追氮时期对小麦光合作用、¹⁴C 同化物运转分配和硝酸还原酶活性的影响 [J]. *西北植物学报*, 2001, 21(4): 631 - 636.
- [31] 王绍华, 曹卫星, 王强盛, 等. 水稻叶色分布特点与氮素营养诊断 [J]. *中国农业科学*, 2002, 35(12): 1461 - 1466.
- [32] Gamon J A, Field C B, Bjorkman O. Remote sensing of the xanthophyll cycle and chlorophyll fluorescence in sunflower leaves and canopies [J]. *Oecologia*, 1990, 85: 1 - 7.

Impact on Relation Between LUE and PRI of Winter Wheat in Different Growth Stages Under Various Different Nitrogen Levels

ZHENG Tengfei^{1,2}, GUO Jianmao^{1,2}, YU Xin^{1,2}, WANG Qi^{1,2}, WU Wei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Agricultural Meteorology of Jiangsu Province, Nanjing 210044, China;

2. College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: The wheat data from agro - meteorological experimental station in Nanjing University of Information and Science in 2011 were used and the value of LUE and PRI was determined by using an Algorithm proposed by Gamon, Penuelas et al. The impact on relation between LUE and PRI in different growth stages of winter wheat under various different nitrogen levels was analyzed. The main conclusions were as follows: (1) The LUE and PRI of winter wheat in two different growth stages had a significant increase under three different nitrogen levels; (2) Correlation between the LUE and PRI of winter wheat in two different growth stages was incremental under these different nitrogen levels. And the correlation was more greater in the early heading stage than that in early stem extension stage of winter wheat because of longer period of different nitrogen levels.

Key words: LUE; PRI; different Nitrogen levels