

农田春小麦叶面积指数和覆盖度时空变异性研究*

王春梅 顾行发 余 涛 孟庆岩 刘 苗 李玲玲

(中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101)

摘要: 准确获取春小麦叶面积指数和覆盖度的时空变异特征,对春小麦生长参数时空分析至关重要,也是利用遥感准确反演春小麦叶面积指数和覆盖度必须解决的问题,对于尺度转换研究具有十分重要的意义。综合运用传统统计分析方法、地质统计分析方法及时间稳定分析方法,研究了春小麦叶面积指数和覆盖度在不同生育阶段的时空变异特征,并探讨了二者的关系,建立了综合考虑时空特征的春小麦叶面积指数增长模型。研究表明:在研究条件下,春小麦覆盖度和叶面积指数随时间的变化趋势相似,但二者变异系数(CV)的变化趋势明显不同,随着春小麦的不断生长,覆盖度 CV 不断减小,而叶面积指数 CV 则是先增加后减小;春小麦叶面积指数和覆盖度都具有空间结构,其中在播种-分蘖阶段(头水灌溉前)的空间相关距离最大(50~60 m),头水灌溉后,春小麦叶面积指数和覆盖度的空间相关距都减小,其中叶面积指数相对比较稳定(约 20 m);春小麦叶面积指数和覆盖度均具有时间稳定特征,播种-分蘖阶段处于头水灌溉前,这个阶段的春小麦覆盖度对其在整个生育期的稳定性有显著影响,相比之下,这个阶段的叶面积指数对其在整个生育期的稳定性影响不明显;春小麦叶面积指数除了与生育期有密切的时间相关关系外,还在一定范围内与覆盖度有显著的空间相关关系,为此从时空变异角度,建立了一个以生育期和覆盖度为预报因子的叶面积指数增长模型,经检验,拟合模型方程在置信度 0.01 水平上表现显著。叶面积指数增长模型将不同时间的叶面积结合了空间上的变异特征,较之前的仅基于生育期的 Logistic 模型适应性更广。

关键词: 春小麦 叶面积指数 覆盖度 地统计 时空变异

中图分类号: S512.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)08-0254-08

引言

作物覆盖度和叶面积指数(LAI)在作物模型模拟中具有非常重要的作用,是衡量作物生长状况的重要指标^[1-3]。在精准农业研究及遥感估算中,揭示作物叶面积指数和覆盖度的时空变异及其关系对于气候、气象及水文模型具有重要意义^[4-7]。

多年来,关于作物叶面积指数和覆盖度在不同尺度的时空变异分析受到极大的关注^[8]。随着遥感科学的发展和应用,遥感技术已逐步成为表达区域信息强有力的手段^[9-11]。利用遥感技术反演作物叶面积指数和覆盖度是当前重要的研究课题^[12],但在利用遥感数据反演过程中,往往需要尽可能多的地面观测数据用于优化模型参数和检验估算结果^[10-13]。及时准确地获取作物叶面积指数和覆盖度的时空变化,是解决遥感数据与地面观测数据在时空尺度匹配问题的重要保证,这对作物参数时空分析至关重要,也是遥感准确反演

作物叶面积指数和覆盖度必须解决的问题,这对于叶面积指数和覆盖度的尺度提升研究具有十分重要的意义。

本文综合运用传统统计方法、地质统计方法、时间稳定方法研究春小麦不同生育阶段叶面积指数和覆盖度的时空变异特征及关系,旨在为西北旱区春小麦叶面积指数和覆盖度的地面观测和时空分析提供依据。

1 试验设计

1.1 试验设置

试验区位于甘肃省石羊河流域农业部作物高效用水武威科学观测站农田内,总面积约 2 hm²,试验区内地势开阔、平坦,全部种植春小麦。春小麦于 2011 年 3 月 15 日(一年中的序数 DOY 为 74)播种,灌溉和施肥均采用当地常规水平,同年 7 月 22 日收割。

试验区春小麦生育阶段划分是播种-分蘖(3 月

收稿日期: 2013-09-13 修回日期: 2013-11-21

* 民用航天“十二五”预研项目(D040201)、高分辨率对地观测系统国家重大专项资助项目(YZD00100GF)和遥感科学国家重点实验室资助项目(Y1Y00244KZ)

作者简介: 王春梅,助理研究员,博士,主要从事农业资源研究,E-mail: wangcm@radi.ac.cn

通讯作者: 顾行发,研究员,博士生导师,主要从事定量化遥感、光学卫星传感器定标、气溶胶遥感等研究,E-mail: guxf@radi.ac.cn

15 日至 5 月 11 日)、分蘖-拔节(5 月 11 日至 5 月 22 日)、拔节-抽穗(5 月 22 日至 6 月 14 日)、抽穗-乳熟(6 月 14 日至 7 月 5 日)、乳熟-成熟(7 月 5 日至 7 月 22 日)。试验区春小麦生长期共灌溉 4 次,灌溉时间分别是 5 月 1 日、5 月 21 日、6 月 10 日、7 月 2 日,每次灌溉用水量约 97.5 mm。由于天气和仪器等原因,整个生育期内,春小麦覆盖度和叶面积指数有效观测数据共 6 次,获取时间分别是 2011 年 4 月 20 日(播种-分蘖期)、5 月 12 日(分蘖-拔节期)、5 月 20 日(拔节-抽穗期)、5 月 28 日(拔节-抽穗期)、6 月 6 日(拔节-抽穗期)、6 月 22 日(抽穗-乳熟期)。

在试验区内设置若干地面采样点,将每个采样点中心外围的 60 cm × 60 cm 的区域作为春小麦叶面积指数、覆盖度观测样区,由北向南间隔 15 m 进行网格采样,共设置 7 排,此外在东西、南北方向的中线上分别布设间距为 7.5 m 的近距离加密位置,以帮助在小分离距离上更好地获取春小麦叶面积指数和覆盖度的空间变异特征(图 1)。采样位置编号顺序均是从西北角开始(记为样点“1”),然后水平向东按照“S”形顺序依次命名。

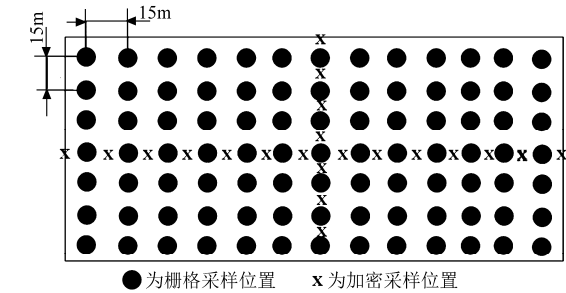


图 1 试验区的采样点布置示意图

Fig.1 Sample locations in plot

1.2 观测项目

春小麦覆盖度测定方法:植被覆盖度是指植被(包括叶、茎、枝)在单位面积内垂直投影面积所占比例。研究区春小麦覆盖度是通过基于数字图像处理技术的照相法获取。在每个采样点上大概 1.5 m 处照一张正投影数字图,再用 Photoshop 分析照片中土壤被春小麦覆盖面积占样点面积的比例即为该样点的春小麦覆盖度。具体分析方法是:用 Photoshop 打开照片,选出样点区域,统计出样点区域的总像素数,再通过颜色选出裸露的土壤并统计像素数,用总像素数减去土壤像素数就是春小麦覆盖部分的像素数,春小麦覆盖的像素数除以总像素数就是春小麦覆盖度^[14]。

春小麦叶面积指数测定方法:本研究采用 SunScan 冠层分析系统(SS1, England)获取春小麦叶面积指数。为确保观测数据的高精度,本研究每次

利用冠层分析系统观测叶面积指数的同时,随机采取 15 个样点采用人工采样方法进行校正。具体校正方法是:首先数出采样范围内(60 cm × 60 cm)的春小麦数量,再在样区中选取有代表性的 10 株春小麦观测每株的叶片数,再选取有代表性的 20 片叶片,用数码相机测定单片叶片的面积。所有样品叶片被分开平放在一张已知面积的白纸上,在距叶片大概 1.5 m 高处照一张照片,用与测覆盖度相同的方法测定叶片面积占纸张面积的比例,算出叶片的面积^[15]。

春小麦高度测定方法:春小麦高度是指春小麦最高点与地面的垂直距离。在样区内均匀取 10 株春小麦测定株高。所测春小麦高度的平均值为该样点的株高。所有样点株高的平均值为该时间测定的株高值。

此外,在观测期间利用自动气象站对试验区的大气蒸发力、降雨量等主要气象因子进行同步监测。

2 研究方法

2.1 传统统计分析

变异系数 C 是传统统计方法用来表征变异程度的一个重要参数^[16]。变异系数是标准差与均值的比值,若某一尺度共有 M 个地面实测数据 $f_1, f_2, \dots, f_M$,则变异系数 C 可以表示为

$$C = \frac{\sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (f_i - \bar{f})^2}}{\bar{f}} \tag{1}$$

其中

$$\bar{f} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M f_i \tag{2}$$

根据 C 值可对地学参数的变异程度进行分类^[17], C 值在 0 ~ 15% 为小变异, 15% ~ 50% 为中等变异, 大于 50% 为高度变异。

2.2 地质统计分析

传统的变异系数只能测定区域参数变异程度的强弱,而不能确切地描述其空间变异分布。地统计学中的半方差函数 $\gamma(h)$ 能将不同位置之间的变异描述为位置间距的函数,评价变量参数模式的空间连续性,是目前空间变异定量分析的常用方法。半方差函数计算公式为^[18]

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N_h} \sum_{i=1}^{N_h} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \tag{3}$$

式中 h ——地面样本间距

N_h ——在 $(x_i + h, x_i)$ 之间用来计算样本半方差函数的样本对数

$Z(x_i)$ ——在 x_i 位置上的观测值

变异函数模型有 3 个重要参数,即块金从原点

的跳升值(不连续),是由样本误差和短距离的变异性引起的。变程表明当样本间的距离等于或者大于此距离时,样本之间就变得完全独立了。变程所达到的平台值叫做变异函数的基台值。常用的有效变异函数模型主要有球形模型、指数模型、高斯模型、纯块金模型和幂函数模型等^[19]。

2.3 时间稳定分析

不同位置间的变异性可利用地统计理论分析,而不同样点位置随时间的变化则可用时间稳定性来表征^[20-21]。利用时间稳定性概念可以找到精确代表研究区平均作物生长状况的测点并可以对缺失数据进行插值补充,已在农业管理、生态环境建设等方面起到了积极作用。

在分析试验区的稳定样点之前,首先利用斯皮尔曼等级(Spearman rank)秩相关系数 r_s 验证稳定位置的存在性。其中

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^m (f_{i,t} - f_{i,t'})^2}{m(m^2 - 1)}$$

(4)

式中 m ——总的样本数目

$f_{i,t}, f_{i,t'}$ ——到位置 i 处的地表参量在 t 或 t' 时刻的等级

r_s 越接近 1,观测值在时刻 t 和 t' 的稳定性越大。

经过分析并确认稳定位置的存在之后,下一步需要确定具体的样本位置。假定 $t(t = 1, 2, \cdots, n_t)$ 时地表参量 f 对应的观测数目是 $m, f_{i,t}$ 是在 i 位置、 t 时刻的观测值,则 t 时刻此变量的均值 $\bar{f}_t$ 为

$$\bar{f}_t = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m f_{i,t}$$

(5)

因此,每个样本点的平均相对误差 $\bar{\delta}_i$ 和相对误差的方差 $\sigma(\delta)_i^2$ 为

$$\bar{\delta}_i = \frac{1}{n_t} \sum_{t=1}^{n_t} \frac{f_{i,t} - \bar{\theta}_t}{\bar{\theta}_t}$$

(6)

$$\sigma(\delta)_i^2 = \frac{1}{n_t - 1} \sum_{t=1}^{n_t} \left(\frac{f_{i,t} - \bar{f}_t}{\bar{f}_t} - \bar{\delta}_i \right)^2$$

(7)

每个样本的相对误差表征此位置相对田块均值的高低程度,而方差能较好地表征测量精度。为了有效地减少系统偏差和准确地捕捉不同采样时间的田块均值,应综合考虑均值和方差,因此利用根均方差确定最佳的稳定样本位置。

$$R_i = (\bar{\delta}_i^2 + \sigma(\delta)_i^2)^{\frac{1}{2}}$$

(8)

最后,将每个位置点的 $\bar{\delta}_i$ 从小到大进行排序,将序数和相应的平均相对误差绘制在同一图上,同时标上相应的根均方差。这样从图上就能直观地确定具有时间稳定性的位置。

3 结果与分析

3.1 描述性统计特征

为确保高精度的春小麦叶面积指数观测结果,本文通过人工采样方法对 SunScan 仪器获取的叶面积指数进行校正。利用 SunScan 仪器得到的是有效叶面积指数,根据人工采样方法计算得到的是真实叶面积指数,本文分析了有效值和真实值二者的线性回归关系(图 2)。结果表明,二者呈极显著的线性关系,相关系数高达 0.87。因此,利用人工采样方法对 SunScan 仪器观测的叶面积指数进行精度校正是可行的。

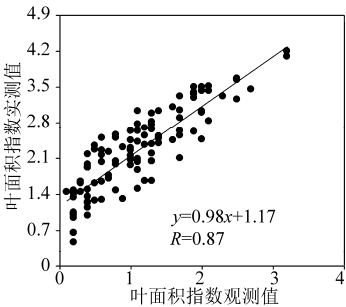


图 2 叶面积指数 SunScan 观测值与地面实测值的关系分析

Fig. 2 Relationship analysis between instrumental observation and manual measurement

通过计算分析,研究区春小麦覆盖度 f 和叶面积指数的均值、标准差和变异系数的时间变化如图 3 和图 4 所示。在整个观测期间,春小麦覆盖度和叶面积指数随时间的变化趋势相同,都是先达到最大峰值,随后减少。从 4 月 20 日到 7 月 15 日,春小麦覆盖度观测变化范围是 12% ~ 92%,叶面积指数观测变化范围是 0.23 ~ 2.8。不难发现,春小麦覆盖度和叶面积指数都在 6 月 22 日前后达到最大值,而且 6 月 22 日也是研究区春小麦株高的极大值观测日期(图 5)。

通过比较发现,虽然春小麦覆盖度和叶面积指数具有相似的时间变化规律,但二者变异系数的变化趋势明显不同。随着春小麦的不断生长,覆盖度变异系数不断减小,但叶面积指数变异系数则是先增加后减小。这说明春小麦覆盖度和叶面积指数的整体变异情况有很大区别。

3.2 不同生育阶段空间变异结构分析

根据试验区不同样点位置的观测数据,分析春小麦不同生育阶段覆盖度和叶面积指数的空间变异结构。表 1 和表 2 分别列出了春小麦覆盖度和叶面积指数在不同生育阶段的半方差函数主要参数。在所有观测时段内,5 月 28 日(DOY 为 149)和 6 月 6

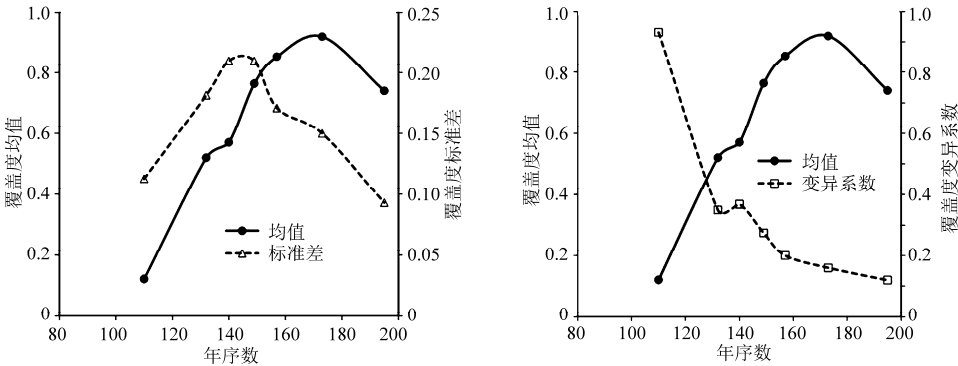


图 3 春小麦覆盖度 f 均值、标准差和变异系数随时间的变化曲线

Fig. 3 Analysis of coverage mean, standard error and CV with growth at different soil depth

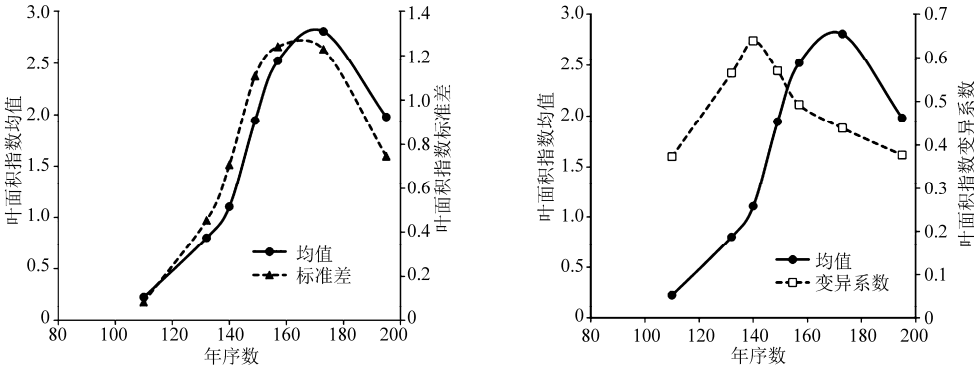


图 4 春小麦叶面积指数均值、标准差和变异系数随时间的变化曲线

Fig. 4 Analysis of LAI mean, standard error and CV with growth at different soil depth

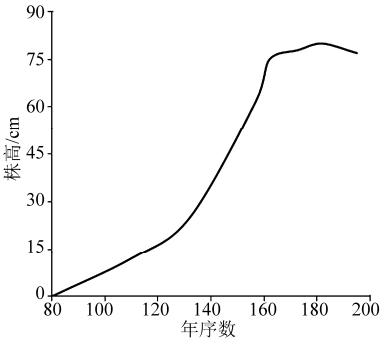


图 5 春小麦株高变化曲线

Fig. 5 Spring wheat height change map

日 (DOY 为 157) 覆盖度和叶面积指数半方差函数中的块金值都较大,这说明地面采样距离在 5 月 28 日和 6 月 6 日时段设置偏大,应采用更小的采样间距。尤其是春小麦覆盖度在 5 月 28 日 (DOY 为 149) 和 6 月 6 日 (DOY 为 157) 观测时段内半方差拟合模型属于纯块金模型,样本变异几乎全部由随机部分引起,说明在采样范围内样本间完全独立,不存在空间相关性。

在整个观测阶段,叶面积指数和覆盖度的相关距均在头水灌溉前表现最大 (4 月 20 日, DOY 为 110),随着头水灌溉后春小麦的快速生长,叶面积指数和覆盖度的空间变异增强,空间相关距离较小。可见,春小麦叶面积指数和覆盖度在头水灌溉前空

间连续性最高,之后空间连续性下降。值得一提的是,头水灌溉后春小麦叶面积指数的相关距变化相对稳定,变化值在 20 m 左右。

表 1 不同生育期春小麦覆盖度数据分布及半方差函数

Tab.1 Distribution and semivariogram of spring wheat coverage estimates at various growing stages

年序数	模型	块金	基台	相关距/m	R^2	均值	变异系数
110	球形	0	0.01	59.4	0.95	0.12	0.93
132	球形	0	0.03	24.0	0.90	0.52	0.35
140	球形	0	0.04	21.0	0.85	0.57	0.37
149	纯块金	0.04	0.04	0	—	0.76	0.27
157	纯块金	0.03	0.03	0	—	0.85	0.20
173	球形	0	0.02	25.0	0.81	0.92	0.16

表 2 不同生育期春小麦叶面积指数数据分布及半方差函数

Tab.2 Distribution and semivariogram of spring wheat LAI estimates at various growing stages

年序数	模型	块金	基台	相关距/m	R^2	均值	变异系数
110	球形	0	0.007	55.7	0.93	0.23	0.37
132	球形	0	0.186	26.0	0.80	0.83	0.52
140	球形	0	0.500	22.0	0.85	1.11	0.64
149	球形	0.3	1.220	20.0	0.70	1.94	0.57
157	球形	0.5	1.530	18.0	0.60	2.52	0.49
173	球形	0	1.500	20.0	0.85	2.80	0.44

3.3 不同生育阶段时间稳定性分析

春小麦叶面积指数和覆盖度不仅具有空间尺度的典型变异特征,而且时间尺度的稳定性也是一个非常重要的特征^[22-23]。在很多情况下,比如指导作物管理时,并不需要获得每一个具体点的作物叶面积指数和覆盖度,而只需要研究区的平均叶面积指数和覆盖度,在这种情况下,时间稳定性的概念可以很好地发挥其优势,虽然田间叶面积指数和覆盖度随着时间和空间位置的变化而变化,但是当把所有测量点的叶面积指数、覆盖度按高低顺序排列起来,不同测量时间下的顺序没有变化或变化不大,这种空间模式在时间上的相似性就是时间稳定特征。可见,在一个有良好时间稳定性的地区,无论在什么生育阶段,其中一部分样点会一致地高出研究区的平均叶面积指数和覆盖度,一些样点则会一致地低于均值,而少数几个样点总会等于或近似地等于研究区的均值,这些等于或接近于平均叶面积指数和覆盖度值的测点就是代表性测点,通过监测代表性测点就可以容易地获得研究区的平均叶面积指数和覆盖度值,从而可以大大简化获得研究区域叶面积指数和覆盖度平均值的过程。

假定春小麦叶面积指数和覆盖度在试验区某些位置具有时间稳定性,则可以将这些样本位置作为研究区长期定位试验的地面采样点。首先利用Spearman 等级系数来确定时间稳定位置的存在性。表3和表4分别给出了不同生育阶段春小麦叶面积

指数和覆盖度的等级相关系数。不管是叶面积指数还是覆盖度,4月20日(DOY为110)与6月22日(DOY为173)之间的等级相关系数最低,仅为0.20,但对于地面样本数 $n=111$,0.01概率水平对应的相关系数关键值是0.2^[24],因此表中数据的相关性都表现显著,说明春小麦叶面积指数和覆盖度在不同生育阶段都具有时间稳定特征。

大量文献曾运用相对误差的均方差作为分析地学参数时空变异强弱的标准^[20,25]。由于本文仅有6次叶面积指数和覆盖度的连续观测数据,其计算方差难免会有较大的误差,因此选用平均相对误差(式(6))以及极差作为确定生育期间叶面积指数和覆盖度的时间稳定性高低的标准。每个样点的叶面积指数(或覆盖度)平均相对误差,可表征此样点位置相对研究区平均值的高低程度,正数表示这个样点高出研究区的平均叶面积指数(或覆盖度),负数则表示低于平均叶面积指数(或覆盖度),而少数几个样点总会等于或近似地等于研究区的平均叶面积指数(或覆盖度)。极差就是这个样点叶面积指数(或覆盖度)平均相对误差在整个生育期的变化幅度。

图6a是通过所有样点观测数据获取的叶面积指数平均相对误差在整个观测时期内的等级分布图,误差线表示的是同一位置相对误差在整个观测时期内的极差。从图上看,111个样点中有52%位置的平均相对误差在 ± 0.3 范围内,但个别位置(如111号)的稳定性极差,平均相对误差几乎达到1.0。图6a中所有样点叶面积指数的相对误差在整个生育期间的极值都大于0.2,甚至个别样点位置的相对误差极值高达1.5(如107和101号)。将所有样点数据的极值从小到大进行排列,相对误差小于0.10的位置有3和103号,也就是说,在不同观测时间,这两个位置点在所有测量点排序中的位置都基本不变,而且最接近于研究区的平均叶面积指数,因此,这两个位置是估计整个生育期平均叶面积指数的优先稳定位置,也就是地面优先采样位置。

由3.2节分析结果可知,春小麦播种-分蘖阶段(头水灌溉前)观测数据对叶面积指数的空间变异影响较大,本节将进一步分析播种-分蘖阶段对春小麦叶面积指数时间稳定性的影响。图6b是除去播种-分蘖阶段(头水灌溉前)观测数据而计算的叶面积指数平均相对误差等级分布图。与整个生育阶段的分析结果(图6a)相比,图6b中虽然大部分样本位置的平均相对误差和极值都相对较小,但差异几乎没有太大变化,样点位置3和103(相对误差仍然小于0.10,且极值在0.3以内)仍然是这个生育阶

表 3 不同生育阶段春小麦叶面积指数的
Spearman 等级相关系数矩阵表
Tab.3 Spearman rank coefficient of spring wheat
LAI estimates at various growing stages

年序数	110	132	140	149	157	173
110	1					
132	0.75	1				
140	0.69	0.86	1			
149	0.59	0.73	0.82	1		
157	0.49	0.62	0.69	0.71	1	
173	0.20	0.48	0.56	0.61	0.49	1

表 4 不同生育阶段春小麦覆盖度的 Spearman
等级相关系数矩阵表
Tab.4 Spearman rank coefficient of spring wheat
coverage estimates at various growing stages

年序数	110	132	140	149	157	173
110	1					
132	0.77	1				
140	0.74	0.95	1			
149	0.59	0.65	0.70	1		
157	0.45	0.54	0.58	0.68	1	
173	0.20	0.44	0.51	0.63	0.44	1

段的优先稳定样点,这表明播种-分蘖阶段的叶面积指数观测数据对其在整个生育阶段的稳定性影响不显著。

图 7 是春小麦覆盖度的平均相对误差在整个观测时期和头水灌溉后时期(除去播种-分蘖时期)的等级分布图。与叶面积指数不同的是,除去播种-分蘖观测数据后,所有样点春小麦覆盖度的平均相对误差和极值都明显小于整个观测时期的结果,尤其

是极值在 0.3 范围内的样点数目增多,占有所有位置的比例从 5% 增加到 37%。在整个观测期间内,所有样点中覆盖度的相对误差小于 0.1 且极值小于 0.3 的样点位置仅有两个,分别是 4 和 72,而除去分蘖-拔节阶段的观测期间,相对误差小于 0.1 且极值小于 0.3 的样点位置则多达 19 个(其中也包括全生育期的稳定样点 4 和 72),其中最稳定的前 6 个位置依次分别是 47、103、44、67、3、72。

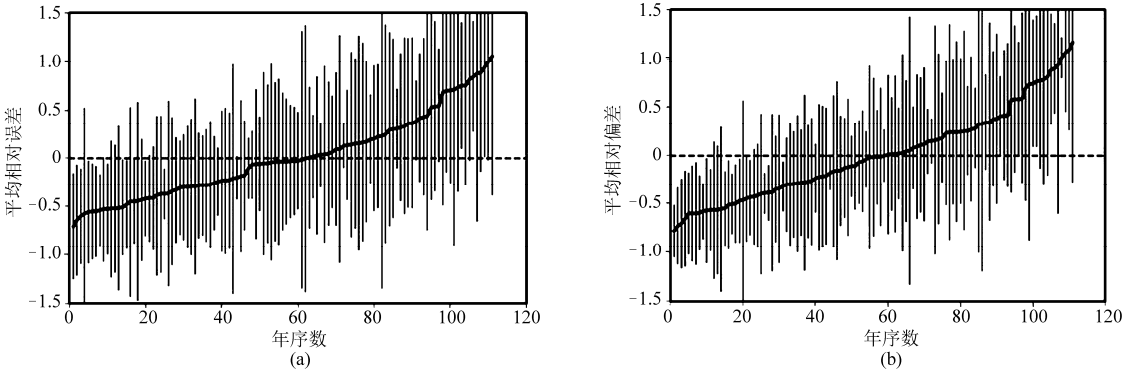


图 6 试验区不同位置春小麦叶面积指数的相对误差等级分布
Fig. 6 Rank distribution of relative errors of spring wheat LAI
(a) 整个生育观测期 (b) 不包括头水灌溉前观测期

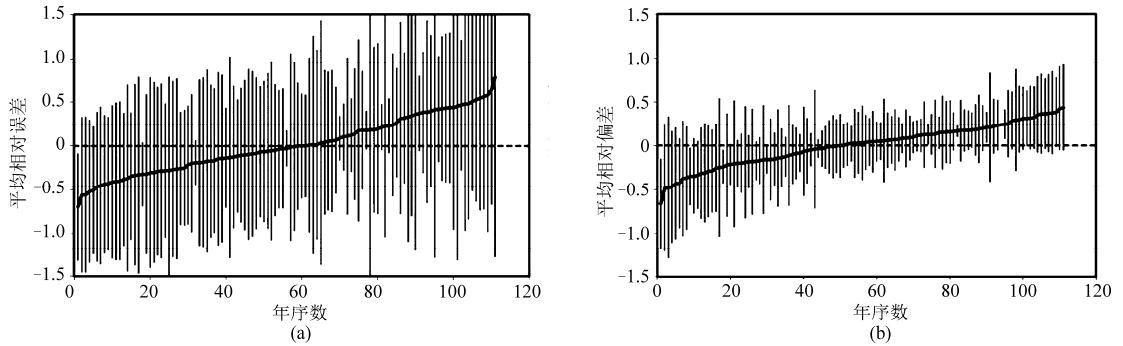


图 7 试验区不同位置春小麦覆盖度的相对误差等级分布
Fig. 7 Rank distribution of relative errors of spring wheat coverage
(a) 整个生育观测期 (b) 不包括头水灌溉前观测期

以上分析表明,播种-分蘖阶段处于头水灌溉前,这个阶段的春小麦覆盖度对其在整个生育期的稳定性高低有显著影响,相比之下,这个阶段的叶面积指数对其在整个生育期的稳定性影响不明显。

3.4 基于生育期和覆盖度的春小麦叶面积指数增长模型

叶面积指数和覆盖度都是衡量春小麦生长状况的重要指标,但有研究表明,仅以植被覆盖度为评价指标,并不能完全反映各种植被状况的其他特征,如水土保持差异等。在实际中,由于叶面积指数不仅能反映植被的结构、分布密度和生物量信息,且地面测量设备较为方便、快速。通常更多的是以叶面积指数作为小麦生长状况的重要指标^[3]。

3.2 节和 3.3 节均表明,叶面积指数具有时空

变异特征,本文将综合考虑时空二维变异特征,建立基于时间变量和空间变量的春小麦叶面积指数增长模型。春小麦叶面积指数与生育期密切相关,有研究表明^[26],这一变化过程可用 Logistic 模型或其修正形式很好地表达($L = F(t)$, t 为生育参数)。研究区春小麦叶面积指数变化在抽穗前(6 月 22 日)符合经典 Logistic 曲线,达最大值后在灌浆成熟期降低。可见春小麦叶面积指数可通过 Logistic 模型的修正式来表达,即 $L = F(t)$ 。据此提出的修正模型为^[27]

$$\frac{dx}{xdt} = (a + bx)(c + dt) \tag{9}$$

积分形式为

$$x = \frac{x_m}{1 + \exp(a_1 + a_2t + a_3t^2)} \tag{10}$$

根据试验区春小麦叶面积指数与生育期的关系(图4),分析得到相应的拟合方程

$$L = f(D) = \frac{17.52}{1 + \exp\left(28 - 59.69 \frac{D}{D_{\max}} + 33.75 \left(\frac{D}{D_{\max}}\right)^2\right)}$$

(11)

式中 L ——叶面积指数
 D ——不同生育时期在一年中的序数
 $D_{\max}$ ——收获前最后一次观测日期的序数
经分析,拟合方程决定系数 $R^2 = 0.96$,并通过置信度 0.01 的显著性检验。

式(11)仅仅考虑了时间变量,还需要进一步引入空间差异参量,更为准确地估算叶面积指数的时空结果。有文献表明^[14, 28-29],叶面积指数与覆盖度之间存在显著的关系。本文基于春小麦叶面积指数和覆盖度的同步观测数据,建立了统计回归关系(图8)。如图8所示,当春小麦覆盖度较高时,相应的叶面积指数也较大,而且春小麦叶面积指数与覆盖度有明显的指数关系,经方差分析,拟合方程达到显著水平。当叶面积指数超过一定界限时,覆盖度则趋于饱和,用最小二乘法统计二者的关系是

$$L = F(f) = 0.15 \exp(3.1f)$$

式中, $R^2 = 0.6955$,同样达到置信度 0.01 的显著性水平。

可见,春小麦叶面积指数变化除了与生育期有

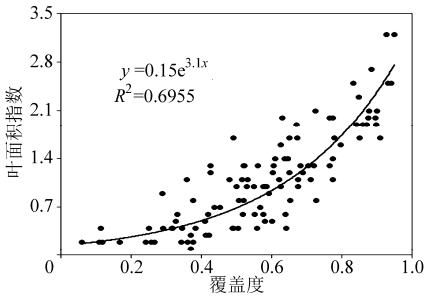


图8 春小麦叶面积指数和覆盖度的关系曲线
Fig. 8 Relationship analysis between spring wheat LAI and coverage

关,还与同时期的覆盖度变化有密切关系,本文将建立一个以生育期和覆盖度为预报因子的叶面积指数增长模型,以更好地应用于作物生长模型。利用式(11)和(12),通过规划求解方法,获取试验区春小麦叶面积指数的模型方程

$$L = \frac{2.3 \exp(0.9f)}{1 + \exp\left(26.3 - 59.8 \frac{D}{D_{\max}} + 33.8 \left(\frac{D}{D_{\max}}\right)^2\right)}$$

(13)

拟合方程决定系数 $R^2 = 0.995$,在置信度 0.01 水平上表现显著。式(13)是春小麦覆盖度和生育期的复合模式,将不同生育期的叶面积在空间上的变异动态统一起来,相比仅基于生育期的 Logistic 模型适应性更广。

4 结论

- (1) 春小麦覆盖度和叶面积指数随时间的变化趋势相似,但二者变异系数的变化趋势截然不同。随着春小麦的不断生长,覆盖度变异系数不断减小,而叶面积指数变异系数则是先增加后减小。
- (2) 春小麦叶面积指数和覆盖度在播种-分蘖阶段(头水灌溉前)的空间相关距离最大。这个阶段的观测数据对整个生育期叶面积指数和覆盖度的空间变异影响都很大。叶面积指数和覆盖度在其他生育阶段的空间相关距相对比较稳定。
- (3) 春小麦叶面积指数和覆盖度均具有时间稳定特征。播种-分蘖阶段处于头水灌溉前,这个阶段的春小麦覆盖度对其在整个生育期的稳定性高低有显著影响,相比之下,这个阶段的叶面积指数对其在整个生育期的稳定性影响不明显。
- (4) 本文将 Logistic 模型进行扩充,建立一个以生育期和覆盖度为预报因子的叶面积指数增长模型。经检验,拟合方程在置信度 0.01 水平上表现显著。叶面积指数增长模型将不同生育期的叶面积在空间上将变异动态统一起来,较之前的仅基于生育期的 Logistic 模型适应性更广。

参 考 文 献

1 Law B E, Van Tuyl S, Cescatti A, et al. Estimation of leaf area index in open-canopy ponderosa pine forests at different successional stages and management regimes in Oregon[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001,108(1): 1-14.

2 徐英,周明耀,薛小锋. 水稻叶面积指数和产量的空间变异性及关系研究[J]. 农业工程学报,2006,22(5):10-14.

Xu Ying, Zhou Mingyao, Xue Xiaofeng. Spatial variability and relationships of rice leaf area index and yield [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(5):10-14. (in Chinese)

3 孙佳佳,于东升,史学正,等. 植被叶面积指数与覆盖度定量表征红壤区土壤侵蚀关系的对比研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(6):1060-1066.

Sun Jiajia, Yu Dongsheng, Shi Xuezheng, et al. Comparison of between LAI and VFC in relationship with soil erosion in the red soil hilly region of South China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010,47(6):1060-1066. (in Chinese)

- 4 Mackay D S, Band L E. Forest ecosystem processes at the watershed scale: dynamic coupling of distributed hydrology and canopy growth [J]. *Hydrological Processes*, 1997, 11(9): 1197 – 1217.
- 5 Breuer L, Eckhardt K, Frede H G. Plant parameter values for models in temperate climates [J]. *Ecological Modelling*, 2003, 169(2 – 3): 237 – 293.
- 6 Masson V, Champeaux J L, Chauvin F, et al. A global database of land surface parameters at 1-km resolution in meteorological and climate models [J]. *Journal of Climate*, 2003, 16(9): 1261 – 1282.
- 7 Herbst M, Roberts J M, Rosier P T W, et al. Measuring and modeling the rainfall interception loss by hedgerows in southern England [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 141(2 – 4): 244 – 256.
- 8 Sprintsin M, Cohen S, Maseyk K, et al. Long term and seasonal courses of leaf area index in a semi-arid forest plantation [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(5): 565 – 574.
- 9 Glenn N F, Carr J R. The use of geostatistics in relating soil moisture to RADARSAT – 1 SAR data obtained over the Great Basin, Nevada, USA [J]. *Computers and Geosciences*, 2003, 29(5): 577 – 586.
- 10 Jacobs J M, Mohanty B P, Hsu E, et al. SMEX02: field scale variability, time stability and similarity of soil moisture [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92(4): 436 – 446.
- 11 Li X, Meng Q, Gu X, et al. A hybrid method combining pixel-based and object-oriented methods and its application in Hungary using Chinese HJ – 1 satellite images [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(13): 4655 – 4668.
- 12 Gonzales L M, Williams J W, Kaplan J O. Variations in leaf area index in northern and eastern North America over the past 21,000 years: a data-model comparison [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27(13 – 14): 1453 – 1466.
- 13 Park S J, van de Giesen N. Soil-landscape delineation to define spatial sampling domains for hillslope hydrology [J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 295(1 – 4): 28 – 46.
- 14 李存军, 王纪华, 刘良云, 等. 基于数字照片特征的小麦覆盖度自动提取研究 [J]. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2004, 30(6): 650 – 656.
- Li Cunjun, Wang Jihua, Liu Liangyun, et al. Automated digital image analyses for estimating percent ground cover of winter wheat based on object features [J]. *Journal of Zhejiang University: Agric. & Life Sci.*, 2004, 30(6): 650 – 656. (in Chinese)
- 15 林超文, 陈一兵, 黄晶晶. 中国四川间作地区作物高度覆盖度和叶面积指数的时间变化 [J]. *水土保持研究*, 2007, 14(2): 72 – 75.
- Lin Chaowen, Chen Yibing, Huang Jingjing. Temporal variation of plant height, plant cover and leaf area index in inter-cropped area of Sichuan, China [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, 14(2): 72 – 75. (in Chinese)
- 16 Warrick, A W. *Soil Water Dynamics* [M]. New York: Oxford University Press, Inc., 2003: 33 – 35.
- 17 Warrick A W, Nielsen D R. Spatial variability of soil physical properties in the field [M] // Hillel D. *Applications of Soil Physics*. New York: Academic Press, 1980.
- 18 Burgess T M, Webster R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semi-variogram and punctual kriging [J]. *Journal of Soil Science*, 1980, 31(2): 315 – 331.
- 19 Zhang R. *Applied geostatistics in environmental science* [M]. Monmouth Junction, NJ: Science Press and Science Press USA Inc., Junction, 2005: 91 – 92.
- 20 Vachaud G, Passerat de Silans A, Balabanis P, et al. Temporal stability of spatial measured soil water probability density function [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1985, 49(4): 822 – 828.
- 21 Bertuzzi P, Bruckler L, Chanzy A. Sampling strategies for soil water content to estimate evapotranspiration [J]. *Irrigation Science*, 1994, 14(3): 105 – 115.
- 22 Yang P, Wu W, Tang H, et al. Mapping spatial and temporal variations of leaf area index for winter wheat in North China [J]. *Agricultural Sciences in China*, 2007, 6(12): 1437 – 1443.
- 23 González-Sanpedro M C, Le Toan T, Moreno J, et al. Seasonal variations of leaf area index of agricultural fields retrieved from Landsat data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(3): 810 – 824.
- 24 Sokal R P, Rohlf F J. *Biometry* [M]. 3rd ed. New York: Freeman, 1995: 1 – 887.
- 25 Van Pelt R, Wierenga P J. Temporal stability of spatially measured soil matric potential probability density function [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(3): 668 – 677.
- 26 于强, 傅抱璞, 姚克敏. 包容生态因子的广义 Logistic 模型 [J]. *生态学报*, 1996, 16(3): 289 – 294.
- Yu Qiang, Fu Baopu, Yao Kemin. An augmented Logistic model taking account of ecological factors [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(3): 289 – 294. (in Chinese)
- 27 王信理. 在作物干物质积累的动态模拟中如何合理运用 Logistic 方程 [J]. *农业气象*, 1986, 7(1): 14 – 19.
- 28 Huete A R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 25(3): 295 – 309.
- 29 Chen X, Vierling L, Rowell E, et al. Using lidar and effective LAI data to evaluate IKONOS and Landsat 7 ETM + vegetation cover estimates in a ponderosa pine forest [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91(1): 14 – 26.

13 曹有福,韩清华,李树君,等. 微波真空冷冻干燥装置的设计与试验研究[J]. 农业机械学报,2010,41(7): 105 – 108.
Cao Youfu, Han Qinghua, Li Shujun, et al. Design and experiment on microwave vacuum freeze drying equipment [J].
Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 105 – 108. (in Chinese)

14 GB8858—1988 水果、蔬菜产品干物质和水分含量的测定方法[S]. 1988.
GB8858—1988 Method for determination of dry matter and water content in fruit and vegetable products[S]. 1988. (in Chinese)

15 GB 6195—1986 水果、蔬菜维生素 C 含量测定法(2,6-二氯靛酚滴定法)[S]. 1986.
GB 6195—1986 Determination of vitamin C in vegetables and fruits (2, 6-dichloro-indophenol titration method) [S]. 1986. (in Chinese)

Process and Quality of Ginger Slices Microwave-Fluidization Drying

Lü Weiqiao¹ Wang Ye² Han Qinghua² Li Shujun² Yin Qing² Ma Jiwei²

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In different microwave powers, the process and quality of ginger slices microwave-fluidization drying was researched. In the microwave power of 0.7 W/g, which was moderate for the process parameters, the drying time cost 1.83 hours, 6.67 hours less than that in the 75℃ hot-air drying, and protected the content of vitamin C better. However, the microstructure and rehydration capability changed too much in microwave-fluidization drying, and when the dry basis moisture content was less than 200% , the gingers’ sensory quality turned bad quickly. In order to develop the microwave-fluidization drying’s relative advantage, controlling the dehydration speed in final stage would be important, which also was the key work to improve the process.

Key words: Microwave-fluidization drying Hot-air drying Ginger slices Drying quality

(上接第 261 页)

Spatial and Temporal Variability of Spring Wheat Leaf Area Index and Coverage in Northwest China

Wang Chunmei Gu Xingfa Yu Tao Meng Qingyan Liu Miao Li Lingling

(Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The temporal and spatial variability of spring wheat leaf area index (LAI) and coverage was investigated, which was essential for the spatial analysis of crop parameters and the exact way to resolve the matching problems between remote sensing data and ground observation data. The results showed that, with the growing of spring wheat, the CV of coverage decreased, while the CV of LAI increased first and then decreased. At the coverage-tillering stage, both wheat LAI and coverage had the maximum spatial correlation distance and the minimum spatial variation. But at later growth stages, the spatial correlation distance was relatively stable for LAI and coverage. At some sample points, spring wheat LAI and coverage had a higher temporal stability than others, especially after the tillering-shooting stage. Compared with the coverage, the temporal stability of LAI was more significant. The sampling sites with higher time stability could be used to estimate the mean value of large region. Spring wheat LAI model was built with parameters of coverage and growth period, which could reflect the spatial and temporal variability.

Key words: Spring wheat Leaf area index Coverage Geostatistics Spatial and temporal variability