

刘 静,马力文,张学艺. 宁夏灌区春小麦 LAI 与生长性状和产量的关系[J]. 干旱气象, 2017, 35(3): 358-366. [LIU Jing, MA Liwen, ZHANG Xueyi. Relationship Between LAI and Growth Traits and Yield of Spring Wheat in Irrigated Area of Ningxia[J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(3): 358-366], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-03-0358

## 宁夏灌区春小麦 LAI 与生长性状和产量的关系

刘 静<sup>1,2</sup>, 马力文<sup>1,2</sup>, 张学艺<sup>1,2</sup>

(1. 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室, 宁夏 银川 750002; 2. 宁夏气象防灾减灾重点实验室, 宁夏 银川 750002)

**摘 要:**利用宁夏永宁农试站 1994—2012 年 2 个品种小麦观测资料,对 2 个小麦品种的生长性状、产量和产量结构进行方差分析,然后选取 2 个品种间差异不显著的样本,建立小麦不同发育期叶面积指数(LAI)与株高、密度、产量、穗粒数、结实小穗数及千粒重的关系。结果表明,不同发育期的 LAI 能反映小麦株高、密度和单位面积结实穗数。抽穗至乳熟阶段的 LAI 可估测株高,三叶至乳熟阶段的 LAI 均可监测同期密度,以拔节至乳熟阶段最好。抽穗至乳熟阶段的 LAI 可估测单位面积有效穗数,以抽穗期效果最好。抽穗至乳熟阶段 LAI 能较好地反映小麦产量的变化,可利用小麦冠层高光谱测定值构建的植被指数或 MODIS 植被指数反演 LAI,利用 LAI 与产量的关系估产。如果在小麦不同生育阶段用遥感植被指数估测 LAI,就可通过 LAI 与小麦株高、密度的关系监测小麦长势。抽穗至灌浆前期的 LAI 相对稳定,利用 MODIS 植被指数反演的 LAI 可估测小麦密度、产量和产量结构。

**关键词:**小麦;叶面积指数;生长性状;产量;产量结构;植被指数

**文章编号:**1006-7639(2017)-03-0358-09 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-03-0358

**中图分类号:**S512.1

**文献标识码:**A

### 引 言

农作物遥感估产一般以星载辐射仪各通道构建的光谱植被指数来反映作物的生长状况和产量<sup>[1]</sup>,其主要依据是植被指数与作物叶面积指数(LAI)的关系密切<sup>[2]</sup>。如张凯<sup>[3]</sup>、唐怡<sup>[4]</sup>等认为春小麦、冬小麦的 LAI 与高光谱植被指数显著正相关,薛利红<sup>[5]</sup>、李凤秀<sup>[6]</sup>等认为光谱植被指数与水稻、玉米的 LAI 存在显著相关性,惠凤鸣等<sup>[7]</sup>研究发现 NDVI 与杉木 LAI 呈正相关,可见,植被指数可反映群体的 LAI 变化。一般利用 NDVI 与 LAI 的关系密切来监测作物长势、估测作物产量,但忽视了一个细节,即 LAI 与作物长势和产量是否密切相关, LAI 能否反映株高、密度等变化,是否可利用 LAI 估测穗数、穗粒数和穗粒重等产量构成要素,这方面研究还很少。蒲金涌等<sup>[8]</sup>研究了主要粮食作物各生育时段 LAI 与光能利用率的关系,吴朝阳等<sup>[9]</sup>研究了高

光谱 VI 与叶绿素浓度及 LAI 的线性关系,王登伟等<sup>[10]</sup>对棉花高光谱植被指数与 LAI、地上鲜生物量进行了相关分析,张霞等<sup>[11]</sup>利用 MODIS 光谱指数监测小麦长势变化,张艳楠等<sup>[12]</sup>探讨了植被指数在典型草原生物量遥感估测应用中的问题。这些研究表明植被指数能反映作物光合产物、地上生物量等的变化。

在开展基于 MODIS 植被指数的小麦长势监测和估产时,用可见光、近红外波段构建的各类植被指数与作物的 LAI 和生物量进行相关筛选,建立 NDVI、EVI 与小麦 LAI 的关系<sup>[13]</sup>,并用最优植被指数反演的 LAI 监测作物群体长势并估测产量<sup>[14]</sup>。利用遥感数据估测小麦长势和产量的关键是明确 LAI 是否与小麦生长性状、产量关系密切,即株高、密度等长势参数及结实穗数、穗粒数、穗粒重等产量构成要素中,哪些与 LAI 的关系密切,以便为遥感长势监测和估产找到依据。为此,本文以宁夏永宁 1991—

收稿日期:2016-12-13; 改回日期:2017-03-17

基金项目:宁夏科技攻关项目“基于 EOS MODIS 的宁夏小麦精细化遥感估产”(Kgz-16-10-09)、科技部农业科技成果转化资金项目(2006GB24160429)和科技部气象行业专项“河套灌区主要农作物农业气象预评估技术研究”(GYHY201206021)共同资助

作者简介:刘静(1964-),正研高工,主要从事应用气象、灾害监测评估及产量预报等方面的研究。E-mail:Ahmd\_liujing@163.com

通讯作者:马力文(1964-),高工,主要从事应用气象、农业气候资源及气候变化影响方面的研究。E-mail:Ma\_liwen@163.com

2012 年农业气象观测报表的小麦生长性状、产量结构测定和最终测产资料,分析 LAI 与小麦生长状况、产量构成的关系,以期利用 MODIS 影像资料构建的植被指数进行小麦生长状况评价与产量估测提供理论依据。

## 1 资料与方法

选用宁夏永宁 1994—2012 年小麦农业气象观测资料,包括不同生育期 LAI、株高、密度、产量结构和测产资料。1984 年以来观测点均设置在永宁县杨河乡王太村(106°15'E、38°14'N,海拔 1 116.7 m),大田面积 20~100 hm<sup>2</sup>,小麦品种 1994—2007 年均为永良 4 号,2008—2012 年均为宁春 47 号。每年均为麦套玉米,播量一般为 375 kg·hm<sup>-2</sup>,播种时一般机施磷酸二铵 150 kg·hm<sup>-2</sup>、复合肥 300 kg·hm<sup>-2</sup>,拔节、孕穗撒施尿素 300 kg·hm<sup>-2</sup>,全生育期灌溉 4 次,灌溉总量约 5 400 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>。

由于观测资料由 2 个品种构成,但遥感估产业务需要用当前的品种观测资料,样本太少。为延长试验样本,需对永良 4 号和宁春 47 号试验资料进行双因素方差分析,以确定 2 个品种试验样本的 LAI、株高、密度、产量和产量结构等因素的差异是否显著,如果显著则不能构成分析样本序列。选择 2 个品种方差分析检验不显著的长势和产量构成要素构成样本序列,对不同生育期 LAI 与同期株高、密度等

生长性状和产量、产量结构进行线性、非线性模拟,根据其生物学意义和检验效果选定最优模型。

### 1.1 2 个品种生长性状差异的显著性检验

采用可重复双因素方差分析方法,检验永良 4 号 2003—2007 年和宁春 47 号 2008—2012 年田间观测样本的 LAI、株高、密度的差异是否显著,如果不显著则可用 1994—2012 年 2 个品种的样本研究,如果品种间差异显著则不能用 2 个品种的资料构成序列,可选用序列较长的永良 4 号 1994—2007 年的观测资料作为研究样本。

LAI 是衡量作物生长性状和产量的基础。对 2 个品种不同生育期 LAI、株高和密度的可重复双因素方差分析结果(表 1)表明,品种间 LAI 的差异不显著, $F = 0.012 < F_{\alpha} = 4.085$ ,而不同发育期 LAI 差距很大, $F = 35.214 > F_{\alpha} = 2.606$ ,差异极显著,因此 2 个品种的 LAI 资料可以构成同一个分析序列;2 个品种不同生育期株高的方差检验表明品种间的株高差异显著, $F = 7.324 > F_{\alpha} = 4.26$ ,不同发育期株高差异极显著, $F = 655.957 > F_{\alpha} = 3.403$ 。因此,不能用 2 个品种的株高数据研究 LAI 与株高的关系,可选序列相对较长的永良 4 号建立 LAI 与株高的关系;2 个品种间的密度差异不显著, $F = 0.184 < F_{\alpha} = 4.043$ ,不同发育期密度差异极显著, $F = 13.011 > F_{\alpha} = 2.409$ 。因此可用 2 个品种密度研究 LAI 与密度的关系。

表 1 永良 4 号和宁春 47 号小麦不同生育期生长性状的方差检验结果

Tab. 1 The variance test of growth characteristics of Yongliang 4 and Ningchun 47 wheat at different growth stages

生长性状	差异源	离差平方和(SS)	均方差(MS)	F	P 值	F 阈值
LAI	品种间	0.012	0.012	0.012	0.912	4.085
	发育期间	134.322	33.580	35.214	0.000	2.606
株高	品种间	67.500	67.500	7.324	0.012	4.260
	发育期间	12 091.000	6 045.733	655.957	0.000	3.403
密度	品种间	6.746	6.746	0.184	0.670	4.043
	发育期间	2 388.971	477.794	13.011	0.000	2.409

### 1.2 2 个品种产量和产量构成要素差异的显著性检验

2 个品种产量和产量结构的方差检验(表 2)表明,2 个品种结实小穗数、单株成穗数差异显著, $F$  值分别为 12.718 和 12.071,均  $> F_{\alpha} = 7.709$ ,年际间 2 个品种的结实小穗数、单株成穗数差异不显著, $F$  值均  $< F_{\alpha} = 6.338$ ,不能结合 2 个品种的结实小穗数、单株成穗数数据研究其与 LAI 的关

系。除此之外,2 个品种间穗粒数、穗粒重、千粒重、理论产量、实测亩产、茎秆重和地上生物量的差异检验均不显著,均可以用 2 个品种的考种和测产资料研究其与 LAI 的关系。除理论产量年际间的差异显著外,其他产量构成要素年际间的差异均不显著,表明选择 2003—2007 年永良 4 号和 2008—2012 年宁春 47 号样本进行方差分析是合适的。

表 2 2 个小麦品种产量及产量构成要素的方差检验结果

Tab. 2 The variance test results of yield and it's component of two cultivars of wheat

差异源	产量构成	离差平方和(SS)	均方差(MS)	F	P 值	F 阈值
品种间	小穗数	5.329	5.329	12.718	0.023	7.709
	单株成穗数	0.169	0.169	12.071	0.025	7.709
	穗粒数	1.444	1.444	0.267	0.633	7.709
	穗粒重	0.057	0.057	2.499	0.189	7.709
	千粒重	39.800	39.800	1.846	0.246	7.709
	理论产量	123.904	123.904	0.000	0.987	7.709
	实测亩产	15.406	15.406	0.506	0.516	7.709
	茎秆重	45.426	45.426	2.774	0.171	7.709
	地上生物量	82.105	82.105	0.889	0.399	7.709
年际间	小穗数	3.376	0.844	2.014	0.257	6.388
	单株成穗数	0.040	0.010	0.714	0.624	6.388
	穗粒数	79.910	19.978	3.695	0.117	6.388
	穗粒重	0.277	0.069	3.022	0.155	6.388
	千粒重	39.341	9.835	0.456	0.767	6.388
	理论产量	17.537.482	4.384.370	10.508	0.021	6.388
	实测亩产	339.835	84.959	2.792	0.172	6.388
	茎秆重	289.465	72.366	4.419	0.090	6.388
	地上生物量	1.230.885	307.721	3.332	0.135	6.388

## 2 结果分析

### 2.1 不同生育期 LAI 与小麦生长性状、产量和产量构成要素的相关性

为了解 LAI 能否反映作物不同发育期的生长性状、产量和产量结构,利用 1994—2012 年小麦观测和考种资料,以不同发育期测定的 LAI 与同期生长性状、产量及产量结构进行相关性分析(表 3)。结果显示,抽穗、乳熟期的 LAI 能很好地反映小麦产量,其相关系数分别为 0.592 和 0.563,且分别通过  $\alpha=0.01$  和  $\alpha=0.001$  的显著性检验。除了拔节期 LAI 与乳熟期株高的正相关及分蘖期 LAI 与穗粒重的负相关通过了  $\alpha=0.1$  的显著性检验外,不同发育期的 LAI 与株高、穗粒数、穗粒重、小穗数、千粒重和经济系数的相关性均不显著。

不同时段 LAI 与同期小麦密度的关系十分密切,拔节期、抽穗期 LAI 与同期密度的相关系数分别为 0.808 和 0.683,且分别通过  $\alpha=0.001$  和  $\alpha=0.01$  的显著性检验。抽穗期 LAI 与乳熟期密度、乳熟期 LAI 与成熟期密度都呈显著正相关,相关系数分别为 0.565 和 0.523,且都通过  $\alpha=0.05$  的显著性检验;抽穗期和乳熟期的 LAI 分别与乳熟期有效茎呈

显著正相关,相关系数分别为 0.456 和 0.495,且均通过  $\alpha=0.05$  的显著性检验,表明抽穗至乳熟期的 LAI 能较好反映小麦密度、亩穗数和产量,这为利用 MODIS 遥感数据构建的植被指数反演小麦抽穗期至乳熟期的 LAI,实现监测小麦最大密度、亩穗数和估算产量找到了依据。

### 2.2 LAI 与小麦生长性状、产量及产量构成要素的关系模型

#### 2.2.1 不同生育期 LAI 与株高的关系

一般来说,小麦株高越高,叶片数越多,LAI 也应越大。但由表 3 可以看出 LAI 与同期株高的线性相关不显著,因此用永良 4 号的资料构建曲线估计(图 1)。小麦分蘖期 LAI 与拔节期株高(图 1a)、拔节期 LAI 与乳熟期株高(图 1b)的复相关系数均通过  $\alpha=0.05$  的显著性检验,前期光合积累好,分蘖期 LAI 偏大有利于拔节起身,增加拔节期株高。拔节期 LAI 偏小,乳熟期的群体高度偏低,当 LAI 达到 4.0 以上时,乳熟期高度相对稳定在 80 cm 左右。小麦抽穗 LAI 与同期株高的曲线关系用 1995—2007 年的资料建立(图 1c), $R=0.62 > R_{0.05}=0.553$ ,抽穗期是群体密度最大阶段,LAI 在 7.0 以下时,抽穗

表3 永宁县春小麦不同生育期 LAI 与生长性状、产量及产量构成要素的相关性

Tab.3 Correlation of LAI with growth traits, yield and yield components at different growth stages of spring wheat in Yongning County

	三叶期 LAI	分蘖期 LAI	拔节期 LAI	抽穗期 LAI	乳熟期 LAI	资料年代
拔节株高	0.180	0.400	0.267	-0.303	-0.060	1994—2007
抽穗株高	-0.473	-0.139	0.194	0.437	-0.062	1995—2007
乳熟株高	0.173	-0.066	0.482 *	-0.005	0.207	1994—2007
三叶密度	0.556 **	0.462 **	0.303	0.186	0.017	1994—2012
分蘖密度	0.202	0.199	0.56 **	0.364	0.505 **	2000—2012
拔节密度	0.012	0.012	0.808 ****	0.8 ****	0.406 *	1994—2012
抽穗密度	0.145	0.333	0.554 **	0.683 ***	0.415 *	1994—2012
乳熟密度	0.087	0.312	0.445 *	0.565 **	0.377	1994—2012
成熟密度	0.171	0.283	-0.317	0.192	0.523 **	1994—2012
抽穗有效茎	0.260	0.563 **	0.211	0.387	0.290	1994—2012
乳熟有效茎	0.186	0.194	0.167	0.456 **	0.495 **	1994—2012
成熟有效茎	0.077	0.333	0.139	0.439 *	0.334	1994—2012
理论产量	0.063	-0.147	0.204	0.592 ***	0.563 ****	1994—2012
实测产量	-0.212	-0.290	0.236	0.556 **	0.434 *	1994—2012
穗粒数	-0.120	-0.357	-0.071	0.231	0.199	1994—2012
穗粒重	-0.111	-0.394 *	0.124	0.281	0.216	1994—2012
小穗数	-0.053	-0.142	-0.131	0.053	0.132	1994—2012
千粒重	-0.034	-0.187	0.369	0.219	0.121	1994—2012
经济系数	0.098	0.112	-0.163	-0.133	-0.030	1994—2012

注: \*、\*\*、\*\*\*、\*\*\*\* 分别表示通过 0.1、0.05、0.01、0.001 的显著性检验

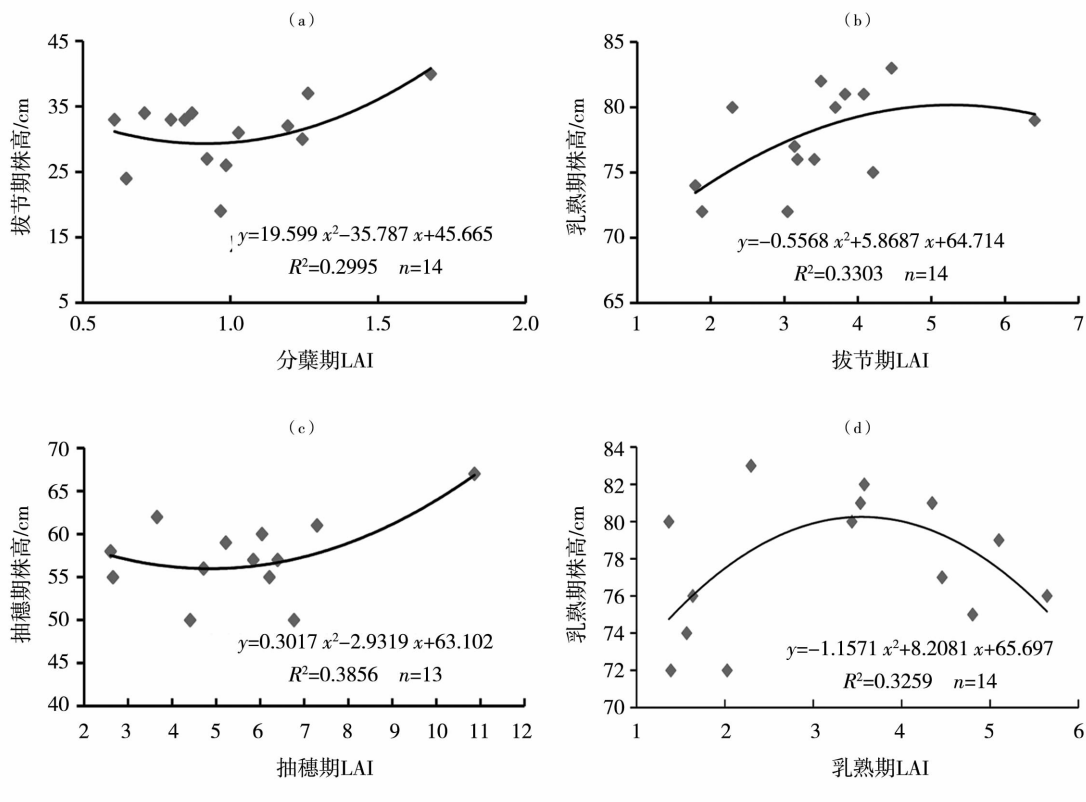


图1 1994—2007年永良4号春小麦不同发育期 LAI 与株高的关系

Fig.1 Relationship between LAI and plant height at different growth stages of Yongliang 4 wheat during 1994 - 2007

期株高一般在 60 cm 左右且较稳定,但 LAI 过大造成群体争光,同期株高也有所增高;乳熟期 LAI 与同期株高呈二次曲线关系(图 1d), $R=0.571 > R_{0.05}=0.532$ , LAI=3.5 时最高,低于 3.5 时可能因水肥不足小麦长势弱,株高不及正常情况。如果乳熟期迟迟不落黄, LAI 仍然偏大,小麦也可能偏矮或贪青晚熟。

### 2.2.2 不同生育期 LAI 与密度的关系

图 2 给出小麦不同发育期 LAI 与同期密度和单位面积结实穗数的关系,可以看出,不同发育期 LAI 与群体密度关系十分密切,一般植株密度大,叶片

多, LAI 也大,二者正相关。三叶期 LAI 与同期密度的曲线关系显著(图 2a), $R=0.571 > R_{0.05}=0.456$ ,为利用遥感资料评价苗情、估测小麦种植面积提供了可能。拔节期 LAI 与同期密度曲线关系极显著(图 2b), $R=0.838 > R_{0.001}=0.693$ ,密度随着 LAI 变大而增大,即拔节期分蘖越多,密度越大。抽穗期 LAI 与同期密度(图 2c)和单位面积有效穗数(图 2e)呈二次曲线关系,复相关系数分别达 0.743 和 0.64,且分别通过  $\alpha=0.01$  和  $\alpha=0.05$  的显著性检验。说明抽穗期 LAI 大,田间最大茎蘖数和单位面积有

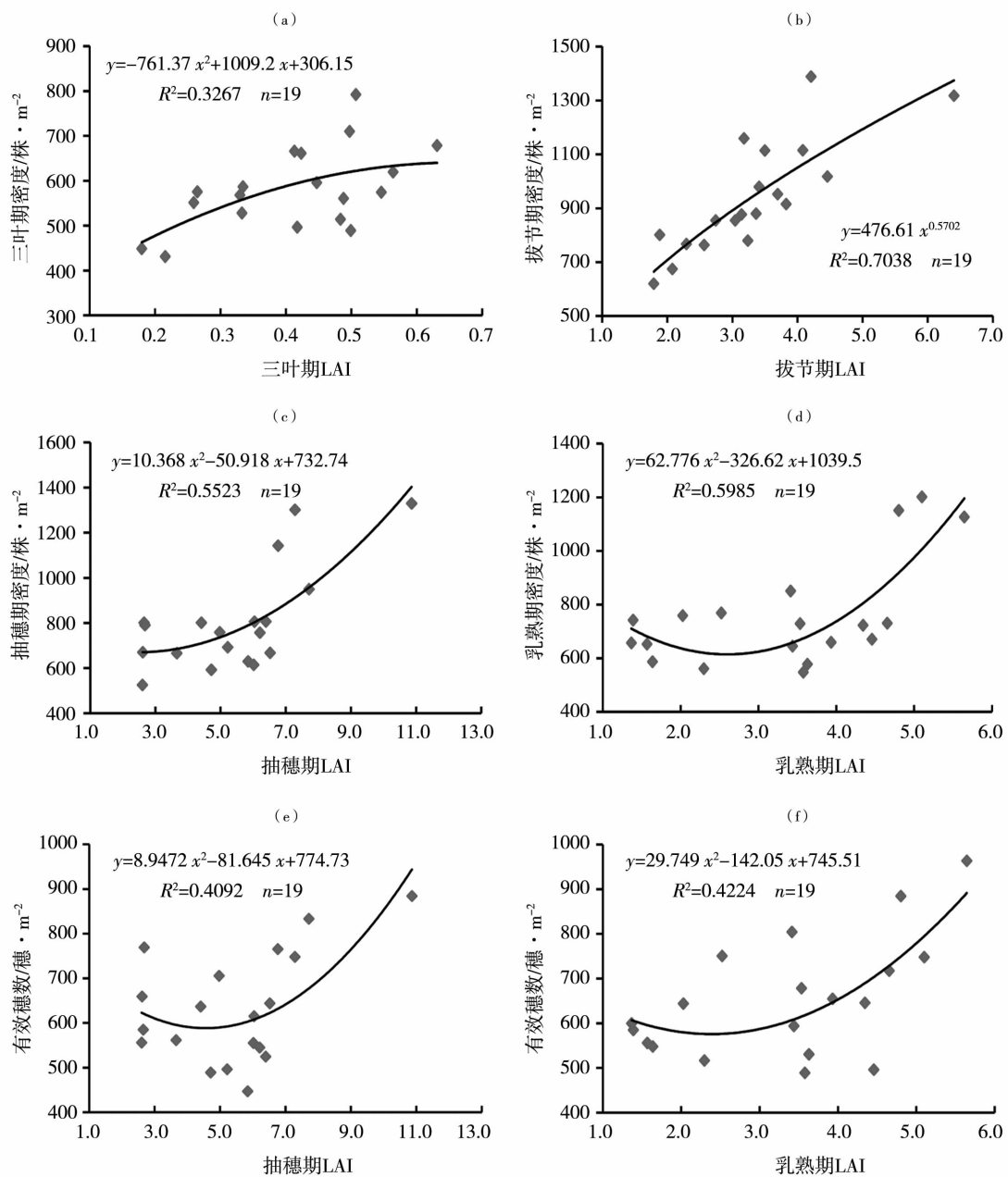


图 2 1994—2012 年永宁县春小麦不同发育期 LAI 与同期密度和单位面积结实穗数的关系

Fig. 2 Relationship between LAI and plant density and panicles per unit area at different growth stages in Yongning County of Ningxia during 1994 - 2012

效穗数多。乳熟期部分叶片枯黄,密度比抽穗期略下降, LAI 也开始下降,此时 LAI 与群体密度(图 2d)和单位面积有效穗数(图 2f)也呈曲线关系,均通过  $\alpha=0.01$  的显著性检验。乳熟期 LAI 越大,密度越大。因此可用抽穗期至乳熟期间的 LAI 估测群体密度和有效穗数,为用 MODIS 植被指数估测小麦密度提供了依据。

### 2.2.3 不同生育期 LAI 与小麦产量及产量构成要素的关系

小麦遥感估产建立在植被指数能反映作物长势

的基础上,需验证小麦 LAI 与产量的关系是否显著。图 3 给出不同发育期 LAI 与小麦产量的关系,可以看出,二者呈二次曲线关系。抽穗期、乳熟期的 LAI 能很好地模拟小麦产量,二者的复相关系数分别为 0.848 和 0.542,分别通过  $\alpha=0.001$  和  $\alpha=0.05$  的显著性检验。小麦产量的高低与抽穗至乳熟阶段的 LAI 关系十分密切, LAI 越大,产量越高,这为利用 MODIS 影像资料构建植被指数估算小麦单产提供了依据。

图 4 给出小麦抽穗期、乳熟期 LAI 与小麦产量

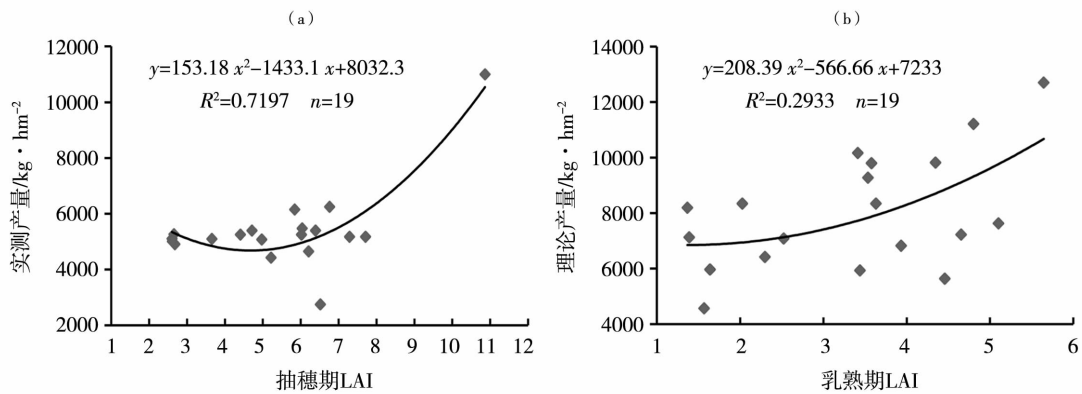


图 3 1994—2012 年永宁县春小麦抽穗期 LAI 与实测产量(a)及乳熟期 LAI 和理论产量(b)的关系  
Fig. 3 The relationship between LAI at heading stage and the real yield (a) and LAI at milk ripening stage and theoretical yield (b) in Yongning County of Ningxia during 1994 - 2012

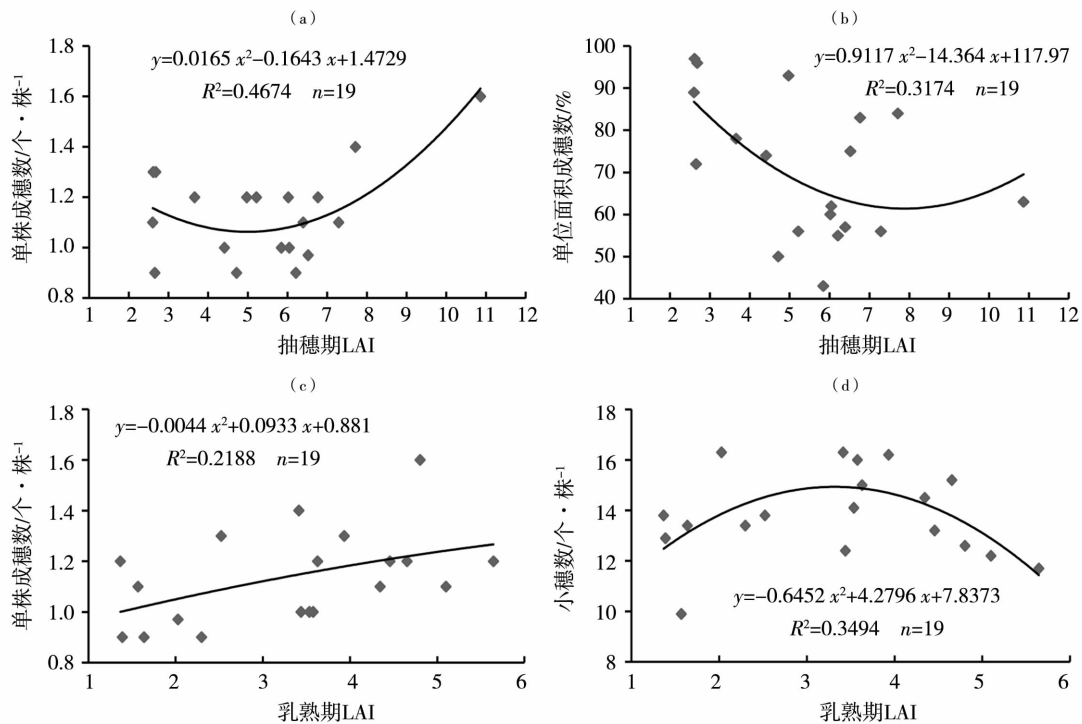


图 4 1994—2012 年永宁县春小麦抽穗期(a,b)、乳熟期(c,d) LAI 与小麦产量结构的关系  
Fig. 4 Relationship between LAI at heading stage (a, b), milk stage (c, d) and wheat yield component in Yongning County of Ningxia during 1994 - 2012

结构的关系。可以看出,抽穗期 LAI 与单株成穗数(图 4a)和单位面积成穗率(图 4b)均呈二次曲线关系,复相关系数分别为 0.683 和 0.563,分别通过  $\alpha=0.01$  和  $\alpha=0.05$  的显著性检验。说明抽穗期 LAI 越大,单株成穗越多,但单位面积成穗率越低,这是无效分蘖增多所致。乳熟期 LAI 与单株成穗数呈线性正相关(图 4c),但与小穗数呈二次曲线关系(图 4d),复相关系数分别通过  $\alpha=0.05$  和  $\alpha=0.01$  的显著性检验。乳熟期 LAI 越大,单株成穗数越多。结实小穗数在乳熟期 LAI 为 3.4 左右时,结实小穗数最多。LAI 继续增大,小穗数反而减少,说明乳熟期密度过大,因田间光照条件差或争水争肥,小穗退化增多,结实小穗数减少。

### 2.3 基于 MODIS EVI、NDVI 对小麦抽穗期 LAI 及单产的模拟检验

利用遥感作物分类和小麦种植面积提取技

术<sup>[14]</sup>,对永宁县 2005—2010 年春小麦抽穗期 LAI 进行估算,即:

$$\text{LAI} = -543.3\text{EVI}^2 + 395.8\text{EVI} - 65.53 \quad (R^2 = 0.676) \quad (1)$$

$$\text{LAI} = -510.1\text{NDVI}^2 + 530.1\text{NDVI} - 130.9 \quad (R^2 = 0.559) \quad (2)$$

利用抽穗期 LAI 与单产的关系(图 3a),可估算小麦单产( $Y$ ):

$$Y = 153.2\text{LAI}^2 - 1433.1\text{LAI} + 8032.3 \quad (R^2 = 0.719, n = 19) \quad (3)$$

结果(表 4)表明,利用 2005—2010 年 MODIS EVI、NDVI 估算永宁 LAI 基本准确,准确率大多在 90%以上,其中二者的平均绝对误差分别为 8.79% 和 7.66%,说明 NDVI 估算小麦单产的效果稍好于 EVI,即用 MODIS 资料进行小麦估产是可行的。

表 4 基于 MODIS EVI、NDVI 估算 2005—2010 年永宁春小麦抽穗期 LAI 及单产检验

Tab. 4 Estimation of LAI at heading stage and wheat yield by MODIS EVI and NDVI in Yongning County of Ningxia during 2005 - 2010

植被指数	年份	EVI	LAI	模拟 LAI	实产/kg·hm <sup>-2</sup>	估测/kg·hm <sup>-2</sup>	误差/%
EVI	2005	0.39	6.21	6.20	4 813.5	5 030.7	4.51
	2006	0.42	4.71	4.87	5 001.0	4 684.2	-6.33
	2007	0.28	3.66	2.70	4 417.5	5 279.4	19.51
	2008	0.36	6.02	6.55	4 750.5	5 212.1	9.72
	2009	0.35	7.71	6.45	4 713.0	5 156.2	9.40
	2010	0.30	2.68	4.31	4 551.0	4 699.4	3.26
NDVI	2005	0.48	6.21	6.02	4 813.5	4 954.1	2.92
	2006	0.58	4.71	4.96	5 001.0	4 690.9	-6.20
	2007	0.43	3.66	2.73	4 417.5	5 263.6	19.15
	2008	0.47	6.02	5.57	4 750.5	4 799.0	1.02
	2009	0.51	7.71	6.77	4 713.0	5 350.2	13.52
	2010	0.46	2.68	5.01	4 551.0	4 695.4	3.17

## 3 结论与讨论

(1)不同发育期的 LAI 能反映小麦株高、密度和单位面积有效穗数。株高可在抽穗至乳熟阶段用 LAI 估测,密度从三叶期至乳熟期间均可用同期 LAI 监测,以拔节至乳熟的旺盛生长阶段关系最好。单位面积有效穗数可用抽穗至乳熟阶段的 LAI 估测,以抽穗期 LAI 的估测效果最好。这为利用 MODIS TERRA/AQUA 资料构建的植被指数监测小麦株高、密度和估测有效穗数提供了依据。

(2)小麦抽穗至乳熟期间的 LAI 能较好地反映产量的变化,此期间 LAI 越大,小麦产量越高。抽穗期线性、乳熟期非线性关系均达到极显著,表明在小麦成熟前,通过测定小麦群体 LAI 可以估测产量,也可采取地面小麦冠层高光谱测定值构建的植被指数反演 LAI,利用 LAI 与产量的线性、非线性关系估测单产。依据 LAI 与产量关系密切的原理,实现基于 MODIS TERRA/AQUA 卫星影像资料构建的各类植被指数开展大面积遥感估产也是可行的。当然,小麦灌浆期也是决定最终产量的关键时期,此时 LAI

下降很快,用遥感估产很不稳定,但可以通过小麦干热风遥感估测方法估测单产损失,进行订正,以提高后期遥感估产的准确度。

(3) LAI 的变化反映了小麦长势好坏,而小麦长势与产量的关系密切。如果在小麦不同生育阶段能用遥感资料构建的 NDVI、EVI 植被指数估测小麦群体 LAI<sup>[15]</sup>,或者根据张学艺等<sup>[16]</sup>的 LAI 积温推算模型估算群体 LAI,就可以通过 LAI 与小麦生长性状的关系监测各地小麦群体长势。如果在小麦抽穗至灌浆前期的叶面积相对稳定时期,即最大叶面积时段通过 MODIS 影像资料构建的植被指数反演 LAI,就可以利用 LAI 与密度和产量的关系模型估测出小麦最大密度和产量。如果小麦受旱导致萎蔫、下部叶片枯黄,或者分蘖减少,可通过遥感反演的 LAI 动态变化反映出来<sup>[17]</sup>。值得注意的是抽穗至乳熟期的 LAI 估产模型没有反映出灌浆中后期天气对产量的影响,如果灌浆期出现干热风天气,可通过刘静等<sup>[18]</sup>建立的春小麦干热风遥感监测方法估测产量损失,对估产结果进行订正。这些基于 MODIS 和冠层高光谱和 MODIS 资料的 LAI 估算、干旱、干热风模型已经完成,干旱、干热风遥感监测已投入业务,因此,采用 MODIS 遥感手段,根据本文的 LAI 与小麦生长性状和产量的关系估测小麦单产,理论上可行。

#### 参考文献

- [1] 李思佳,孙艳楠,李蒙,等. 国内外农作物遥感估产的研究进展[J]. 世界农业,2013(5):125-127,131.
- [2] 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.
- [3] 张凯,王润元,王小平,等. 黄土高原春小麦叶面积指数与高光谱植被指数相关分析[J]. 生态学杂志,2008,27(10):1692-1697.
- [4] 唐怡,黄文江,刘良云,等. 株型对冬小麦冠层叶面积指数与植被指数关系的影响研究[J]. 干旱地区农业研究,2006,24(5):130-136.
- [5] 薛利红,曹卫星,罗卫红,等. 光谱植被指数与水稻叶面积指数相关性的研究[J]. 植物生态学报,2004,28(1):47-52.
- [6] 李凤秀,张柏,宋开山,等. 玉米叶面积指数与高光谱植被指数关系研究[J]. 遥感技术与应用,2007,22(5):586-592.
- [7] 惠凤鸣,田庆久,金震宇,等. 植被指数与叶面积指数关系研究及量化分析[J]. 遥感信息,2003(2):10-12.
- [8] 蒲金涌,姚晓红,尹东,等. 紫花苜蓿及主要粮食作物各生长期叶面积指数及光能利用率比较[J]. 中国农业气象,2005,26(1):31-33.
- [9] 吴朝阳,牛铮. 基于辐射传输的高光谱 VI 与叶绿素浓度及 LAI 的线性关系改进[J]. 植物学通报,2008,25(6):714-721.
- [10] 王登伟,黄春燕,马勤建,等. 棉花高光谱植被指数与 LAI 和地上鲜生物量的相关分析[J]. 中国农学通报,2008,24(3):426-429.
- [11] 张霞,张兵,卫征,等. MODIS 光谱指数监测小麦长势变化研究[J]. 中国图象图形学报,2005,10(4):420-424.
- [12] 张艳楠,牛建明,张庆,等. 植被指数在典型草原生物量遥感估测应用中的问题探讨[J]. 草业学报,2012,21(1):229-238.
- [13] 张学艺,郭建茂,韩颖娟,等. 基于植被指数的宁夏灌区春小麦叶面积指数模型[J]. 中国农业气象,2011,32(2):279-282.
- [14] 张学艺. 基于 EOS/MODIS 的宁夏灌区小麦遥感估产研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2012.
- [15] 张学艺,张磊,黄峰,等. 宁夏灌区春小麦叶面积指数的动态模拟[J]. 干旱地区农业研究,2011,29(1):193-196,205.
- [16] 张学艺,李剑萍,官景得,等. 两种叶面积指数动态模拟方法的对比研究[J]. 国土资源遥感,2011(3):43-47.
- [17] 张磊,刘静,张学艺,等. 宁南山区冬小麦冠层高光谱特征及其对干旱的响应[J]. 干旱地区农业研究,2010,28(2):12-16.
- [18] 刘静,张学艺,马国飞,等. 宁夏春小麦干热风危害的光谱特征分析[J]. 农业工程学报,2012,28(22):189-199.



## Relationship Between LAI and Growth Traits and Yield of Spring Wheat in Irrigated Area of Ningxia

LIU Jing<sup>1,2</sup>, MA Liwen<sup>1,2</sup>, ZHANG Xueyi<sup>1,2</sup>

(1. *Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions, CMA, Yinchuan 750002, China;*

2. *Ningxia Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Yinchuan 750002, China*)

**Abstract:** In order to provide the basis for using MODIS vegetation index to monitor wheat growth and estimate yield, the variance analysis of growth characteristic, yield and yield components of two varieties of spring wheat was carried out by using the observation data of two varieties of spring wheat from 1994 to 2012 in Yongning Agrometeorological Experiment Station of Ningxia, then the samples with no significant difference between the two varieties of spring wheat were selected to establish the relationship between LAI at different growth stages and plant height, density, yield, panicle number per unit area, grain number per spike and 1 000 grain weight. The results show that LAI could reflect the changes of the plant height, density and the number of panicles per unit area at different development stages. The plant height could be estimated by using LAI from the heading to milking stage, the plant density could be monitored by LAI from the trefoil to milky stage, and the monitoring effect was best from the jointing to milking stage. The number of effective panicles per unit area could be estimated by LAI from the heading to milking stage, which was best at heading stage. LAI from the heading to milking stage could reflect the change of wheat yield better. The vegetation index, which can be constructed by wheat canopy hyperspectral measurement value or by MODIS Terra/Aqua data, could be used to estimate LAI, and then the yield could be estimated by the relationship between LAI and yield. The wheat growth could be monitored by the relationship between LAI and plant height and density of wheat if LAI was estimated by remote sensing vegetation index at different growth stages. LAI retrieved from MODIS vegetation index was relatively stable during the heading to early filling stage and it could be used to estimate the wheat density, yield and yield components.

**Key words:** wheat; LAI; growth characters; yield; yield components; vegetation index