

不同株型品种冬小麦 *NDVI* 变化特征及产量分析*

冯美臣 杨武德**

(山西农业大学农学院 太谷 030801)

摘要 冬小麦不同株型品种和灌溉类型是影响产量遥感估测的重要因素,对二者的实时监测可以提高产量的估测精度。结合遥感数据(MODIS数据)与非遥感数据(GPS数据和外业调查资料),研究了不同株型品种冬小麦在水、旱地条件下归一化差值植被指数(*NDVI*)的动态变化特征,分析了不同生育时期*NDVI*与产量之间的关系。结果表明:冬小麦不同株型品种间*NDVI*随生育时期的变化具有明显一致性,呈“小-大-小”变化趋势;拔节期至孕穗期不同株型品种冬小麦*NDVI*差异显著,披散型品种高于紧凑型品种,该时期为准确识别冬小麦株型的最佳时期。水、旱地同一种株型的冬小麦品种在整个生育时期*NDVI*均值差异较显著,均表现为水地冬小麦高于旱地冬小麦,尤以抽穗初期最为明显。水旱地冬小麦不同生育时期*NDVI*与产量相关性均以抽穗初期为最高,但用抽穗初期和灌浆期*NDVI*与产量的复合回归方程进行产量预测比用抽穗初期*NDVI*与产量的回归方程效果好,旱地冬小麦尤为明显。

关键词 冬小麦 株型 披散型品种 紧凑型品种 灌溉类型 *NDVI* 小麦产量

中图分类号: S512; S127 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2011)01-0087-06

Changes in *NDVI* and yield of winter wheat cultivars with different plant types

FENG Mei-Chen, YANG Wu-De

(College of Agronomy, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

Abstract Plant type and irrigation scheme are key influencing factors of real-time yield estimation and monitoring of winter wheat in precision farming. In this paper, MODIS remote sensing data were used in combination with GPS and ground-truth non-remote sensing data to determine the dynamics of normalized difference vegetation index (*NDVI*) of winter wheat cultivars with different plant types under irrigation and non-irrigation conditions. The relationship between *NDVI* and yield of different winter wheat cultivars in different growth stages was then analyzed. Results showed the trends in *NDVI* with developmental stages of different wheat cultivars were same, following a low-high-low curve. There were obvious differences in *NDVI* from jointing to booting stages for different cultivars, and *NDVI* for cultivars with horizontal plant types was higher than that for cultivars with erect plant types. It implied that the jointing-to-booting stage was the best period for identifying plant types of winter wheat cultivars. Even for the same cultivar, mean *NDVI* was obviously different at each growth stage for irrigated and non-irrigated lands. *NDVI* for irrigated winter wheat was higher than that for non-irrigated winter wheat, with a notable difference especially at the early heading stage. At early heading stage, *NDVI* was strongly correlated with yield in irrigated and non-irrigated lands. However, regression equation based on *NDVI* both in the early heading and filling stages gave better prediction for wheat yield than that based on *NDVI* only in the early heading stage. This was especially the case for non-irrigated wheat fields.

Key words Winter wheat, Plant type, Cultivar with horizontal plant type, Cultivar with erect plant type, Irrigation scheme, *NDVI*, Wheat yield

(Received March 26, 2010; accepted May 28, 2010)

随着遥感技术的发展,遥感图像在农作物长势监测和产量估测上的应用越来越广泛^[1-7],如何提

高估测精度将成为研究的重点。遥感图像上的植被信息,主要通过绿色植物叶片的光谱特征差异及动

* 山西省科技攻关项目(2006031114)、山西省气象局开放式研究基金项目(SX053001)和山西农业大学科研启动基金(XB2009016)资助

** 通讯作者: 杨武德(1960-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事作物生态和农业信息技术研究。E-mail: sxauywd@126.com

冯美臣(1978-),男,博士,讲师,主要从事作物生态和农业信息技术研究。E-mail: fmc101@163.com

收稿日期: 2010-03-26 接受日期: 2010-05-28

态变化而反映出来。其光谱特征受叶片颜色、叶片结构及水分状况、叶片的生理生化性质、冠层结构等因素的影响,而株型是影响植株冠层结构的主要因素,因此,株型的差异也是导致冠层光谱响应差异的主要因素^[8]。

在作物的农学参数遥感提取中,一般采用光谱植被指数(Spectral vegetation index, *SVI*),是由卫星遥感多光谱数据经空间转换或不同波段间线性或非线形组合构成的对植被有一定指示意义的指标^[4]。而归一化差值植被指数(Normalized difference vegetation index, *NDVI*)是最常用的一种植被指数,对植被生长状况、生产率及其他生物物理、生物化学特征敏感,广泛应用于土地利用覆盖监测、植被覆盖密度评价、作物识别和作物产量预报等方面^[9]。植被指数的变化与作物生长状况、发育时期关系密切^[10]。

由于作物在生长期中,各生长阶段的生长状况可以用叶面积指数和生物量表示^[11-12],而植被指数与作物叶面积指数和生物量呈正相关,因此可以利用冬小麦生长期中植被指数进行长势监测,其中以 *NDVI* 最为常用^[13-14]。

裴志远等^[15]进行了多时相 *NDVI* 时空特征提取的研究,并将其反映为相关的特征参数,探讨了作物长势监测模型的建立。江东等^[4]利用气象卫星 NOAA/AVHRR 资料,反演农作物生育期内每日和每旬的 *NDVI* 数据,分析了 *NDVI* 时间曲线的波动和农作物生长发育阶段及农作物长势的响应规律,并探讨了 *NDVI* 在冬小麦各个生育期的积分值与农作物单产之间的相互关系。杨小唤等^[16]研究了不同作物 MODIS-*NDVI* 的动态变化特征,并进行多作物播种面积的提取。毕晓丽等^[17]应用起伏型时间序列法,对中国及其典型省份的 *NDVI* 月动态变化进行模拟,拟合精度较高。冯美臣等^[18]利用 MODIS 数据分析了 *NDVI* 时间曲线与冬小麦长势的响应规律,并利用 *NDVI* 斜率变化来监测水、旱地冬小麦的长势。谭昌伟等^[19]通过研究不同株型夏玉米的群体冠层反射光谱,表明随着夏玉米生育进程推进,其光谱差异程度及差异范围不同,以抽雄期差异最大。卢艳丽等^[8]研究了不同株型品种冬小麦的光谱响应以及田间植被覆盖度的差异,探讨了利用冠层光谱反射率、光谱特征参量 *NDVI* 及植被覆盖度识别小麦株型的方法。

本文利用植被指数与作物长势相关规律,探讨了不同株型品种冬小麦生育期 *NDVI* 动态变化特征,通过对水地、旱地不同株型品种冬小麦 *NDVI* 之间的差异分析,以期实现 2 种株型品种冬小麦的识别,并揭示冬小麦各生育时期 *NDVI* 与产量的关系,这

对于利用遥感信息监测冬小麦生长状况,提高产量估测精度具有重要意义。

1 研究区域概况与研究方法

1.1 研究区域概况

供研究的水地冬小麦主要分布在山西省晋中市的西部平原,面积 27 406.7 hm^2 ,旱地冬小麦主要分布于晋中市各县丘陵区,面积 7 393.3 hm^2 。晋中市位于山西省中部,北纬 36°39'~38°06',东经 111°25'~114°05'之间,东依太行,西傍汾河,北与省会太原毗邻。全市山区广阔、平川狭小,全区面积 16 404 km^2 ,山区面积占全市总面积的 83.3%,平川面积仅占 16.7%。各地高低差别悬殊,山区海拔在 1 000~2 500 m 之间,丘陵区海拔在 800~1 200 m 之间。

晋中市属温带大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,夏季炎热多雨;冬夏温差较大,夏季降水集中。年均气温 9℃ 左右,1 月平均气温 -8~-7℃,7 月平均气温 23℃ 左右。年均降水量约 540 mm,大致是东南多、西北少。种植的农作物主要有冬小麦、玉米、大豆等,近年来,研究区冻害时有发生。2006 年 4 月 12 日部分地区气温陡降,祁县等地最低气温达 -4.9℃,地表最低温度达到 -7.2℃,部分冬小麦遭受冻害。

1.2 数据采集

利用 CD 91200L 数字化仪对晋中市 1:200 000 边界图和行政分区图等进行矢量化。于冬小麦收获期在典型地段设置 50 m×50 m 样方进行产量构成(单位面积穗数、穗粒数、千粒重)调查和大区测产,重复 3 次,用于大面积遥感估产结果的精度检验。所选样地小麦主要为披散型品种“京 9428”和紧凑型品种“京 411”。同时,利用 GPS 对该区域进行准确定位,测定其经纬度,通过已处理遥感图像,进行冬小麦产量与卫片绿度值的对照,为冬小麦产量监测模型的建立做准备。

1.3 MODIS 数据预处理

MODIS 数据在作物长势监测中有 TM、NOAA/AVHRR 无法比拟的优势,具有较高的时间分辨率、高光谱分辨率以及适中的空间分辨率等特点。本文采用 LPDAAC 提供的 8 d 合成的 MODIS LSR 数据,空间分辨率为 250 m×250 m,时间为 2006 年 1~7 月,定购网站为 <http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>。

预处理过程:(1)图像镶嵌:利用 ENVI 软件提供的地理坐标定位的 Mosaicking 方法进行图像镶嵌处理,利用 Feathering 功能进行边缘羽化。(2)几何校正:利用 MODIS 数据自身头文件所携带的地理坐

标定位信息进行校正, 采用 Cubic convolution 方法进行重采样。(3)大气校正: 利用直方图法对图像进行大气校正。(4)研究区域的提取: 将矢量图输入到 ENVI 中经投影变换到和 MODIS 数据具有统一的坐标系中, 利用 ENVI 的 MASK 功能将其制成整个晋中市区域的模板, 模板中晋中市范围内为 1, 范围为 0。应用模板对 MODIS 数据进行裁剪, 得到晋中市的 MODIS 数据影像资料, 存储为 ENVI 标准文件。

1.4 MODIS-NDVI 的计算

MODIS-NDVI 是在 NOAA/AVHRR 植被指数的基础上改进设计的, 和 NOAA/AVHRR 相比具有较高的空间分辨率, 可以更精确地进行植被动态监测^[20]。选取 MODIS 的 1、2 波段, 即 B_1 (红光, 波长为 620~670 nm)、 B_2 (近红外, 波长为 841~876 nm), 为便于计算和显示, 采用公式(1), 将 NDVI 的计算结果扩大 100 倍:

$$NDVI=100 \times (B_2-B_1)/(B_1+B_2) \quad (1)$$

2 结果与分析

2.1 不同株型冬小麦 NDVI 随生育时期的动态变化

NDVI 对作物长势差异有很好的反映^[21]。植株株型是影响作物冠层结构的主要因素。晋中市各县试验样点中, 不同株型小麦品种主要有以“京 9428”为代表的披散型和以“京 411”为代表的紧凑型品种, 并且 2 个品种冬小麦生育期接近。直观上, 紧凑型品种的叶片分布主要呈直立状, 披散型品种的叶片分布主要呈水平状。

由图 1 可以看出, 水地、旱地 2 个品种冬小麦 NDVI 均值时序变化趋势表现较好的一致性。在冬小麦生长前期即返青期(3月25日)至起身期(4月7日), 水地与旱地冬小麦 NDVI 相近, 拔节期(4月16日)后营养生长进一步加快, 茎生叶全部建成, 叶面积增大, 光合作用加强, NDVI 显著增加。旱地冬小麦

随着小麦的生长发育, 与水地 NDVI 的差值越来越明显, 到抽穗初期(5月18日)二者均达到最大, 抽穗期后随着植株的变黄, 叶绿素开始减少, 冬小麦 NDVI 逐渐变小。

2 个冬小麦品种 NDVI 数量存在明显差异, 冬小麦孕穗以前, NDVI 披散型品种大于紧凑型品种, 以冬小麦拔节期至孕穗期(5月8日)较为明显。从拔节期开始, 冬小麦植被覆盖度逐渐增大, 随着生长发育的加快, 披散型品种叶片向外扩展比较显著, 紧凑型品种叶片直立上举, 此时期品种株型特征明显, 2 种株型小麦品种 NDVI 之间差异显著。孕穗期是冬小麦生长最旺盛的时期, 与拔节期相比, 2 种株型品种冬小麦的冠层 NDVI 呈上升趋势, 且依然是披散型品种大于紧凑型品种。随着生育期推进, 冬小麦继续生长, 2 种株型品种冬小麦的 NDVI 差异不明显。抽穗后, NDVI 披散型品种与紧凑型品种几乎相同, 其原因是抽穗以后, 叶片对小麦冠层光谱的影响不再重要, 此时穗成为影响冠层光谱的主要因素, 株型结构的差异不再成为冠层光谱特征差异的主要因素。因此, 拔节期至孕穗期是冬小麦披散型品种与紧凑型品种 NDVI 差异最显著的时期, 也是准确识别冬小麦株型的最佳时期, 这与卢艳丽等^[8]、黄文江等^[22]利用高光谱遥感技术进行小麦株型识别的结论相一致。

从图 2 可以看出, 晋中市部分地区由于受到冻害, NDVI 在整个生育期出现 2 个峰值。不同生育时期 NDVI 变化较大, 从返青期开始, 随着小麦生长的进一步加强, NDVI 急剧上升, 起身期前后达到第 1 峰值, 而后降低, 至拔节期达谷底值, 其后 NDVI 逐渐升高, 到 5 月中旬, 冬小麦的营养器官生长旺盛, 叶面积趋于最大, NDVI 达到最大值, 此时, 冬小麦正处于孕穗末期。6 月份是冬小麦乳熟并最终成熟的阶段, 也是产量形成的关键阶段, 此时, 叶片中叶绿素含量降低, 叶片变黄, NDVI 逐渐降低。

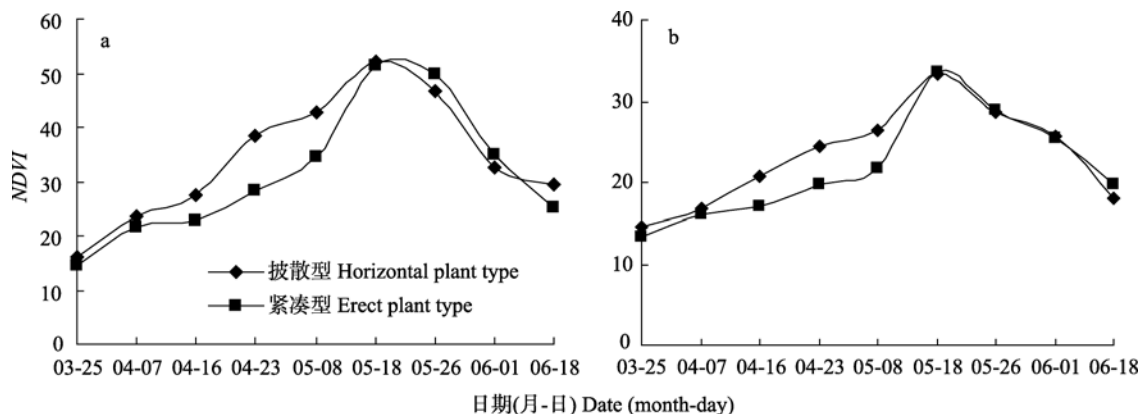


图 1 水地(a)、旱地(b)不同株型品种冬小麦 NDVI 随生育时期的变化曲线

Fig. 1 NDVI dynamics with growth stages of winter wheat cultivars with different plant types in irrigated land (a) and non-irrigated land (b)

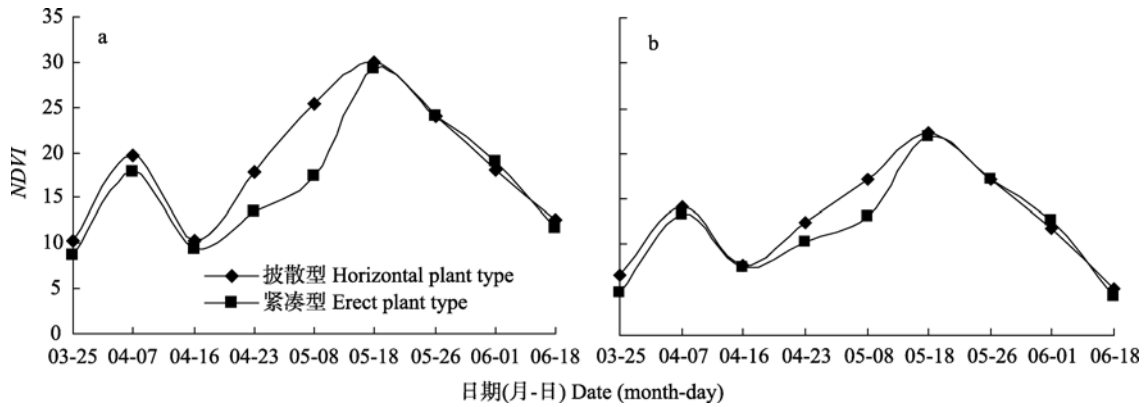


图 2 水地(a)、旱地(b)不同株型冬小麦 NDVI 冻害发生后的变化
 Fig. 2 Changes of NDVIs of winter wheat cultivars with different plant types in irrigated land (a) and non-irrigated land (b) after freeze injury

不同株型水地、旱地冬小麦 NDVI 谷底值的出现是由于 2006 年 4 月 12 日晋中市出现 1 次罕见的强降雪过程, 造成部分地区气温陡降, 以祁县为例最低气温-4.9, 地表最低温度达到-7.2。降温前冬小麦刚好处于拔节期末, 抗寒性显著降低, 突然降温致使冬小麦受冻害, 叶片出现烫伤状, 细胞失去膨压, 甚至组织柔软, 叶色变色, NDVI 降低。旱地冬小麦对低温表现较为敏感, 其 NDVI 明显低于水地冬小麦。与未受冻害的冬小麦相比其最大 NDVI 受到明显影响, 总体降低 40%左右。此时的 NDVI 已不是反映冬小麦生物量的大小, 而是反映作物的活性强弱。NDVI 的突变是冻害发生的特征^[23]。同时, 从图 2 可以看出, 4 月 23 日冬小麦的 NDVI 明显低于 4 月 7 日, 表明冬小麦的生长仍未恢复到冻害发生前的水平, 即生长恢复度^[24]较低, 冻害程度较为严重。

虽然冬小麦在遭受冻害后 NDVI 发生了明显突

变, 但 2 种株型从拔节期至孕穗期仍然存在明显差异, 利用此时期的 NDVI 仍然能进行株型的区别。

2.2 不同株型冬小麦各生育期 NDVI 与产量相关性分析

表 1 揭示了晋中地区水、旱地披散型和紧凑型 2 种不同株型冬小麦 NDVI 与其产量在整个生育期的相关性。由表 1 可知, 2 种株型冬小麦品种 NDVI 与产量具有显著正相关性, 且不同生育阶段均呈正相关关系, 相关程度随生育时期不同而不同。随着生育期的推进, 2 种株型冬小麦品种 NDVI 与产量的相关性基本表现为先增大后减小。构建模型的目的是预测, 因此可以利用 R^2 进行模型检测^[25]。以抽穗初期 NDVI 与产量相关性最大, 水地紧凑型 R^2 为 0.962, 披散型 R^2 为 0.891, 旱地紧凑型 R^2 为 0.778, 披散型 R^2 为 0.773, 该时期可作为冬小麦产量估测的最佳时期。这主要是由于冬小麦抽穗开花以后, 穗所占比

表 1 不同株型品种冬小麦各生育期 NDVI 与产量(y)的相关分析

Tab. 1 Correlation analysis between NDVI and yield (y) of winter wheat with different plant types in different growth stages

生育期 Growth stage	株型 Plant type	水地 Irrigated land			旱地 Non-irrigated land		
		$y=ax+b$	R	R^2	$y=ax+b$	R	R^2
返青期 Re-green stage	披散型 Horizontal	$y=4\ 173.4NDVI+3\ 899.7$	0.138	0.019	$y=1\ 970.6NDVI+2\ 724.7$	0.138	0.019
	紧凑型 Erect	$y=5\ 795.5NDVI+3\ 487.2$	0.293	0.086	$y=1\ 263.2NDVI+2\ 196.8$	0.173	0.030
起身期 Rising stage	披散型 Horizontal	$y=6\ 984.7NDVI+2\ 144.3$	0.539	0.291	$y=1\ 635.6NDVI+2\ 491.0$	0.465	0.216
	紧凑型 Erect	$y=13\ 237.0NDVI+1\ 447.2$	0.631	0.398	$y=2\ 466.7NDVI+1\ 809.0$	0.485	0.235
拔节期 Jointing stage	披散型 Horizontal	$y=4\ 614.1NDVI+3\ 131.0$	0.631	0.398	$y=3\ 300.0NDVI+2\ 463.8$	0.546	0.298
	紧凑型 Erect	$y=4\ 770.7NDVI+2\ 994.6$	0.559	0.313	$y=4\ 323.1NDVI+1\ 803.2$	0.511	0.261
孕穗期 Booting stage	披散型 Horizontal	$y=6\ 473.2NDVI+2\ 112.7$	0.769	0.592	$y=2\ 453.0NDVI+2\ 339.7$	0.640	0.409
	紧凑型 Erect	$y=7\ 783.3NDVI+2\ 251.5$	0.865	0.749	$y=4\ 823.0NDVI+1\ 464.7$	0.752	0.565
抽穗初期 Initial heading stage	披散型 Horizontal	$y=5\ 856.6NDVI+1\ 698.8$	0.944	0.891	$y=2\ 553.8NDVI+2\ 258.6$	0.879	0.773
	紧凑型 Erect	$y=4\ 590.0NDVI+2\ 014.4$	0.981	0.962	$y=6\ 271.7NDVI+994.9$	0.882	0.778
灌浆期 Filling stage	披散型 Horizontal	$y=6\ 682.4NDVI+2\ 369.3$	0.803	0.645	$y=6\ 136.4NDVI+2\ 055.2$	0.752	0.566
	紧凑型 Erect	$y=8\ 960.2NDVI+1\ 268.1$	0.905	0.819	$y=7\ 931.8NDVI+1\ 540.9$	0.771	0.595
乳熟期 Maturity stage	披散型 Horizontal	$y=5\ 773.0NDVI+3\ 020.4$	0.381	0.145	$y=1\ 700.0NDVI+2\ 732.5$	0.161	0.026
	紧凑型 Erect	$y=1\ 366.7NDVI+3\ 528.3$	0.155	0.024	$y=4\ 000.0NDVI+2\ 148.3$	0.288	0.083

例增大,穗对冠层光谱的贡献增加,叶片叶绿素上升为主要因子,成为影响产量形成的关键,此时作物群体趋于稳定,故利用 NDVI 等进行估产效果较好^[26]。其后随着叶片叶绿素的减少,叶片逐渐变黄,灌浆期和乳熟期 NDVI 与产量相关性逐步减弱。除拔节期和乳熟期外,2 种株型品种冬小麦在其他各生育时期紧凑型品种 R^2 均大于披散型,即紧凑型品种 NDVI 与产量相关性优于披散型小麦品种。

除返青期和乳熟期外,其他时期旱地冬小麦 NDVI 与产量相关程度均小于水地冬小麦;不同生育时期水旱地 NDVI 也有较大差异,且水地产量处于高产田水平,而旱地产量大都在 2 075~2 925 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。这与水旱地栽培管理措施和水平不一致有关,尤其在小麦生长后期旱地水源供应不足,抽穗和灌浆期是小麦水分需求最大、生长最关键的时期,若小麦抽穗、灌浆期水分供给不足就会严重影响小麦抽穗质量和灌浆速度及效率,进而影响最终产量。

抽穗初期水地披散型和紧凑型品种实际产量和拟合产量如图 3 所示。利用抽穗初期 NDVI 进行冬小麦产量预测时,虽然具有指示产量的意义,但因

该时期 NDVI 反映的是抽穗初期冬小麦的长势情况,对最终产量反映不够全面。因此从冬小麦产量形成的生理基础出发,考虑到后期可能出现的干旱等环境因子对冬小麦产量的影响,构建冬小麦 NDVI 与产量的复合模型(表 2),用抽穗初期和灌浆期 NDVI 与产量的复合回归方程进行产量预测比用抽穗初期 NDVI 与产量的回归方程效果好,旱地冬小麦尤为明显。

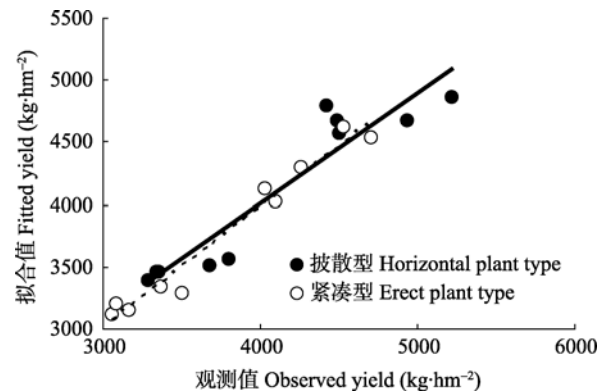


图 3 抽穗初期水地不同株型品种冬小麦实际产量与拟合产量的关系

Fig. 3 Relationship between observed and fitted yield of winter wheat cultivars with different plant types at the early heading stage in irrigated land

表 2 不同株型品种冬小麦抽穗初期和灌浆期 NDVI ($NDVI_{抽}$ 、 $NDVI_{灌}$) 与产量 (Y) 的复合模型

Tab. 2 Combined models of NDVI both in early heading and filling stages and yield (Y) of winter wheat cultivars with different plant types

灌溉类型 Irrigated scheme	株型 Plant type	回归方程 Regression equation	R	R^2
水地 Irrigated land	披散型 Horizontal	$Y=11\ 306.4NDVI_{抽}-7\ 696.9NDVI_{灌}+1\ 457.9$	0.984	0.968
	紧凑型 Erect	$Y=4\ 479.2NDVI_{抽}+256.4NDVI_{灌}+1\ 985.2$	0.987	0.974
旱地 Non-irrigated land	披散型 Horizontal	$Y=7\ 635.1NDVI_{抽}-2\ 986.5NDVI_{灌}+995.5$	0.942	0.887
	紧凑型 Erect	$Y=4\ 656.7NDVI_{抽}+3\ 910.2NDVI_{灌}+973.6$	0.966	0.933

3 结论与讨论

晋中市冬小麦各生育时期 NDVI 与产量具有相关性,但不同生育时期相关性差异明显,以抽穗初期相关性最好,因此抽穗初期可作为产量估算的最佳时期。同时,根据冬小麦产量形成的生理基础,以及后期可能出现的影响因子,构建的 NDVI 与产量复合模型拟合优度高于单变量模型。

本研究结果表明,拔节期至孕穗期是冬小麦披散型品种与紧凑型品种 NDVI 差异最显著的时期,水旱地均表现为披散型高于紧凑型,该时期是 2 种株型品种的最佳识别时期。2 种不同株型品种冬小麦在抽穗初期 NDVI 较为接近,但二者产量却有一定差异,因此利用该时期的 NDVI 进行产量估测不能完全代表整个区域的产量水平,影响估产的精度。故冬小麦产量的估测应建立在株型识别的基础上,以提高估产精度。

本研究采用具有较高时间分辨率、高光谱分辨率以及适中空间分辨率的 MODIS 数据,初步分析了晋中市水、旱地不同株型品种冬小麦 NDVI 的动态变化特征,根据该变化特征可以推测冬小麦的生长发育状况,监测冬小麦长势。同时,分析了不同生育时期冬小麦 NDVI 与产量的关系,为进一步提高冬小麦估产精度提供了依据。但是,NDVI 与产量的关系涉及多种因素,今后应继续探讨不同生态区域条件下 NDVI 与产量的关系。

MODIS 数据分辨率为 250 m,与 NOAA 数据的 1 000 m 分辨率相比,空间分辨率得到较大提高,监测结果也有较大程度的改善。但由于研究区冬小麦种植分布的不均匀性及近年来种植面积的下降低星种植等,在解译遥感影像时必然存在“混合像元”、“异物同谱”、“同物异谱”等问题,对小麦的监测结果产生一定程度的影响。因此,在条件允许的范围内应该选择更高分辨率的遥感数据,以提高

作物产量的估测精度。在研究过程中,研究区发生了一定范围和程度的冻害,对产量造成了一定影响,最终影响产量的估测精度。另外,在冬小麦生育后期常会出现干热风和倒伏等自然灾害,造成冬小麦的减产,因此本研究所建立的产量模型还有待于进一步的校验和完善。

参考文献

- [1] Liu L Y, Wang J H, Bao Y S, et al. Predicting winter wheat condition, grain yield and protein content using multi-temporal EnviSat-ASAR and Landsat TM satellite images[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(4): 737-753
- [2] Sergio M, Vicente S, Jose M, et al. Early prediction of crop production using drought indices at different time-scales and remote sensing data: Application in the Ebro alley (north-east Spain)[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(3): 511-518
- [3] Labus M P, Nielsen G A, Lawrence R L, et al. Wheat yield estimates using multi-temporal *NDVI* satellite imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(20): 4169-4180
- [4] 江东, 王乃斌, 杨小唤, 等. *NDVI* 曲线与农作物长势的时序互动规律[J]. *生态学报*, 2002, 22(2): 247-253
- [5] Vellidis G, Tucker M A, Perry C D, et al. Predicting cotton lint yield maps from aerial photographs[J]. *Precision Agriculture*, 2004, 5(6): 547-564
- [6] Thenkabail P S. Biophysical and yield information for precision farming from near-real-time and historical Landsat TM images[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(14): 2879-2904
- [7] Manjunath K R, Potdar M B, Purohit N L. Large area operational wheat yield model development and validation based on spectral and meteorological data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(15): 3023-3038
- [8] 卢艳丽, 李少昆, 王纪华, 等. 冬小麦不同株型品种光谱响应及株型识别方法研究[J]. *作物学报*, 2005, 31(10): 1333-1339
- [9] 彭斌, 张树文. 基于 *NDVI* 与 *LAI* 的水稻生长状况研究[J]. *东北测绘*, 2002, 25(4): 16-19
- [10] 毛学森, 张永强, 沈彦俊. 冬小麦植被指数变化及其影响因素初探[J]. *中国生态农业学报*, 2003, 11(2): 35-36
- [11] Benedetti R, Rossini P. On the use of *NDVI* profiles as a tool for agricultural statistics: The case study of wheat yield estimate and forecast in Emilia Romana[J]. *Remote Sensing Environment*, 1993, 45(3): 311-326
- [12] Rasmussen M S. Operational yield forecast using AVHRR *NDVI* data: Reduction of environmental and inter-annual variability[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(5): 1059-1077
- [13] 李郁竹. 冬小麦卫星遥感动态监测及估产[M]. 北京: 气象出版社, 1993: 105-107
- [14] 吴炳方. 全国农情监测与估产的运行化遥感方法[J]. *地理学报*, 2000, 55(1): 23-35
- [15] 裴志远, 杨邦杰. 多时相归一化植被指数 *NDVI* 的时空特征提取与作物长势模型设计[J]. *农业工程学报*, 2000, 16(5): 20-22
- [16] 杨小唤, 张香平, 江东. 基于 MODIS 时序 *NDVI* 特征值提取多作物播种面积的方法[J]. *资源科学*, 2004, 26(6): 17-22
- [17] 毕晓丽, 覃德华, 葛剑平. *NDVI* 起伏型时间序列模型初探[J]. *应用与环境生物学报*, 2004, 10(4): 399-401
- [18] 冯美臣, 杨武德, 张东彦, 等. 基于 TM 和 MODIS 数据的水旱地冬小麦面积提取和长势监测[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(3): 103-109
- [19] 谭昌伟, 王纪华, 黄文江, 等. 不同株型夏玉米群体冠层反射光谱特征及其应用研究[J]. *遥感技术与应用*, 2004, 19(4): 225-231
- [20] Gitelson A A, Kaufman Y J. MODIS *NDVI* optimization to fit the AVHRR data series-spectral considerations[J]. *Remote Sensing Environment*, 1998, 66(3): 343-350
- [21] 任红艳, 潘剑君, 张佳宝. 不同施氮水平下的小麦冠层光谱特征及产量分析[J]. *土壤通报*, 2005, 36(1): 26-29
- [22] 黄文江, 王纪华, 刘良云, 等. 基于多时相和多角度光谱信息的作物株型遥感识别初探[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(6): 82-86
- [23] 杨邦杰, 王茂新, 裴志远. 冬小麦冻害遥感监测[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(2): 136-140
- [24] Feng M C, Yang W D, Cao L L, et al. Monitoring winter wheat freeze injury using multi-temporal MODIS data[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2009, 8(9): 1053-1062
- [25] Gujarati D N. *Basic econometrics*[M]. 3rd edition. New York: McGraw Hill, 1995
- [26] 刘良云, 王纪华, 黄文江, 等. 利用新型光谱指数改善冬小麦估产精度[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(1): 172-175