

黑土区玉米地作物信息多重分形与多尺度相关特征研究

刘继龙^{1,2} 周 延¹ 付 强^{1,2} 任高奇¹ 马孝义³ 孙维敬¹

(1. 东北农业大学水利与建筑学院, 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江省粮食产能提升协同创新中心, 哈尔滨 150030;
3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为揭示黑土区玉米地作物信息的时空变异机理,在东北农业大学香坊实验基地选取 48 m × 48 m 区域,利用多重分形和联合多重分形理论,研究作物信息的多重分形特征、不同时间作物信息以及不同作物信息之间的多尺度相关特征。结果表明,黑土区玉米叶绿素含量的多重分形特征不明显,茎粗和株高的多重分形特征较明显。随时间变化,造成叶绿素含量、茎粗空间变异的局部信息有所差异,引起株高空间变异的局部信息一致,叶绿素含量、茎粗、株高的空间变异性分别先降后增、先降后增、逐渐减弱。单一尺度和多尺度上,不同时间叶绿素含量之间、茎粗之间、株高之间的相关程度均有明显差异;叶绿素含量之间、茎粗之间的相关程度排序均有所差异,株高之间的相关程度排序相同。随时间变化,单一尺度和多尺度上不同作物信息之间的相关程度均有明显差异,且相关程度均逐渐降低。与单一尺度相比,多尺度上,叶绿素含量之间、茎粗之间、不同作物信息之间的相关程度增大,株高之间的相关程度有增有降。

关键词: 黑土区; 作物信息; 多重分形; 联合多重分形; 时空变异性; 多尺度

中图分类号: S152.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)06-0163-08

Multifractal and Multi-scale Correlation Characteristics of Crop Information of Corn Field in Black Soil Region

Liu Jilong^{1,2} Zhou Yan¹ Fu Qiang^{1,2} Ren Gaoqi¹ Ma Xiaoyi³ Sun Weijing¹

(1. College of Water Conservancy and Architecture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Collaborative Innovation Center of Grain Production Capacity Improvement in Heilongjiang Province, Harbin 150030, China

3. College of Hydraulic and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Quantitative expression of spatial and temporal variability of crop information is an important step to realize distributed control of water and soil resources in precise agriculture. In order to reveal spatial and temporal variability of crop information in corn field in black soil region, multifractal characteristics of crop information, multi-scale correlations between crop information of different sampling dates and the ones between different crop information were studied with multifractal and joint multifractal methods based on the results of experiments in 48m × 48m field in Xiangfang Experimental Base of Northeast Agricultural University. The results showed that multifractal characteristic of corn chlorophyll content was not obvious, and stem diameter and plant height had obvious multifractal characteristics. As sampling date changed, the local information that caused spatial variability of chlorophyll content and stem diameter were different, the ones that caused spatial variability of plant height were the same, spatial variability intensity of chlorophyll content and stem diameter was firstly decreased and then increased, and that of plant height was reduced gradually. At the single scale and multi-scale, when

收稿日期: 2015-10-10 修回日期: 2015-12-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51409046)、东北农业大学青年才俊项目(14QC46)、黑龙江省博士后经费项目(LBH-Z11226)、东北农业大学博士启动基金项目(2012RCB47)和2016年东北农业大学大学生 SIPT 计划项目(201610224198)

作者简介: 刘继龙(1981—),男,副教授,博士,主要从事农业水土工程研究,E-mail: liujilong1981@163.com

通信作者: 付强(1973—),男,教授,博士,主要从事农业水土工程研究,E-mail: fuqiang@neau.edu.cn

sampling date was different, correlation degrees between chlorophyll contents were different, there was difference in correlation degrees between stem diameters, and correlation degrees between plant heights were different; there was difference in sorting of correlation degree of chlorophyll content, stem diameter and plant height. As sampling date changed, correlation degrees between different crop information at the single scale and multi-scale were different, which were decreased gradually. Compared with research results at the single scale, the correlation degrees between chlorophyll contents were increased, the ones between stem diameters were enhanced, the ones between different crop information were augmented, and correlation degrees between plant heights were sometimes increased or decreased at multi-scale.

Key words: black soil region; crop information; multifraction; joint multifraction; spatial and temporal variability; multi-scale

引言

精准农业是当今世界农业发展的潮流,精准农业以空间变异作为理论基础,土壤特性和作物信息时空变异性的定量化表达,是实现精准农业中农田水土资源分布式调控的重要一步^[1],因此,非常有必要揭示土壤特性和作物信息的时空变异特征及机理。随着精准农业的发展,土壤特性的时空变异性得到了广泛的研究^[2-7],作物信息的时空变异性也受到越来越广泛的关注,目前国内外学者已针对作物信息的时空变异性进行了许多研究^[8-13]。多重分形方法能够判定时空变异性的强弱、识别造成时空变异性的局部信息等,是研究时空变异性非常有效的工具,已被广泛应用于土壤特性的时空变异性研究^[14-21],但在作物信息时空变异性的研究中较为少见。此外,研究作物信息在时间上的变异性时,往往需要分析不同时间作物信息之间,以及不同作物信息之间的相关性,这种相关性一般是基于某一尺度得出的,而空间变异性具有尺度效应,这种单一尺度上得出的相关性,不一定能反映出真实的相关程度。因此,不同时间作物信息之间,以及不同作物信息之间的多尺度相关特征研究显得尤为重要,但目前关于这一方面的研究很少。

东北黑土区是我国重要商品粮基地,由于各种因素影响,土壤退化严重,实现农田水土资源分布式调控,是保证该区域土壤资源高效可持续利用的一个途径,这就需要研究该区域土壤特性和作物信息的时空变异性。基于上述问题,本文利用多重分形和联合多重分形,研究黑土区农田作物信息的多重分形特征、不同时间作物信息以及不同作物信息之间的多尺度相关特征,以期揭示该区域玉米作物信息的时空变异特征,同时为该区域农田水土资源的分布式调控提供基础资料、科学依据与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 采样方案

田间采样在东北农业大学香坊实验基地进行,试验地种植作物为玉米,该基地位于哈尔滨市香坊区幸福镇,属寒温带大陆性气候,四季变化明显,春季多风少雨,夏季温热多雨,秋季较短,冬季寒冷干燥,年降水量为 500 ~ 550 mm,土壤类型为黑土。采样区域面积为 48 m × 48 m,用 6 m × 6 m 的采样网格将采样区域划分成 64 个网格,采样点设在每个网格(6 m × 6 m)的中心点,采样点空间分布如图 1 所示。试验测定的作物信息指标包括玉米叶片叶绿素含量、茎粗和株高,其中,叶片叶绿素含量的采样时间分别为 2013 年 7 月 11 日、7 月 31 日、8 月 14 日、8 月 24 日,玉米茎粗的采样时间分别为 2013 年 6 月 14 日、7 月 11 日、7 月 31 日、8 月 24 日,玉米株高的采样时间分别为 2013 年 6 月 14 日、7 月 11 日、7 月 31 日。株高表示自植株与土壤接触处至植株顶端的高度,用米尺测量每个采样点玉米的株高;茎粗表示茎基露出地面第 1 完整节间的中部扁圆处的周长,用软尺测量每个采样点玉米的茎粗;每个采样点玉米叶片的叶绿素含量用 SPAD-502 型叶绿素含量测定仪测定,除枯萎叶片外,采样点玉米植株所有叶片都测定其叶绿素含量,然后求其平

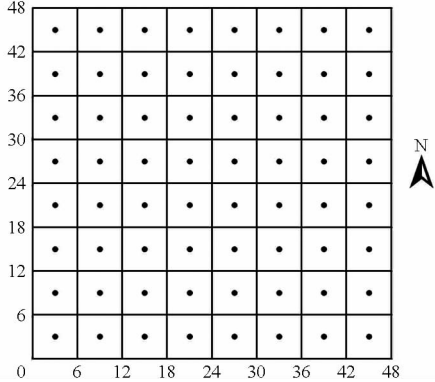


图 1 采样点空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of sampling sites

均值。

1.2 研究方法

根据研究目的,选用多重分形和联合多重分形方法,其中,多重分形用于研究作物信息时空变异性强弱以及造成作物信息时空变异性的局部信息等,联合多重分形用于研究不同时间作物信息以及不同作物信息之间的多尺度相关性。关于多重分形和联合多重分形的计算公式可参照文献[14-16]。

1.3 数据处理

求解多重分形参数(广义维数 $D(q)$ 、奇异指数 $\alpha(q)$ 及其维数分布函数 $f(q)$ 等)以及联合多重分形参数(联合奇异指数及其维数分布函数等)时,需要构建不同的尺度,本文构建4种尺度:6 m × 6 m、12 m × 12 m、16 m × 16 m、24 m × 24 m,利用上述4种尺度对研究区域(48 m × 48 m)进行划分时,得到的网格数分别是64、16、9、4个,最小尺度6 m × 6 m的选择原则是保证每个划分的网格中至少包含一个采样点;此外,多重分形和联合多重分形参数中的 q 表

示研究变量质量概率的统计矩的阶,理论上可取任意值,本文中 q 的取值范围为 $[-6,6]$,步长为1,共13个 q 值。单一尺度是指实际采样尺度(6 m × 6 m),多尺度是指构建的4种网格尺度。

2 结果与分析

2.1 作物信息多重分形特征的判定

不同取样时间叶绿素含量、茎粗、株高的 $D(q)-q$ 关系曲线如图2所示, $q \geq 0$ 时的具体 $D(q)$ 值如表1所示。由图2和表1可知,当 $q \geq 0$ 时,不同取样时间叶绿素含量、茎粗、株高的 $D(q)$ 均随 q 增加而减小,但叶绿素含量 $D(q)$ 减小的程度较弱。根据多重分形原理可知^[16,22],当 $q \geq 0$ 时,随 q 的增加,若研究变量的 $D(q)$ 逐渐减小,则表明研究变量具有多重分形特征,上述分析表明叶绿素含量的多重分形特征不明显,茎粗、株高的多重分形特征比较明显;随取样时间变化,叶绿素含量的 $D(0)-D(6)$ 先降后增,茎粗和株高的 $D(0)-D(6)$ 均逐渐减小。

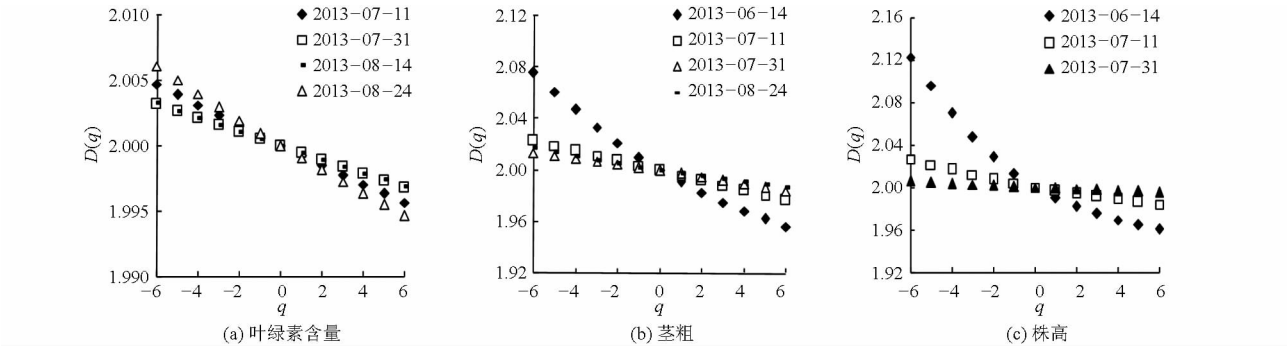


图2 叶绿素含量、茎粗、株高的 $D(q)-q$ 关系曲线
Fig.2 Relationship curves of $D(q)$ and q of chlorophyll content, stem diameter and plant height

表1 叶绿素含量、茎粗、株高的 $D(q)$

Tab.1 Values of $D(q)$ of chlorophyll content, stem diameter and plant height									
作物指标	采样日期	$D(0)$	$D(1)$	$D(2)$	$D(3)$	$D(4)$	$D(5)$	$D(6)$	$D(0)-D(6)$
叶绿素含量	2013-07-11	2.000 0	1.999 2	1.998 5	1.997 8	1.997 0	1.996 3	1.995 6	0.004 4
	2013-07-31	2.000 0	1.999 5	1.998 9	1.998 4	1.997 8	1.997 3	1.996 8	0.003 2
	2013-08-14	2.000 0	1.999 5	1.998 9	1.998 4	1.997 9	1.997 4	1.996 9	0.003 1
	2013-08-24	2.000 0	1.999 1	1.998 1	1.997 2	1.996 4	1.995 5	1.994 7	0.005 3
茎粗	2013-06-14	2.000 0	1.990 9	1.982 6	1.975 2	1.968 4	1.962 1	1.956 3	0.043 7
	2013-07-11	2.000 0	1.996 1	1.992 2	1.988 3	1.984 4	1.980 7	1.977 0	0.023 0
	2013-07-31	2.000 0	1.997 5	1.994 9	1.992 2	1.989 5	1.986 7	1.983 9	0.016 1
	2013-08-24	2.000 0	1.997 6	1.995 2	1.992 9	1.990 8	1.988 8	1.986 8	0.013 2
株高	2013-06-14	2.000 0	1.989 8	1.981 6	1.974 8	1.969 1	1.964 3	1.960 1	0.039 9
	2013-07-11	2.000 0	1.996 7	1.993 7	1.990 8	1.988 3	1.985 8	1.983 6	0.016 4
	2013-07-31	2.000 0	1.999 2	1.998 4	1.997 6	1.996 9	1.996 2	1.995 4	0.004 6

2.2 作物信息多重分形谱的分析

图3为不同取样时间叶绿素含量、茎粗、株高的多重分形谱,表2给出了具体的多重分形参数。根据多重分形原理可知^[16,22],研究变量的多重分

形谱宽度($\alpha_{\max}-\alpha_{\min}$)越大,说明研究变量的空间变异性越强;若研究变量的多重分形谱偏右,则研究变量的空间变异性主要是由其低值信息造成的;若研究变量的多重分形谱偏左,则研究变量的

空间变异性主要是由其高值信息引起的。分析图3和表2可以发现,8月14日叶绿素含量的多重分形谱对称性较好,7月11日、8月24日叶绿素含量的多重分形谱右偏,不同取样时间叶绿素含量多重分形谱的宽度先降低后增加;7月11日茎粗的多重分形谱对称性较好,6月14日、8月24日茎粗的多重分形谱偏右,7月31日茎粗的多重分形谱偏左,不同取样时间茎粗的多重分形谱宽度先降低后增大;6月14日、7月11日、7月31日株高的多重分形谱均偏右,且偏右的程度依次减弱,不同

取样时间株高多重分形谱的宽度逐渐减小。上述分析表明,7月11日、8月24日叶绿素含量的空间变异性主要是由其低值信息引起的;6月14日、8月24日茎粗的空间变异性主要是由其低值信息造成的,7月31日茎粗的空间变异性主要是由其高值信息引起的;不同取样时间株高的空间变异性均主要是由其低值信息造成的;随取样时间变化,叶绿素含量的空间变异性先降低后增强,茎粗的空间变异性先降低后增强,株高的空间变异性逐渐减弱。

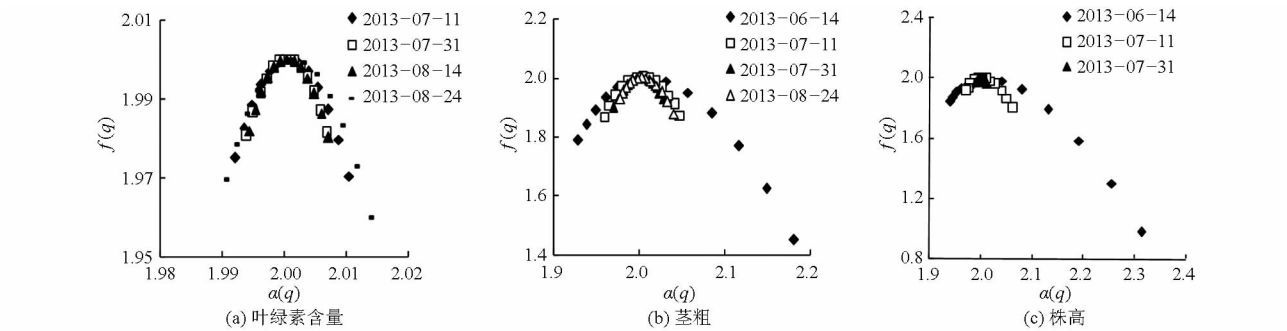


图3 叶绿素含量、茎粗、株高的多重分形谱

Fig.3 Multifractal spectrums of chlorophyll content, stem diameter and plant height

表2 叶绿素含量、茎粗、株高的多重分形参数

Tab.2 Multifractal parameters of chlorophyll content, stem diameter and plant height							
作物指标	采样日期	$\alpha_{\min}$	$\alpha_{\max}$	$\alpha_{\max} - \alpha_{\min}$	$f\alpha_{\min}$	$f\alpha_{\max}$	$f\alpha_{\max} - f\alpha_{\min}$
叶绿素含量	2013-07-11	1.992 2	2.010 5	0.018 3	1.974 9	1.970 4	-0.004 5
	2013-07-31	1.994 0	2.006 9	0.012 9	1.980 4	1.981 2	0.000 8
	2013-08-14	1.994 4	2.007 1	0.012 7	1.981 8	1.980 0	-0.001 8
	2013-08-24	1.990 5	2.013 9	0.023 4	1.969 6	1.959 8	-0.009 8
茎粗	2013-06-14	1.928 6	2.180 3	0.251 7	1.789 9	1.451 2	-0.338 7
	2013-07-11	1.958 9	2.047 7	0.088 8	1.868 1	1.873 2	0.005 1
	2013-07-31	1.969 6	2.027 9	0.058 3	1.897 9	1.927 8	0.029 9
	2013-08-24	1.977 2	2.040 6	0.063 4	1.929 1	1.877 5	-0.051 6
株高	2013-06-14	1.940 6	2.313 0	0.372 4	1.843 2	0.980 5	-0.862 7
	2013-07-11	1.972 7	2.064 3	0.091 6	1.918 1	1.799 7	-0.118 4
	2013-07-31	1.991 9	2.012 2	0.020 3	1.974 3	1.964 5	-0.009 8

2.3 作物信息的单一尺度相关性分析

2.3.1 不同取样时间作物信息的单一尺度相关性分析

不同取样时间叶绿素含量之间、茎粗之间、株高之间的单一尺度相关性如表3~5所示。由表3~5可知,不同时间叶绿素含量之间、茎粗之间、株高之间的单一尺度相关程度有明显差异,7月11日与7月31日、7月31日与8月14日、8月14日与8月24日叶绿素含量之间的相关性在 $p < 0.01$ 水平上显著,7月11日与8月14日的相关性在 $p < 0.05$ 水平上显著,7月11日与8月24日、7月31日与8月24日的相关性不显著;不同时间茎粗之间的相关性均在 $p < 0.01$ 水平上显著,相关程度较高;6月14

日与7月11日、7月11日与7月31日株高之间的相关性在 $p < 0.01$ 水平上显著,6月14日与7月31日的相关性不显著。

表3 不同取样时间叶绿素含量之间的单一尺度相关性

Tab.3 Correlation between chlorophyll content of different sampling dates at single scale				
采样日期	2013-07-11	2013-07-31	2013-08-14	2013-08-24
2013-07-11	1			
2013-07-31	0.377 **	1		
2013-08-14	0.279 *	0.362 **	1	
2013-08-24	0.117	0.213	0.416 **	1

注: * 表示在 $p < 0.05$ 水平上显著, ** 表示在 $p < 0.01$ 水平上显著,下同。

表 4 不同取样时间茎粗之间的单一尺度相关性
Tab.4 Correlation between stem diameter of different sampling dates at single scale

采样日期	2013 - 06 - 14	2013 - 07 - 11	2013 - 07 - 31	2013 - 08 - 24
2013 - 06 - 14	1			
2013 - 07 - 11	0.449 **	1		
2013 - 07 - 31	0.504 **	0.736 **	1	
2013 - 08 - 24	0.432 **	0.625 **	0.728 **	1

表 5 不同取样时间株高之间的单一尺度相关性
Tab.5 Correlation between plant height of different sampling dates at single scale

采样日期	2013 - 06 - 14	2013 - 07 - 11	2013 - 07 - 31
2013 - 06 - 14	1		
2013 - 07 - 11	0.610 **	1	
2013 - 07 - 31	0.213	0.475 **	1

2.3.2 不同作物信息之间的单一尺度相关性分析

表 6 为不同作物信息之间在单一尺度上的相关性。分析表 6 可以发现,7 月 11 日、7 月 31 日茎粗与叶绿素含量显著相关,8 月 24 日茎粗与叶绿素含量的相关性不显著;7 月 11 日叶绿素含量与株高的相关性在 $p < 0.01$ 水平上显著,7 月 31 日叶绿素含量与株高的相关性不显著;6 月 14 日、7 月 11 日茎粗与株高的相关性显著,8 月 24 日茎粗与株高的相关性不显著。随取样时间变化,叶绿素含量与茎粗、叶绿素含量与株高、茎粗与株高的相关程度依次减弱。

2.4 作物信息的多尺度相关性分析

2.4.1 不同取样时间作物信息的多尺度相关性分析

根据联合多重分形原理可知^[17,23],运用联合多

表 6 作物信息之间的单一尺度相关性
Tab.6 Correlation between crop information at single scale

作物指标	2013 - 06 - 14	2013 - 07 - 11	2013 - 07 - 31	2013 - 08 - 24
叶绿素含量与茎粗		0.409 **	0.389 **	0.127
叶绿素含量与株高		0.572 **	-0.009	
茎粗与株高	0.792 **	0.442 **	0.146	

重分形研究不同变量之间的多尺度相关性时,若研究变量联合多重分形谱的灰度图相对集中且沿对角线方向延伸,或研究变量联合奇异指数的相关性显著,则研究变量之间在多尺度上具有某些相同分布或相关程度较高,反之,分布不同或相关程度较低。

不同取样时间叶绿素含量之间、茎粗之间、株高之间联合多重分形谱的灰度图如图 4~6 所示,联合奇异指数的相关性如表 7~9 所示。分析图 4~6 和表 7~9 可知,在多尺度上,除 7 月 11 日与 8 月 24 日叶绿素含量之间的相关性在 $p < 0.05$ 水平上显著外,其余时间叶绿素含量之间的相关性均在 $p < 0.01$ 水平上显著;不同时间茎粗之间的相关性均在 $p < 0.01$ 水平上显著;不同取样时间株高之间的相关性也均在 $p < 0.01$ 水平上显著。与不同时间叶绿素含量之间、茎粗之间、株高之间的单一尺度相关程度相比,不同时间叶绿素含量之间、茎粗之间的多尺度相关程度明显增大,除 6 月 14 日与 7 月 31 日株高之间的多尺度相关程度有所降低外,其余时间株高之间的多尺度相关程度明显增大。不同时间叶绿素含量之间、茎粗之间的多尺度相关程度排序与单一尺度上的排序有所差异,不同时间株高之间的多尺度相关程度排序与单一尺度上的排序相同。

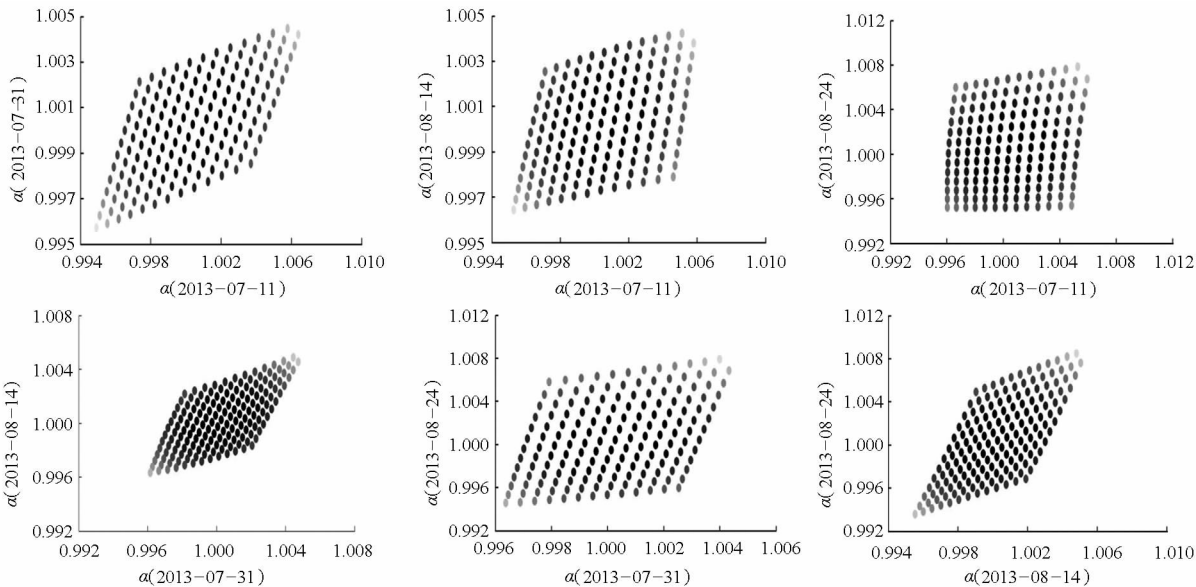


图 4 不同取样时间叶绿素含量之间联合多重分形谱的灰度图
Fig.4 Grayscale images of joint multifractal spectrums between chlorophyll content of different sampling dates

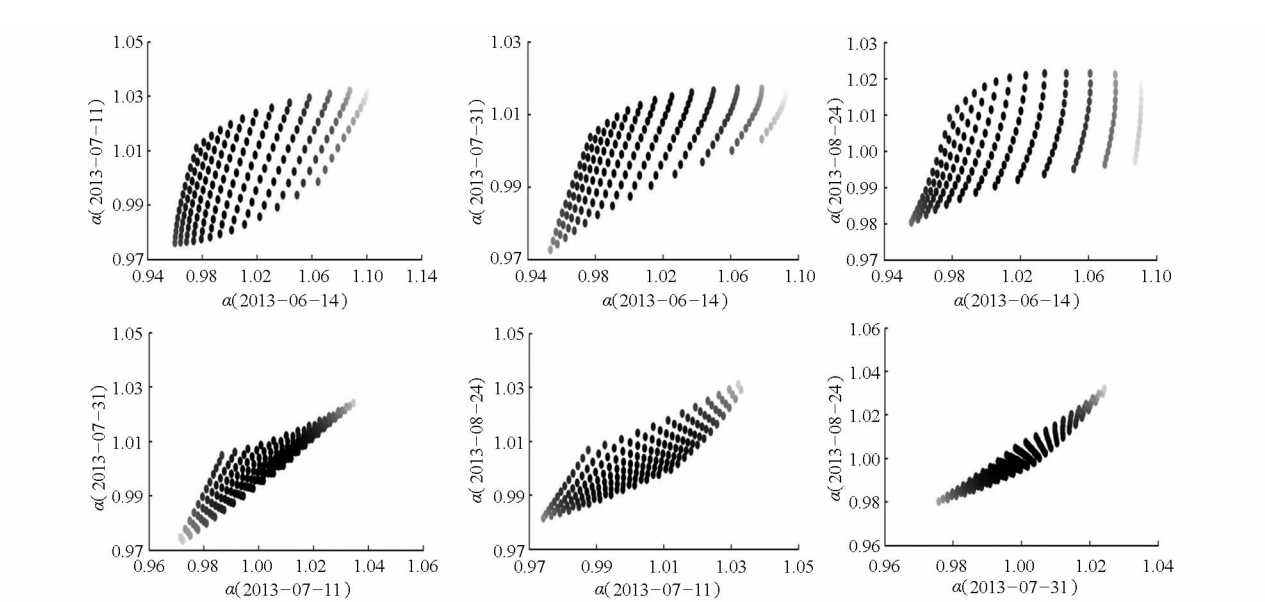


图 5 不同取样时间茎粗之间联合多重分形谱的灰度图

Fig.5 Grayscale images of joint multifractal spectrums between stem diameter of different sampling dates

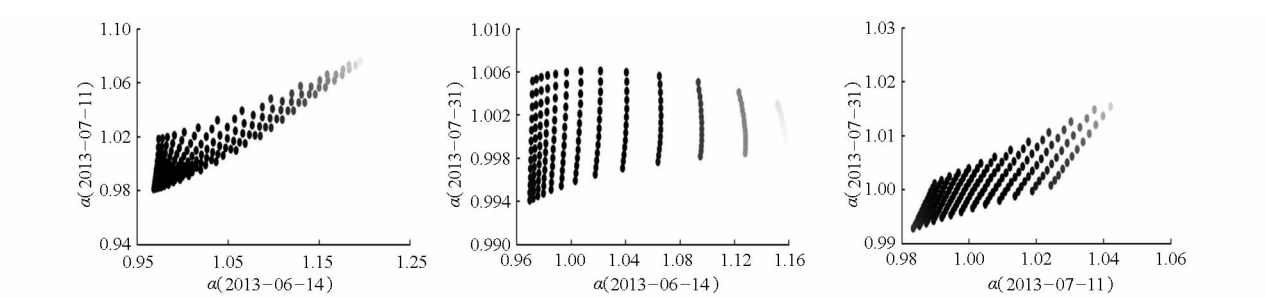


图 6 不同取样时间株高之间联合多重分形谱的灰度图

Fig.6 Grayscale images of joint multifractal spectrums between plant height of different sampling dates

表 7 不同取样时间叶绿素含量之间的多尺度相关性

Tab.7 Correlation between chlorophyll content of different sampling dates at multi-scale

采样时间	2013 – 07 – 11	2013 – 07 – 31	2013 – 08 – 14	2013 – 08 – 24
2013 – 07 – 11	1			
2013 – 07 – 31	0.645 **	1		
2013 – 08 – 14	0.425 **	0.677 **	1	
2013 – 08 – 24	0.185 *	0.415 **	0.713 **	1

表 8 不同取样时间茎粗之间的多尺度相关性

Tab.8 Correlation between stem diameter of different sampling dates at multi-scale

采样时间	2013 – 06 – 14	2013 – 07 – 11	2013 – 07 – 31	2013 – 08 – 24
2013 – 06 – 14	1			
2013 – 07 – 11	0.717 **	1		
2013 – 07 – 31	0.767 **	0.931 **	1	
2013 – 08 – 24	0.604 **	0.890 **	0.965 **	1

表 9 不同取样时间株高之间的多尺度相关性

Tab.9 Correlation between plant height of different sampling dates at multi-scale

采样时间	2013 – 06 – 14	2013 – 07 – 11	2013 – 07 – 31
2013 – 06 – 14	1		
2013 – 07 – 11	0.932 **	1	
2013 – 07 – 31	0.202 **	0.857 **	1

叶绿素含量与株高(ph)、茎粗与株高联合多重分形谱的灰度图,表 10 给出了不同作物信息之间的多尺度相关性。从图 7~9 和表 10 可以发现,多尺度上,除 7 月 31 日叶绿素含量与株高之间的相关性不显著外,其余取样时间叶绿素含量与茎粗、叶绿素含量与株高、茎粗与株高之间的相关性均在 $p < 0.01$ 水平上显著;不同取样时间叶绿素含量与茎粗、叶绿素含量与株高、茎粗与株高之间的相关程度,都明显大于单一尺度上的相关程度。随取样时间变化,茎粗与叶绿素含量、叶绿素含量与株高、茎粗与株高之间的多尺度相关程度均逐渐降低,与单一尺度上的分析结果一致。

2.4.2 不同作物信息之间的多尺度相关性分析

图 7~9 分别为叶绿素含量(cc)与茎粗(sd)、

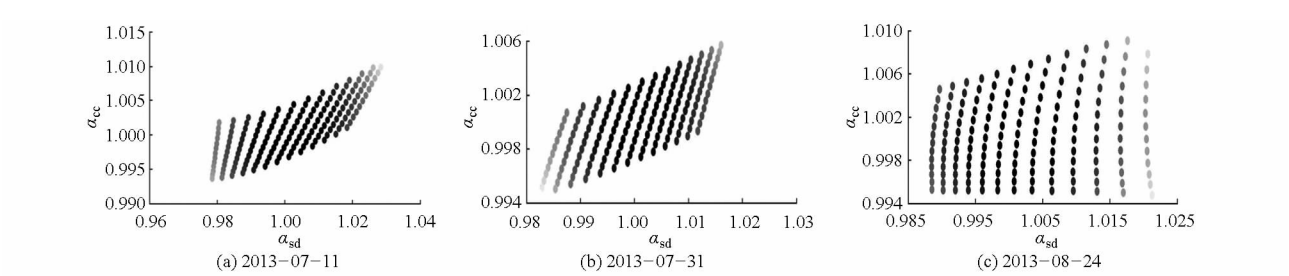


图 7 叶绿素含量与茎粗联合多重分形谱的灰度图

Fig. 7 Grayscale images of joint multifractal spectrums between chlorophyll content and stem diameter

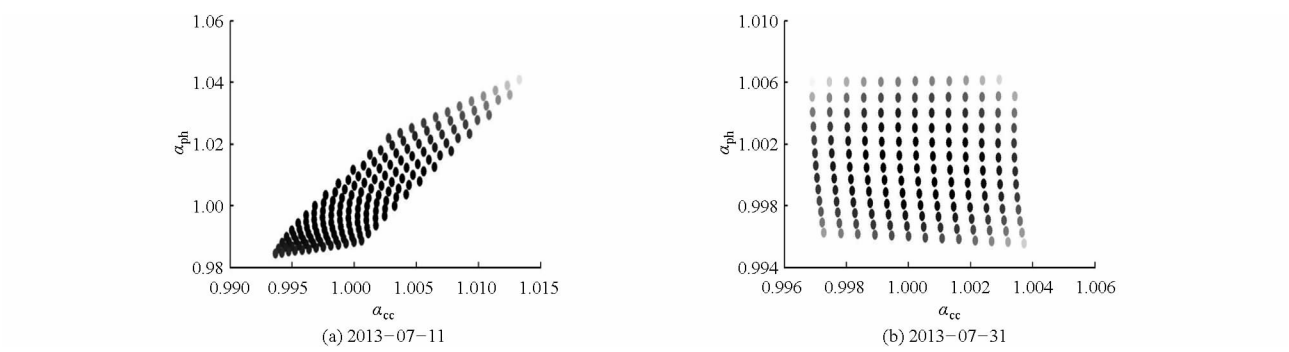


图 8 叶绿素含量与株高联合多重分形谱的灰度图

Fig. 8 Grayscale images of joint multifractal spectrums between chlorophyll content and plant height

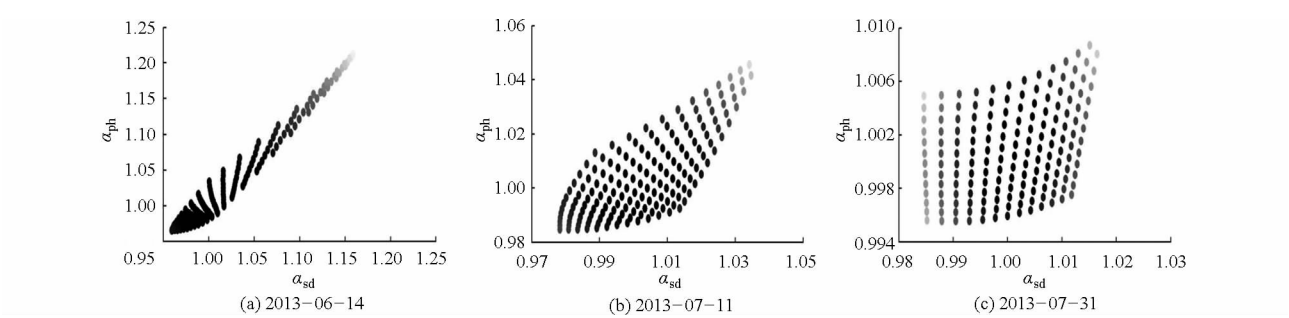


图 9 茎粗与株高联合多重分形谱的灰度图

Fig. 9 Grayscale images of joint multifractal spectra between stem diameter and plant height

表 10 作物信息联合奇异指数之间的多尺度相关性				
Tab. 10 Correlations between joint singularity exponents of crop information at multi-scale				
作物信息	2013 - 06 - 14	2013 - 07 - 11	2013 - 07 - 31	2013 - 08 - 24
α_{cc} 与 α_{sd}		0. 801 **	0. 742 **	0. 212 **
α_{cc} 与 α_{ph}		0. 911 **	-0. 082	
α_{sd} 与 α_{ph}	0. 984 **	0. 765 **	0. 357 **	

3 结论

(1)黑土区玉米叶绿素含量的多重分形特征不明显,茎粗和株高的多重分形特征比较明显;取样时间不同时,引起叶绿素含量、茎粗空间变异性的局部信息均有所不同,株高的空间变异性均由低值造成。随时间变化,叶绿素含量和茎粗的空间变异性均先降后增,株高的空间变异性逐渐减低。

(2)在单一尺度和多尺度上,不同时间叶绿素

含量之间、茎粗之间、株高之间的相关程度都有明显差异,与单一尺度上的相关程度相比,叶绿素含量之间、茎粗之间的多尺度相关程度明显增大,株高之间的多尺度相关程度有增有减。叶绿素含量之间、茎粗之间的多尺度相关程度排序与单一尺度上的排序有所差异,株高之间的多尺度相关程度排序与单一尺度上的排序相同。随采样时间变化,单一尺度和多尺度上,不同作物信息之间的相关程度都存在明显差异,且相关程度均逐渐降低;作物信息之间的多尺度相关程度,都明显大于单一尺度上的相关程度。

(3)根据研究得出的黑土区玉米地作物信息的时空变异特征,能够了解不同时期玉米生长信息的空间分布特征,可为灌溉、施肥、耕作等农业措施的实施和调整提供指导,对研究区域农田土壤水分和养分的合理高效利用以及玉米产量的提高具有重要意义。

参 考 文 献

- 1 蔡守华, 徐英, 王俊生, 等. 土壤水分和养分时空变异性与作物产量的关系[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12):26-31.
CAI Shouhua, XU Ying, WANG Junsheng, et al. Relationship between spatio-temporal variability of soil moisture and nutrients and crop yield[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 26-31. (in Chinese)
- 2 王卫华, 李建波, 王铄, 等. 土壤热特性参数空间变异性与拟合方法研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4):120-125.
WANG Weihua, LI Jianbo, WANG Shuo, et al. Spatial variability of soil thermal parameters and its fitting method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4):120-125. (in Chinese)
- 3 邢旭光, 赵文刚, 柳烨, 等. 猕猴桃果园不同采样密度下土壤含水率空间变异性研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(8):138-145.
XING Xuguang, ZHAO Wen'gang, LIU Ye, et al. Spatial variability of soil moisture in kiwi field under different sampling density conditions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8):138-145. (in Chinese)
- 4 胡玉福, 邓良基, 肖海华, 等. 邛海盆地土壤氮素空间变异特征与影响因素研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4):132-140.
HU Yufu, DENG Liangji, XIAO Haihua, et al. Spatial variability of soil nitrogen and its influential factors in Qionghai Basin[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4):132-140. (in Chinese)
- 5 叶回春, 黄珊瑜, 张世文, 等. 土壤有机碳空间变异性对采样密度的响应研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12):215-223.
YE Huichun, HUANG Shanyu, ZHANG Shiwen, et al. Spatial variability response of soil organic carbon to sampling density change[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12):215-223. (in Chinese)
- 6 王卫华, 王全九. 黑河中游绿洲麦田土壤导气率空间变异尺度性研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4):179-183.
WANG Weihua, WANG Quanjiu. Scale-dependency of spatial variability of soil air permeability on typical Oasis croplands at middle reaches of Heihe river[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4):179-183. (in Chinese)
- 7 栗现文, 靳孟贵. 不同水质膜下滴灌棉田盐分空间变异特征[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11):180-187.
LI Xianwen, JIN Menggui. Spatial variability of cotton field salinity under mulched drip irrigation with brackish and fresh water[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11):180-187. (in Chinese)
- 8 陈蓉蓉, 周治国, 曹卫星, 等. 基于 GIS 的农田土壤、作物特征空间变异性及其相互关系[J]. 应用生态学报, 2004, 15(9):1678-1680.
CHEN Rongrong, ZHOU Zhiguo, CAO Weixing, et al. Spatial variability and quantitative analysis of field factors based on GIS[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(9):1678-1680. (in Chinese)
- 9 薛亚锋, 周明耀, 徐英, 等. 水稻叶面积指数及产量信息的空间结构性分析[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8):89-92.
XUE Yafeng, ZHOU Mingyao, XU Ying, et al. Spatial structure of leaf area index and yield of rice[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(8):89-92. (in Chinese)
- 10 米丽娜, 王芳, 李友宏, 等. 宁夏平原灌淤土土壤养分与作物产量的空间变异性[J]. 干旱区研究, 2009, 26(4):508-513.
MI Li'na, WANG Fang, LI Youhong, et al. Preliminary study on spatial variability nutrients in irrigation-silted soil and crop yield in the Ningxia Plain[J]. Arid Zone Research, 2009, 26(4):508-513. (in Chinese)
- 11 陈云坪, 王秀, 马伟, 等. 小麦多年产量空间变异与空间关联分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10):180-184.
CHEN Yunping, WANG Xiu, MA Wei, et al. Spatial autocorrelation analysis of wheat yield over five years[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10):180-184. (in Chinese)
- 12 CHEN C, BAETHGEN W E, WANG E L, et al. Characterizing spatial and temporal variability of crop yield caused by climate and irrigation in the North China Plain[J]. Theoretical & Applied Climatology, 2011, 106(3-4):365-381.
- 13 卢洋洋, 张影全, 张波, 等. 同一基因型小麦籽粒质量性状的空间变异[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(2):234-239.
LU Yangyang, ZHANG Yingquan, ZHANG Bo, et al. Spatial variability analysis of grain quality parameters of wheat cultivar[J]. Journal of Triticeae Crops, 2014, 34(2):234-239. (in Chinese)
- 14 KRAVCHENKO A N, BOAST C W, BULLOCK D G. Multifractal analysis of soil spatial variability[J]. Agronomy Journal, 1999, 91(6):1033-1041.
- 15 CANIEGO F J, ESPEJO R, MARTÍN M A, et al. Multifractal scaling of soil spatial variability[J]. Ecological Modelling, 2005, 182(3-4):291-303.
- 16 ZELEKE T B, SI B C. Scaling relationships between saturated hydraulic conductivity and soil physical properties[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(6):1691-1702.
- 17 ZELEKE T B, SI B C. Characterizing scale-dependent spatial relationships between soil properties using multifractal techniques[J]. Geoderma, 2006, 134(3-4):440-452.
- 18 刘继龙, 马孝义, 张振华. 不同土层土壤水分特征曲线的空间变异及其影响因素[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1):46-52.
LIU Jilong, MA Xiaoyi, ZHANG Zhenhua. Spatial variability of soil water retention curve in different soil layers and its affecting factors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1):46-52. (in Chinese)

- 20 ER-RAKI S, CHEHBOUNI A, BOULET G, et al. Using the dual approach of FAO - 56 for partitioning ET into soil and plant components for olive orchards in a semi-arid region[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(11): 1769 - 1778.
- 21 FANDINO M, CANCELA J J, REY B J, et al. Using the dual- K_c approach to model evapotranspiration of Albarino vineyards (*Vitis vinifera* L. cv. Albarino) with consideration of active ground cover[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 112: 75 - 87.
- 22 PACO T A, FERREIRA M I, CONCEICAO N. Peach orchard evapotranspiration in a sandy soil: comparison between eddy covariance measurements and estimates by the FAO 56 approach[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 85(3): 305 - 313.
- 23 ALLEN R G, CLEMMENTS A J, BURT C M. Prediction accuracy for project wide evapotranspiration using crop coefficients and reference evapotranspiration[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2005, 131(1): 24 - 36.
- 24 ALLEN R G, PEREIRA L S, SMITH M, et al. FAO - 56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2005, 131(1): 2 - 13.
- 25 樊引琴,蔡焕杰. 单作物系数法和双作物系数法计算作物需水量的比较研究[J]. *水利学报*, 2002(3): 50 - 54.
FAN Yinqin, CAI Huanjie. Comparison of crop water requirements computed by single crop coefficient approach and dual crop coefficient approach[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002(3): 50 - 54. (in Chinese)
- 26 中华人民共和国水利部. 灌溉试验规范 SL13—2004[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2005.
- 27 MORIASI D N, ARNOLD J G, VAN LIEW M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(3): 885 - 890.
- 28 王潇潇,潘学标,顾生浩,等. 内蒙古地区参考作物蒸散变化特征及其气象影响因子[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(增刊1): 142 - 152.
WANG Xiaoxiao, PAN Xuebiao, GU Shenghao, et al. Trend in reference crop evapotranspiration and meteorological factors affecting trends in Inner Mongolia[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(Supp.1): 142 - 152. (in Chinese)
- 29 李王成,王为,冯绍元,等. 不同类型微型蒸发器测定土壤蒸发的田间试验研究[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(10): 6 - 13.
LI Wangcheng, WANG Wei, FENG Shaoyuan, et al. Field experimental study on the measurement of soil evaporation using different types of micro-lysimeters[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(10): 6 - 13. (in Chinese)
- 30 ZHAO Nana, LIU Yu, CAI Jiabing, et al. Dual crop coefficient modelling applied to the winter wheat-summer maize crop sequence in North China Plain: basal crop coefficients and soil evaporation component[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 117(31): 93 - 105.
- 31 LIU Yujie, LUO Yi. A consolidated evaluation of the FAO - 56 dual crop coefficient approach using the lysimeter data in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(1): 31 - 40.
- 32 陈凤,蔡焕杰,王健,等. 杨凌地区冬小麦和夏玉米蒸发蒸腾和作物系数的确定[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(5): 191 - 193.
CHEN Feng, CAI Huanjie, WANG Jian, et al. Estimation of evapotranspiration and crop coefficients of winter wheat and summer maize in Yangling Zone[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(5): 191 - 193. (in Chinese)

~~~~~  
(上接第 170 页)

- 19 刘继龙,马孝义,张振华. 土壤水盐空间异质性及尺度效应的多重分形[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(1): 81 - 86.  
LIU Jilong, MA Xiaoyi, ZHANG Zhenhua. Multifractal study on spatial variability of soil water and salt and its scale effect[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(1): 81 - 86. (in Chinese)
- 20 刘继龙,马孝义,张振华. 土壤入渗特性的空间变异性及土壤转换函数[J]. *水科学进展*, 2010, 21(2): 214 - 221.  
LIU Jilong, MA Xiaoyi, ZHANG Zhenhua. Spatial variability of soil infiltration characteristics and its pedo-transfer functions[J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(2): 214 - 221. (in Chinese)
- 21 管孝艳,杨培岭,吕焯. 基于多重分形理论的农田土壤特性空间变异性分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2011, 19(5): 712 - 720.  
GUAN Xiaoyan, YANG Peiling, LÜ Ye. Analysis on spatial variability of soil properties based on multifractal theory[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2011, 19(5): 712 - 720. (in Chinese)
- 22 EGHBALL B, SCHEPERS J S, NEGAHBAN M, et al. Spatial and temporal variability of soil nitrate and corn yield: multifractal analysis[J]. *Agronomy Journal*, 2003, 95(2): 339 - 346.
- 23 陈双平,韩凯,马猛,等. 染色体碱基序列的联合多重分形分析[J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(2): 298 - 301.  
CHEN Shuangping, HAN Kai, MA Meng, et al. The joint multi-fractal analysis of the base sequence of chromosomes[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(2): 298 - 301. (in Chinese)