

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.022

松嫩平原黑土区玉米穗质量构成要素的空间变异性研究

刘继龙^{1,2} 任高奇¹ 付强^{1,2} 马孝义³ 张振华⁴ 周延¹

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 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; 4. 鲁东大学资源与环境工程学院, 烟台 264025)

摘要: 基于在松嫩平原黑土区获取的玉米穗质量构成要素(穗粒质量、穗轴质量、穗粒数、穗行数、行粒数、穗长、穗粗),利用传统统计学、多重分形和联合多重分形方法分析了玉米穗质量构成要素的空间变异性。结果表明,玉米穗粒质量、穗轴质量、穗粒数、穗行数、行粒数、穗长、穗粗的空间变异强度依次减弱,且穗粒质量和穗轴质量的变异程度为中等变异,穗粒数、穗行数、行粒数、穗长、穗粗的变异程度为弱变异;玉米穗轴质量和穗粒质量的多重分形特征最明显,行粒数、穗粗和穗长的多重分形特征最不明显,穗行数和穗粒数多重分形特征的明显程度介于上述两者之间;穗行数的空间变异性主要是由高值信息造成,而行粒数、穗轴质量、穗粒质量、穗粒数、穗粗、穗长的空间变异性主要由低值信息引起;单一尺度和多尺度上,穗粗、穗轴质量、穗长、穗粒数、行粒数、穗行数对穗粒质量空间变异性的影响程度排序有所差异,穗粒质量与穗长、穗粗、穗粒数、穗行数、穗轴质量、行粒数在多尺度上的相关程度明显大于在单一尺度上的相关程度。

关键词: 松嫩平原; 黑土区; 农田; 玉米穗质量; 空间变异性

中图分类号: S152.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)12-0178-07

Spatial Variability of Components of Corn Ear Weight in
Black Soil Region of Songnen Plain

Liu Jilong^{1,2} Ren Gaoqi¹ Fu Qiang^{1,2} Ma Xiaoyi³ Zhang Zhenhua⁴ Zhou Yan¹

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

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

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

4. College of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264025, China)

Abstract: Crop information is a comprehensive index and has spatial and temporal variability due to influence of terrain and soil properties and so on. Based on components of corn ear weight (grain weight per ear, axis weight per ear, grain number per ear, row number per ear, grain number per row, ear length and ear diameter) obtained in black soil region of Songnen Plain, the spatial variability of components of corn ear weight was studied with traditional statistics, multifractal and joint multifractal methods. The results showed that spatial variability intensities of grain weight per ear, axis weight per ear, grain number per ear, row number per ear, grain number per row, ear length and ear diameter decreased successively, the ones of grain weight per ear and axis weight per ear were medium, and the ones of grain number per ear, row number per ear, grain number per row, ear length and ear diameter were weak; multifractal characteristics of axis weight per ear and grain weight per ear were the most obvious, the ones of grain number per row, ear diameter and ear length were not obvious, and the ones of

收稿日期: 2016-03-30 修回日期: 2016-06-12
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)、东北农业大学学术骨干项目(16XG12)和黑龙江省博士后经费项目(LBH-Z11226)
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,博士生导师,主要从事农业水土工程研究,E-mail: fuqiang@neau.edu.cn

row number per ear and grain number per ear were between the above two; spatial variability of row number per ear was caused by its high values, and the local informations that brought about spatial variabilities of grain number per row, axis weight per ear, grain weight per ear, grain number per ear, ear diameter and ear length were their low values; at the single scale and multi-scale, sortings of effect degrees of ear diameter, axis weight per ear, ear length, grain number per ear, grain number per row and row number per ear on spatial variability of grain weight per ear were different, and correlation degrees between grain weight per ear and other components of corn ear weight at multi-scale were bigger than the ones at the single scale. Research results could provide foundational information, scientific basis and guidance for precision management of farmland, increase corn yield in black soil region, and also offer a new angle to study spatial variability of corn yield.

Key words: Songnen Plain; black soil region; field; corn ear weight; spatial variability

引言

作物产量是一个综合性指标,受地形因子、土壤属性、生长环境等因素影响^[1-3],具有时空变异性,随精确农业的兴起,作物产量的时空变异性受到国内外学者广泛关注,已成为当前农业领域的一个热点^[4],许多学者已对作物产量的时空变异性进行了研究^[5-8],也取得了很多成果,掌握作物产量的时空变异性,可为田间精确管理提供基础资料与参考依据,对于提高作物产量具有重要意义。

松嫩平原黑土区位于我国东北部,是世界著名三大黑土带之一,也是我国的主要粮食产区,主要粮食作物中玉米和大豆所占比重大,是我国著名的玉米带和大豆主产区^[9],实现玉米持续增产和稳产对保障我国粮食安全具有重要意义,因此,如何提高该区玉米产量显得尤为关键,掌握该区玉米产量的空间变异特征,为该区农田精准管理提供参考依据与技术支撑,进而可为该区玉米产量的提高提供指导,但是目前关于松嫩平原黑土区玉米产量空间变异性的研究很少。空间变异性具有尺度效应,空间尺度不同时,影响空间变异性的主要过程或因素不一定完全相同,多尺度分析已成为空间变异性研究中的一个热点,国内外学者已在许多领域展开了空间变异性的尺度效应研究^[10-14],但针对作物产量空间变异性尺度效应的研究很少。

分形是研究复杂结构和尺度问题的有效工具,能够用来分析数据的各种空间现象^[15]。此外,玉米穗质量是构成玉米产量的重要信息,为此,本文基于国内外研究中存在的上述问题,利用多重分形和联合多重分形方法通过量化松嫩平原黑土区玉米穗质量构成要素的空间变异强度,识别造成玉米穗质量构成要素空间变异的局部特征,判定玉米穗质量构成要素在单一尺度和多尺度上的相关特征,揭示该区玉米穗质量构成要素的空间变异机理,以期为该

区农田精准管理提供基础信息与科学依据,进而为该区玉米产量的提高提供指导意见,同时为玉米产量空间变异性的研究提供新视角。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在东北农业大学香坊实验基地进行,位于哈尔滨市东南,属寒温带大陆性气候,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 500 ~ 550 mm,农作物以玉米、大豆为主,农田土壤为黑土,试验地 0 ~ 40 cm 土层土壤颗粒组成与土壤容重如表 1 所示。

表 1 土壤颗粒组成与土壤容重				
Tab.1 Soil particle composition and bulk density				
参数	砂粒(0.05 ~ 1 mm) 体积 分数/%	粗粉粒(0.05 ~ 0.01 mm) 体积 分数/%	粘粒(小于 0.001 mm) 体积分数/%	土壤容重/ (g·cm ⁻³)
	数值	5.51	53.73	16.25
				1.356 9

1.2 试验设计

在种植作物为玉米的农田选择长宽均为 48 m 的试验地,将其划分为 64 个尺寸为 6 m × 6 m 的网格,玉米穗质量构成要素的采样点位于每个网格的中心位置,玉米穗质量构成要素取样点的空间分布图如图 1 所示。玉米成熟后收集试验地每个取样点的玉米穗。玉米穗脱粒后用天平称量穗粒质量和穗轴质量;用米尺测量穗基部到顶端的长度得到玉米的穗长;用软尺测量玉米穗中部的周长得到玉米的穗粗;穗行数表示玉米穗的行数;行粒数为玉米穗各行粒数的平均值;穗粒数为玉米穗各行粒数的和。

1.3 研究方法

(1)传统统计学
传统统计学方法主要通过计算玉米穗质量构成要素的平均值、标准差、方差和变异系数等统计特征

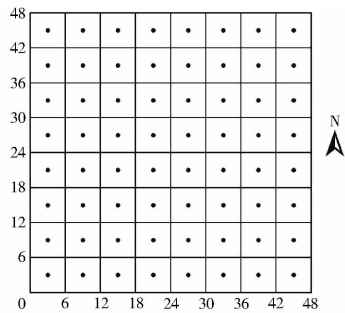


图 1 取样点的空间分布图

Fig. 1 Spatial distribution of sampling site

值,研究分析玉米穗质量构成要素的空间变异特征,其中变异系数(C_v)的计算公式为

$$C_v = \sigma / \mu \tag{1}$$

式中 σ ——标准差 μ ——均值
 $C_v \leq 0.1$ 表示研究变量为弱变异, $0.1 < C_v < 1$ 表示研究变量为中等变异, $C_v \geq 1$ 表示研究变量为强变异^[16]。

(2)多重分形

应用多重分形研究玉米穗质量构成要素的空间变异性时,需要计算玉米穗质量构成要素的质量概率 $P_i(\delta)$ 、质量指数 $\tau(q)$ 、广义维数 $D(q)$ 、奇异指数 $\alpha(q)$ 、奇异指数的维数分布函数 $f(q)$ 等多重分形参数,上述多重分形参数的计算公式参照文献[15,17-19]。多重分形能够识别造成玉米穗质量构成要素空间变异性的局部信息或特征,关键是要在不同尺度上定义一个质量概率,本文在计算玉米穗质量构成要素的多重分形参数时,共划分 4 种尺度,即分别利用尺寸为 6 m × 6 m、12 m × 12 m、16 m × 16 m、24 m × 24 m 的网格尺度划分试验地(48 m × 48 m),利用上述 4 种网格尺度划分时,生成的网格数分别是 64 个、16 个、9 个、4 个,为保证生成的网格中至少包含一个采样点,本文选择的最小网格尺寸为 6 m × 6 m。

(3)联合多重分形

空间变异性具有尺度效应,引起不同尺度上空间变异性的主要因素并不一定完全相同,非常有必要确定在不同尺度上对空间变异性都具有显著影响的因素,多重分形主要分析某一变量的空间变异性,多重分形拓展为联合多重分形后,便可通过分析不同变量在多尺度上的相互关系,确定在不同尺度上对空间变异性都具有显著的因素。联合多重分形参数主要包括联合奇异指数 $\alpha^1(q^1, q^2)$ 、 $\alpha^2(q^1, q^2)$ 和联合奇异指数的维数分布函数 $f(\alpha^1, \alpha^2)$ 等,具体计算公式参照文献[18]。

1.4 数据处理与分析

玉米穗质量构成要素的传统统计特征参数利用

Excel 和 SPSS 计算;玉米穗质量构成要素的多重分形参数、联合多重分形参数以及联合多重分形谱的灰度图利用 Matlab 计算和绘制;玉米穗质量构成要素的多重分形谱利用 Excel 绘制;玉米穗质量构成要素之间在单一尺度上的相关性以及玉米穗质量构成要素联合奇异指数之间的相关性利用 SPSS 计算。

2 结果与分析

2.1 玉米穗质量构成要素的传统统计特征

玉米穗质量构成要素的传统统计特征值如表 2 所示。由表 2 可知,不考虑灌溉时,研究区试验地玉米穗粒质量、穗轴质量、穗粒数、穗行数、行粒数、穗长、穗粗平均值分别为 181.84 g、23.66 g、588.08 粒、14.75 行、39.94 粒、19.33 cm、15.53 cm;其变异系数依次为 0.204 4、0.199 1、0.090 9、0.088 8、0.056 7、0.051 2、0.047 1,即穗粒质量、穗轴质量、穗粒数、穗行数、行粒数、穗长、穗粗的变异性依次减弱,且穗粒质量和穗轴质量的变异程度为中等变异,穗粒数、穗行数、行粒数、穗长、穗粗的变异程度为弱变异。

表 2 玉米穗质量构成要素的传统统计特征值

Tab. 2 Traditional statistics characteristics value of components of corn ear weight						
参数	最小值	最大值	平均值	标准差	方差	变异系数
穗粒质量/g	108.20	239.64	181.84	37.18	1 382.04	0.204 4
穗轴质量/g	14.94	33.10	23.66	4.71	22.19	0.199 1
穗长/cm	17.10	21.50	19.33	0.99	0.98	0.051 2
穗粗/cm	13.70	16.60	15.53	0.73	0.54	0.047 1
穗行数/行	12.00	18.00	14.75	1.31	1.71	0.088 8
行粒数/粒	34.07	44.25	39.94	2.26	5.13	0.056 7
穗粒数/粒	468.00	732.00	588.08	53.45	2 857.15	0.090 9

上述分析表明,穗粒质量的空间分布差异最明显,穗粒质量是构成玉米产量的重要信息,识别造成穗粒质量空间变异性的局部信息与影响因素,揭示穗粒质量的空间变异性机理,对于提高研究区玉米产量具有重要实际意义。

2.2 单一尺度上玉米穗质量构成要素之间的相关性

表 3 给出了单一尺度上玉米穗质量构成要素之间的相关性。通过分析表 3 可以发现,穗轴质量与穗行数、穗长与穗行数、穗粗与行粒数的相关性不显著,穗行数与行粒数的相关性在 $p < 0.05$ 水平上显著,其余玉米穗质量构成要素之间的相关性均在 $p < 0.01$ 水平上显著;玉米穗粒质量与穗粗、穗轴质量、穗长、穗粒数、行粒数、穗行数的相关系数依次为 0.862、0.773、0.763、0.602、0.458、0.329,相关程度依次减弱,说明单一尺度上玉米穗粗、穗轴

质量、穗长、穗粒数、行粒数、穗行数对穗粒质量空间变异性的影响程度依次降低。空间变异性具有尺度效应,这种单一尺度上的相关性分析结果并不一定能完整地反映出玉米穗粒质量与穗粗、穗

轴质量、穗长、穗粒数、行粒数、穗行数之间的相关性,因此,有必要探讨分析玉米穗粒质量与穗粗、穗轴质量、穗长、穗粒数、行粒数、穗行数在多尺度上的相关性。

表 3 单一尺度上玉米穗质量构成要素之间的相关性
Tab.3 Correlations between components of corn ear weight at single scale

参数	穗粒质量/g	穗轴质量/g	穗长/cm	穗粗/cm	穗行数/行	行粒数/粒	穗粒数/粒
穗粒质量/g	1						
穗轴质量/g	0.773 **	1					
穗长/cm	0.763 **	0.736 **	1				
穗粗/cm	0.862 **	0.623 **	0.559 **	1			
穗行数/行	0.329 **	0.242	0.111	0.579 **	1		
行粒数/粒	0.458 **	0.543 **	0.585 **	0.113	-0.285 *	1	
穗粒数/粒	0.602 **	0.563 **	0.467 **	0.638 **	0.807 **	0.333 **	1

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

2.3 玉米穗质量构成要素的多重分形特征

2.3.1 玉米穗质量构成要素的 $D(q)-q$ 关系曲线

穗长、穗粒数、穗粗、穗粒质量、穗行数、穗轴质量和行粒数等玉米穗质量构成要素的 $D(q)-q$ 关系曲线如图 2 所示, $q \geq 0$ 时玉米穗质量构成要素的 $D(q)$ 值如表 4 所示。 $q \geq 0$ 时,若研究变量的 $D(q)$ 值随 q 增加逐渐降低,则表示研究变量具有多重分形特征^[17-18]。由图 2 和表 4 可知,当 $q \geq 0$ 时,行粒数、穗轴质量、穗行数、穗粒质量、穗粒数、穗粗、穗长的 $D(q)$ 值随 q 增加都逐渐降低,而且穗轴质量和穗粒质量的 $D(q)$ 值降低程度最明显,行粒数、穗粗和穗长的 $D(q)$ 值降低程度最弱,穗行数和穗粒数的 $D(q)$ 值降低程度介于上述两者中间,根据多重分形原理可知,穗轴质量和穗粒质量的多重分形特征最明显,行粒数、穗粗和穗长的多重分形特征最不明

显,穗行数和穗粒数多重分形特征的明显程度介于上述两者之间。

2.3.2 玉米穗质量构成要素 $\alpha(q)-f(q)$ 关系曲线

图 3 给出了穗长、穗粒数、穗粗、穗粒质量、穗行数、穗轴质量和行粒数等玉米穗质量构成要素的 $\alpha(q)-f(q)$ 关系曲线,表 5 给出了具体的多重分形参数。 $\alpha(q)-f(q)$ 关系曲线称为研究变量的多重分形谱,多重分形谱的宽度越大,研究变量的空间变异性越强;若研究变量的多重分形谱偏左,则表明研究变量的空间变异性主要是由高值信息引起,若研究变量的多重分形谱偏右,则说明研究变量的空间变异性主要由低值信息造成^[17-18]。

由图 3 和表 5 可知,穗行数的多重分形谱偏左;行粒数、穗轴质量、穗粒质量、穗粒数、穗粗、穗长的多重分形谱均偏右,且穗轴质量、穗粒质量多重分形

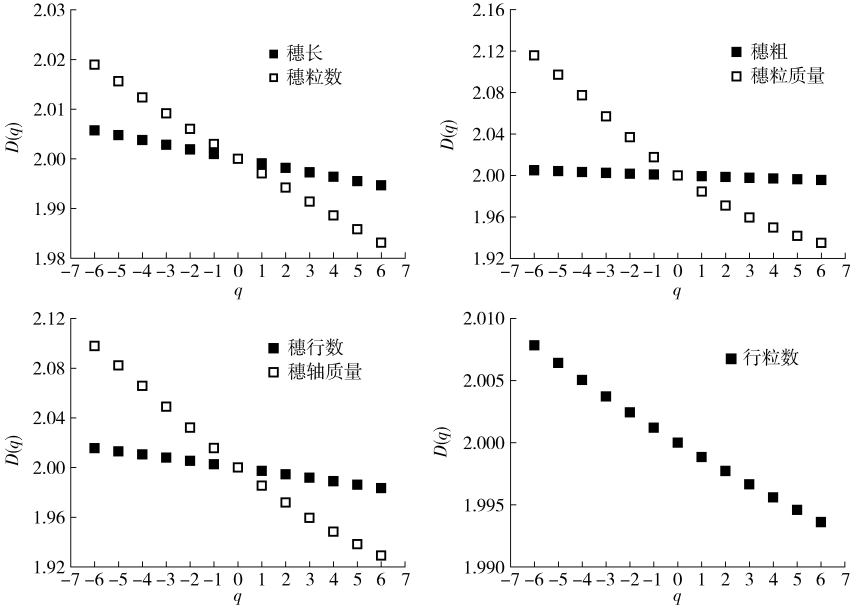


图 2 玉米穗质量构成要素的 $D(q)-q$ 关系曲线
Fig.2 $D(q)-q$ correlation curves of components of corn ear weight

表 4 玉米穗质量构成要素的 $D(q)$ 值
Tab.4 $D(q)$ of components of corn ear weight

q	穗长	穗粗	穗粒数	穗粒质量	穗行数	穗轴质量	行粒数
-6	2.005 7	2.005 0	2.018 9	2.115 7	2.015 6	2.097 8	2.007 8
-5	2.004 8	2.004 1	2.015 6	2.097 1	2.013 1	2.082 2	2.006 4
-4	2.003 8	2.003 3	2.012 3	2.077 3	2.010 5	2.065 7	2.005 1
-3	2.002 8	2.002 4	2.009 1	2.057 0	2.007 9	2.048 9	2.003 7
-2	2.001 9	2.001 6	2.006 0	2.036 8	2.005 3	2.032 1	2.002 4
-1	2.000 9	2.000 8	2.002 9	2.017 6	2.002 7	2.015 7	2.001 2
0	2.000 0	2.000 0	2.000 0	2.000 0	2.000 0	2.000 0	2.000 0
1	1.999 1	1.999 2	1.997 1	1.984 4	1.997 3	1.985 3	1.998 8
2	1.998 2	1.998 5	1.994 2	1.970 9	1.994 6	1.971 8	1.997 7
3	1.997 3	1.997 7	1.991 4	1.959 5	1.991 8	1.959 5	1.996 6
4	1.996 4	1.996 9	1.988 6	1.949 8	1.988 9	1.948 4	1.995 6
5	1.995 5	1.996 3	1.985 8	1.941 7	1.986 2	1.938 3	1.994 6
6	1.994 6	1.995 6	1.983 1	1.934 9	1.983 3	1.929 1	1.993 6
$D(0)-D(6)$	0.005 4	0.004 4	0.016 9	0.065 1	0.016 7	0.070 9	0.006 4

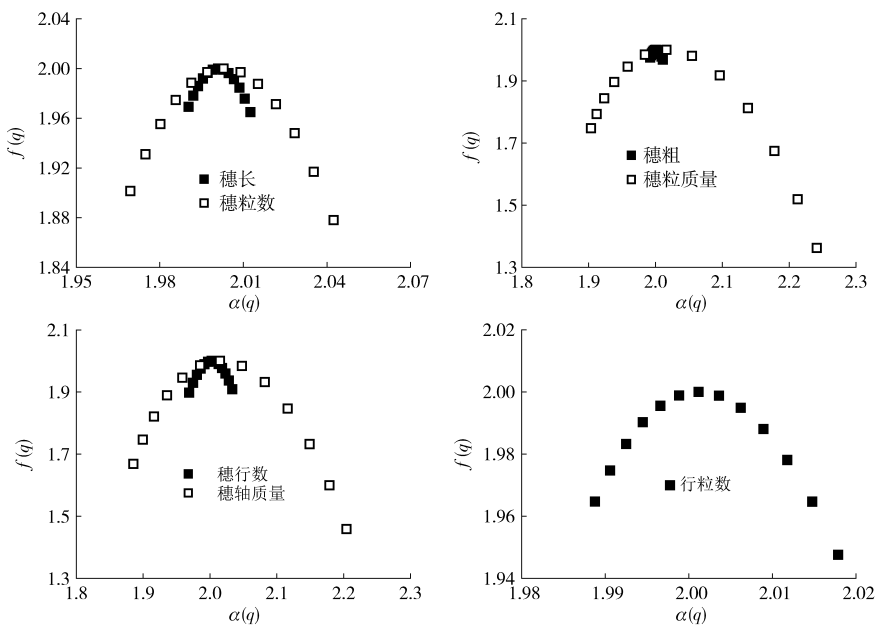


图 3 玉米穗质量构成要素的 $\alpha(q)-f(q)$ 关系曲线
Fig.3 Relationship curves of $\alpha(q)-f(q)$ of components of corn ear weight

表 5 玉米穗质量构成要素的多重分形参数
Tab.5 Multifractal parameters of components of corn ear weight

参数	行粒数	穗轴质量	穗行数	穗粒质量	穗粒数	穗粗	穗长
$\alpha_{\min}$	1.988 8	1.885 7	1.969 1	1.903 7	1.969 5	1.992 1	1.990 4
$\alpha_{\max}$	2.017 9	2.204 4	2.033 4	2.241 4	2.042 4	2.011 2	2.012 5
$\alpha_{\max}-\alpha_{\min}$	0.029 1	0.318 7	0.064 3	0.337 7	0.072 9	0.019 0	0.022 1
$f(\alpha_{\min})$	1.964 7	1.668 5	1.897 8	1.747 3	1.901 3	1.974 9	1.969 1
$f(\alpha_{\max})$	1.947 5	1.458 5	1.908 9	1.361 8	1.877 9	1.968 1	1.964 9
$f(\alpha_{\max})-f(\alpha_{\min})$	-0.017 2	-0.209 9	0.011 1	-0.385 5	-0.023 4	-0.006 7	-0.004 2

谱偏右的趋势比较明显,穗粗、穗长多重分形谱的偏右趋势最弱,行粒数、穗粒数多重分形谱的偏右趋势介于上述两者之间。根据多重分形原理可知,上述分析表明穗行数的空间变异性主要是由高值信息造成的,行粒数、穗轴质量、穗粒质量、穗粒数、穗粗、穗

长的空间变异性主要由低值信息引起。穗粒质量、穗轴质量、穗粒数、穗行数、行粒数、穗长、穗粗多重分形谱的宽度依次为 0.337 7、0.318 7、0.072 9、0.064 3、0.029 1、0.022 1、0.019 0,根据多重分形原理可知,穗粒质量、穗轴质量、穗粒数、穗行数、行粒

数、穗长、穗粗的空间变异强度依次减弱,这与上文中变异系数的分析结果一致。

2.4 玉米穗质量构成要素之间的联合多重分形特征

空间变异性是尺度的函数,2.2 节得出的穗粒质量与穗粗、穗轴质量、穗长、穗粒数、行粒数、穗行数的单一尺度相关性,并不一定能完整地反映出上述玉米穗质量构成要素之间的相关特征,为此,利用联合多重分形方法确定穗粒质量与穗粗、穗轴质量、穗长、穗粒数、行粒数、穗行数的多尺度相关特征。穗长与穗粒质量、穗粗与穗粒质量、穗粒数与穗粒质量、穗行数与穗粒质量、穗轴质量与穗粒质量、行粒数与穗粒质量联合多重分形谱的灰度图如图 4 所

示,穗粒质量与穗长、穗粗、穗粒数、穗行数、穗轴质量、行粒数联合奇异指数的相关性如表 6 所示。分析玉米穗质量构成要素之间的联合多重分形特征时,为清晰简便地表示联合多重分形参数,用 α_{EL} 、 α_{GNPE} 、 α_{ED} 、 α_{GWPE} 、 α_{RNPE} 、 α_{AWPE} 、 α_{GNPR} 分别表示穗长、穗粒数、穗粗、穗粒质量、穗行数、穗轴质量、行粒数的联合奇异指数。研究变量联合多重分形谱的灰度图集中且沿对角线方向延伸的趋势越明显,或研究变量联合奇异指数之间的相关性越显著,则表明研究变量在多尺度上的相关程度越高,反之,则说明研究变量在多尺度上的相关程度越低^[3,20-21]。

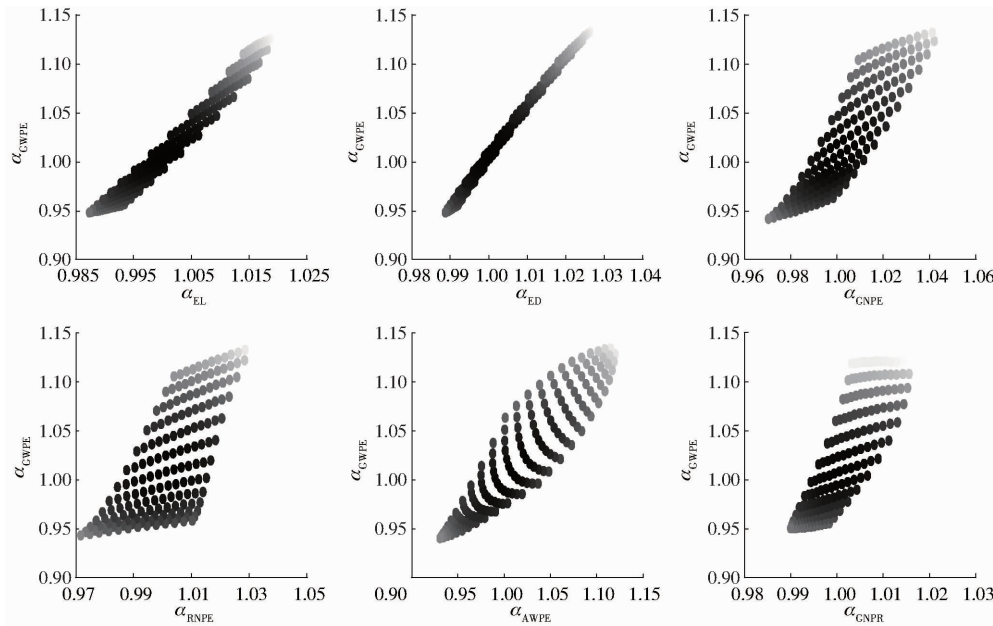


图 4 玉米穗质量构成要素之间联合多重分形谱的灰度图

Fig.4 Grayscale images of joint multifractal spectra between components of corn ear weight

表 6 玉米穗质量构成要素联合奇异指数的相关性

Tab.6 Correlations between joint singularity exponent of components of corn ear weight

参数	α_{AWPE}	α_{EL}	α_{ED}	α_{RNPE}	α_{GNPR}	α_{GNPE}
α_{GWPE}	0.923 **	0.987 **	0.998 **	0.727 **	0.837 **	0.902 **

分析图 4 和表 6 可以发现,穗粒质量与穗粗、穗长、穗轴质量、穗粒数、行粒数、穗行数联合多重分形谱的灰度图集中且沿对角线方向延伸的趋势依次减弱;穗粒质量与穗粗、穗长、穗轴质量、穗粒数、行粒数、穗行数联合奇异指数的相关性也逐渐降低,根据联合多重分形原理可知,穗粒质量与穗粗、穗长、穗轴质量、穗粒数、行粒数、穗行数的多尺度相关程度依次减弱,即在多尺度上,穗粗、穗长、穗轴质量、穗粒数、行粒数、穗行数对穗粒质量空间变异性的影响依次减弱,这与单一尺度上分析得出的相关结果有所差异。此外,穗粒质量与穗长、穗粗、穗粒数、穗行

数、穗轴质量、行粒数的多尺度相关程度明显大于单一尺度上的相关程度。单一尺度和多尺度上得出的结果有所差异,造成这种现象的主要原因是玉米穗质量构成要素的空间分布常常不是单纯的一种,而是多种或多层次结构的叠加,玉米穗质量构成要素空间变异性具有尺度效应,某一种尺度只能揭示相应的变化规律,尺度不同主要影响过程或因素并不一定完全相同而导致的。

3 结论

- (1)研究区雨养条件下玉米穗粒质量、穗轴质量、穗粒数、穗行数、行粒数、穗长、穗粗平均值分别为 181.84 g、23.66 g、588.08 粒、14.75 行、39.94 粒、19.33 cm、15.53 cm;穗粒质量和穗轴质量的变异程度为中等变异,穗粒数、穗行数、行粒数、穗长、穗粗的变异程度为弱变异。
- (2)玉米穗轴质量和穗粒质量的多重分形特征

最明显,行粒数、穗粗和穗长的多重分形特征最不明显,穗行数和穗粒数多重分形特征的明显程度介于上述两者之间。穗行数的空间变异性主要由高值信息造成,行粒数、穗轴质量、穗粒质量、穗粒数、穗粗、穗长的空间变异性主要由低值信息引起,穗粒质量、穗轴质量、穗粒数、穗行数、行粒数、穗长、穗粗的空间变异强度依次减弱。

(3)单一尺度上,玉米穗粗、穗轴质量、穗长、穗粒数、行粒数、穗行数对穗粒质量空间变异性的影响程度依次降低;多尺度上,穗粗、穗长、穗轴质量、穗粒数、行粒数、穗行数对穗粒质量空间变异性的影响依次减弱,与单一尺度上分析得出的相关结果有所差异;穗粒质量与穗长、穗粗、穗粒数、穗行数、穗轴质量、行粒数在多尺度上的相关程度明显大于在单

一尺度上的相关程度。

(4)研究玉米穗质量构成要素的空间变异性机理,对于指导研究区田间精准管理以及提高玉米产量具有重要实际意义,此外,土壤是作物生长的基础,玉米穗质量构成要素空间变异性的产生很大一部分原因是由于土壤特性具有明显的空间变异性,掌握玉米穗质量构成要素的空间变异特征,也可为土壤资源的精准管理提供基础资料。空间变异性具有尺度效应,影响玉米穗质量构成要素空间变异性的主要过程或因素在不同尺度上不一定完全相同,应着重考虑多尺度分析得出的研究结果,这能增强研究结果的适应性。另外,作物生长受土壤和气候等外界条件的影响明显,当外界条件与本研究区相比变化较大时,研究成果的应用需要进一步验证。

参 考 文 献

- 1 KRAVCHENKO A N, BULLOCK D G. Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties[J]. *Agronomy Journal*, 2000, 92(1):75-83.
- 2 张晓光, 黄标, 张贝尔, 等. 盐渍化平原区玉米产量空间变异与地形关系研究[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(11):51-57.
ZHANG Xiaoguang, HUANG Biao, ZHANG Beier, et al. Spatial variability of maize yield and relations to terrain attributes in salinized plain region[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(11):51-57. (in Chinese)
- 3 KRACHENKO A N, BULLOCK Donald, BOAST C W. Joint multifractal analysis of crop yield and terrain slope[J]. *Agronomy Journal*, 2000, 92(6):1279-1290.
- 4 郑海峰, 赵新峰, 马岩. 地形和土壤属性对大豆产量的影响[J]. *土壤通报*, 2008, 39(6):1348-1352.
ZHENG Haifeng, ZHAO Xinfeng, MA Yan. Soybean yields related to topography and soil properties[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(6):1348-1352. (in Chinese)
- 5 许红卫, 周斌, 王人潮, 等. 牧草干物质产量的时空变异及其制图研究[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(4):159-163.
XU Hongwei, ZHOU Bin, WANG Renchao, et al. Temporal and spatial variability of sward dry matter yield patterns and mapping[J]. *Transactions of the CSAE*, 2003, 19(4):159-163. (in Chinese)
- 6 高祥照, 胡克林, 郭焱, 等. 土壤养分与作物产量的空间变异特征与精确施肥[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(6):660-666.
GAO Xiangzhao, HU Kelin, GUO Yan, et al. Spatial variability of soil nutrients and crop yield and site-specific fertilizer management[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(6):660-666. (in Chinese)
- 7 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)
- 8 BLACKMORE S. The interpretation of trends from multiple yield maps[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2000, 26(1):37-51.
- 9 蔡壮. 东北黑土区农业可持续发展研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
CAI Zhuang. Research on sustainable agricultural development of northeast black soil region[D]. Changchun: Jilin University, 2010. (in Chinese)
- 10 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)
- 11 王圣伟, 冯娟, 刘刚, 等. 多嵌套空间尺度农田土壤重金属空间变异研究[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(6):128-135.
WANG Shengwei, FENG Juan, LIU Gang, et al. Multi-nesting spatial scales of soil heavy metals in farmland[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(6):128-135. (in Chinese)
- 12 史文娟, 马媛, 徐飞, 等. 不同微尺度膜下滴灌棉田土壤盐空间变异特性[J]. *水科学进展*, 2014, 25(4):585-593.
SHI Wenjuan, MA Yuan, XU Fei, et al. Spatial variability of soil moisture and salt content in cotton field on microscale under mulch drip irrigation[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(4):585-593. (in Chinese)
- 13 刘继龙, 马孝义, 张振华. 土壤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)

- of east Gansu Province[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31(3):19–25. (in Chinese)
- 33 FLEXAS J, NIINEMETS Ü, GALLE A, et al. Diffusional conductance to CO₂ as a target for increasing photosynthesis and photosynthetic water-use efficiency[J]. *Photosynthesis Research*, 2013, 117(1–3):45–59.
- 34 DE Santana T A, OLIVEIRA P S, SILVA L D, et al. Water use efficiency and consumption in different Brazilian genotypes of *Jatropha curcas* L. subjected to soil water deficit[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2015, 75:119–125.
- 35 接玉玲, 杨洪强, 崔明刚, 等. 土壤含水量与苹果叶片水分利用效率的关系[J]. *应用生态学报*, 2001, 12(3):387–390.
- JIE Yuling, YANG Hongqiang, CUI Minggang, et al. Relationship between soil water content and water use efficiency of apple leaves[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(3):387–390. (in Chinese)
- 36 冯浩, 刘晓青, 左亿球, 等. 砾石覆盖量对农田水分与作物耗水特征的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(5):155–163.
- FENG Hao, LIU Xiaoqing, ZUO Yiqiu, et al. Effect of gravel mulching degree on farmland moisture and water consumption features of crops[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(5):155–163. (in Chinese)
- 37 银敏华, 李援农, 李昊, 等. 覆盖模式对农田土壤环境与冬小麦生长的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(4):127–135, 227.
- YIN Minhua, LI Yuannong, LI Hao, et al. Effects of mulching patterns on farmland soil environment and winter wheat growth[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(4):127–135, 227. (in Chinese)
- 38 李巧珍, 郝卫平, 龚道枝, 等. 不同灌溉方式对苹果园土壤水分动态、耗水量和产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(2):128–133.
- LI Qiaozhen, HAO Weiping, GONG Daozhi, et al. Effects of different irrigation patterns on soil water dynamics, water use and yields in an apple orchard[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007, 25(2):128–133. (in Chinese)
- 39 时学双, 李法虎, 闫宝莹, 等. 不同生育期水分亏缺对春青稞水分利用和产量的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(10):144–151.
- SHI Xueshuang, LI Fahu, YAN Baoying, et al. Effects of water deficit at different growth stages on water use and yield of spring highland barley[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(10):144–151. (in Chinese)
- 40 周昌明, 李援农, 银敏华, 等. 液态地膜覆盖下种植方式对土壤水分和玉米生长的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(4):49–58.
- ZHOU Changming, LI Yuannong, YIN Minhua, et al. Effects of cropping patterns on soil moisture and maize growth under liquid film mulching[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(4):49–58. (in Chinese)
- 41 刘贤赵, 衣华鹏, 李世泰. 渭北旱塬苹果种植分区土壤水分特征[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(11):2055–2060.
- LIU Xianzhao, YI Huapeng, LI Shitai. Soil moisture characteristics of apple planting subarea in Weibei dry highland, Shaanxi Province[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(11):2055–2060. (in Chinese)
- 42 孟平. 苹果蒸腾耗水特征及水分胁迫诊断预报模型研究[D]. 长沙: 长沙中南林学院, 2005.
- MENG Ping. Characteristics of apple tree transpiration models for prediction and diagnosis of water stress[D]. Changsha: Changsha Central South Forestry University, 2005. (in Chinese)
- 43 LIU E K, MEIA X R, YANA C R, et al. Effects of water stress on photosynthetic characteristics, dry matter translocation and WUE in two winter wheat genotypes[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 167:75–85.

(上接第 184 页)

- 14 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)
- 15 杜华强, 汤孟平, 周国模, 等. 天目山物种多样性尺度依赖及其与空间格局关系的多重分形[J]. *生态学报*, 2007, 27(12):5038–5049.
- DU Huaqiang, TANG Mengping, ZHOU Guomo, et al. Linking species diversity with spatial scale dependence to spatial patterns using multifractal analysis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12):5038–5049. (in Chinese)
- 16 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- 17 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.
- 18 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.
- 19 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.
- 20 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)
- 21 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.