

黑土区玉米穗质量与影响因素的联合多重分形研究

刘继龙^{1,2} 张玲玲³ 付强^{1,2} 任高奇¹ 刘璐¹ 虞鹏¹

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 农业部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030; 3. 东北农业大学理学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为揭示黑土区玉米穗质量与影响因素相互关系的尺度效应, 在分析玉米穗质量与影响因素空间变异的基础上, 利用联合多重分形方法研究玉米穗质量与影响因素的多尺度相关性。结果表明: 研究区玉米穗质量的变异程度为中等, 茎粗的变异程度随时间变化由中等变为弱变异, 其他影响因素的变异程度为弱变异; 玉米穗质量与影响因素的空间相关范围介于 7.15 ~ 66.51 m; 玉米穗质量、叶绿素含量、土壤容重、土壤粒径分布体积分形维数具有强烈空间相关性, 茎粗、土壤含水率、土壤饱和含水率具有中等空间相关性; 单一尺度上茎粗和叶绿素含量对玉米穗质量的空间变异性有显著影响, 多尺度上叶绿素含量、土壤粒径分布体积分形维数、茎粗、土壤含水率对玉米穗质量的空间变异性有显著影响; 玉米穗质量与土壤特性、不同时期作物生长指标的多尺度相关程度绝大部分都大于单一尺度上的相关程度; 随取样时间变化, 玉米穗质量与茎粗在单一尺度和多尺度上的相关程度均先增后降, 但开始降低的时间不同。

关键词: 玉米穗质量; 影响因素; 黑土区; 联合多重分形

中图分类号: S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)04-0330-07

Joint Multifractal of Corn Ear Weight and Its Affecting Factors in Black Soil Region

LIU Jilong^{1,2} ZHANG Lingling³ FU Qiang^{1,2} REN Gaoqi¹ LIU Lu¹ YU Peng¹

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

2. Key Laboratory of Effective Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture, Harbin 150030, China

3. College of Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to reveal scale effects of relationships between corn ear weight and its affecting factors, the spatial variability of corn ear weight and its effect factors were firstly studied with geostatistics and multifractal methods, and then the relationships between corn ear weight and its affecting factors were analyzed at the multi-scale with joint multifractal. The results showed that corn ear weight had medium variation, variation degree of stem diameter changed from medium to weak variation with time, and other affecting factors of corn ear weight had weak variation; spatial correlation ranges of corn ear weight and its affecting factors were from 7.15 m to 66.51 m; spatial correlation degrees of corn ear weight, chlorophyll content, soil bulk density and volume fractal dimension of soil particle-size distribution were strong, and the ones of stem diameter, soil moisture and saturated soil moisture were medium; stem diameter and chlorophyll content had remarkable influences on spatial variability of corn ear weight at the single scale, and chlorophyll content, volume fractal dimension of soil particle-size distribution, stem diameter and soil moisture had noteworthy effects on its spatial variability at the multi-scale; most of correlation degrees of corn ear weight and its affecting factors at the multi-scale were more than corresponding ones at the single scale; at the single and multi-scale, as time changed, correlation degrees of corn ear weight and stem diameter were firstly increased and then decreased, but the times that the ones began to reduce were different. Multi-scale analysis could deeply and completely reveal correlations between corn ear weight

收稿日期: 2017-06-12 修回日期: 2017-11-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51409046)、东北农业大学学术骨干项目(16XG12)和黑龙江省博士后科研启动基金项目(LBH-Q16023)

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

and its affecting factors. The research results had great significance in revealing mechanism of spatial variability of corn ear weight, determining scale effects of relationships between corn ear weight and its affecting factors, guiding precision management of crop and soil and increasing crop production.

Key words: corn ear weight; affecting factors; black soil region; joint multifractal

0 引言

精确农业是富有吸引力的前沿性研究领域之一,实现精确农业的关键在于真正做到农田水土资源的分布式调控,而实现农田水土资源分布式调控的关键在于定量表征和确定土壤特性与作物信息的空间变异性以及两者空间变异性之间的相互关系^[1]。国内外学者围绕上述两点展开了大量研究^[2-7],从目前开展的研究来看,关于土壤特性与作物信息空间变异性的研究相对较多,关于土壤特性与作物信息空间变异性相互关系的研究相对较少,而且主要是研究某一尺度上土壤特性与作物信息空间变异性的相互关系。国内外许多研究已表明土壤特性与作物信息的空间变异特征随尺度不同而不同^[8-10],因此,非常有必要探讨土壤特性与作物信息空间变异性的相互关系随尺度变化而呈现出的变化特征,然而关于这一方面的研究非常缺乏。

东北黑土区是我国重要商品粮生产基地,土壤退化十分严重,保证黑土区农田水土资源高效可持续利用,对实现粮食增产和稳产具有重要理论意义和实际意义。定量分析黑土区土壤特性与作物信息的空间变异性以及两者空间变异性之间的相互关系,可为农田水土资源的精准管理提供必要的理论依据和技术支持,从而保证黑土区农田水土资源高效可持续利用、粮食增产与稳产。文献[10]对黑土区玉米穗质量构成要素的空间变异性进行了研究,但没有在此基础上研究玉米穗质量构成要素与土壤特性相互关系的尺度效应,而这是目前需要深入研究的一个问题,此外,作物不同时期的生长状况会影响作物穗质量的形成,不同时期不同生长指标与作物穗质量的相互关系是否具有尺度效应也是需要深入研究的一个问题,目前关于这一方面的研究非常少。

联合多重分形方法是研究不同变量在多尺度上相互关系的有力工具,已用于研究土壤特性之间的关系、作物生长指标信息之间的关系、作物信息与地形的关系等^[11-14]。本文在文献[10]等相关研究的基础上,利用联合多重分形方法研究黑土区玉米穗质量与土壤特性、不同时期作物生长指标等影响因素在多尺度上的相关特征,以期深入揭示土壤特性、

不同时期作物生长指标等因素对玉米穗质量的影响机制,同时为该区农田水土资源的分布式管理等提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验取样

试验地位于东北农业大学香坊试验基地,试验地大小为 48 m × 48 m,将试验地分割成 64 个 6 m × 6 m 的网格,取样点位于每个 6 m × 6 m 网格的中心(图 1)。试验地没有灌溉,试验年份降水信息见图 2。

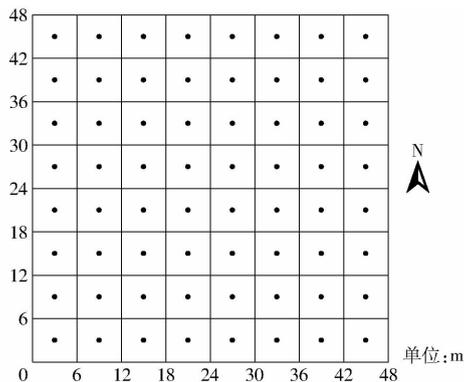


图 1 取样点空间分布图

Fig. 1 Spatial distribution diagram of sampling site

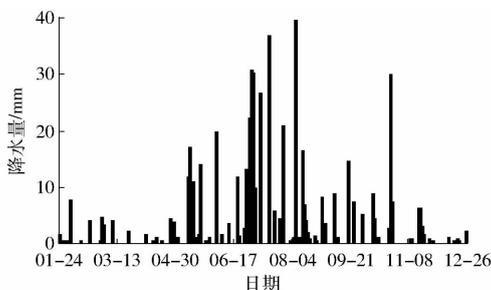


图 2 2013 年降水信息

Fig. 2 Precipitation information in 2013

试验地种植玉米品种为方玉 3 号,2013 年 5 月 8 日机播玉米,机播时施用楚王复合肥 382 kg/hm² (N、P₂O₅、K₂O 的含量分别为 12%、18%、15%), 6 月 23 日追施尿素 305 kg/hm²,玉米株距为 25 cm 左右,玉米行距为 70 cm 左右。2013 年 7 月 11 日、7 月 31 日、8 月 14 日和 8 月 24 日利用土钻采集每个取样点 0 ~ 20 cm 土层和 20 ~ 40 cm 土层的散土样,装入铝盒,带回实验室用干燥法测得 0 ~ 40 cm 土层土壤含水率。玉米收获后,利用 100 cm³环刀采集 0 ~ 40 cm 土层的原状土,先将土样饱和,然后干

燥,测定原状土土壤饱和含水率和土壤容重。0~40 cm 土层散土样风干后,过 1 mm 筛,利用马尔文激光颗粒分析仪(Mastersizer 2000 型)测定土壤粒径分布,土壤粒径分布特征用土壤粒径分布体积分形维数表征。用天平测玉米穗质量;茎粗用软尺测量,测量标准为玉米茎基露出地面第 1 完整节间的中部扁圆处的周长,测定日期为 2013 年 6 月 14 日、7 月 11 日、7 月 31 日、8 月 24 日;用 SPAD-502 型叶绿素含量测定仪测量取样点植株除枯萎叶片外的所有叶片,测量位置位于每个叶片的中间位置,用所有叶片的平均值表示该取样点的叶片叶绿素含量,测定日期为 2013 年 7 月 11 日、7 月 31 日、8 月 14 日、8 月 24 日。测定日期 6 月 14 日、7 月 11 日、7 月 31 日、8 月 14 日、8 月 24 日分别属于玉米苗期、拔节期、吐丝期、灌浆期和成熟期。玉米穗质量是长时间累积结果,茎粗也需要一定时间累积,土壤含水率和叶绿素含量随时间变化具有一定波动性,研究玉米穗质量与影响因素的相互关系时,可能存在土壤含水率和叶绿素含量单次测定结果与穗质量不匹配的问题,为此本文各个测点的土壤含水率和叶绿素含量用不同取样时间的平均值表示。

1.2 研究方法

(1) 土壤粒径分布体积分形维数

已有研究表明相对于用土壤颗粒组成来表征土壤质地特性,用土壤粒径分布分形维数描述更为简单^[15],土壤粒径分布分形维数包括土壤粒径分布质量分形维数和土壤粒径分布体积分形维数,本文中马尔文激光颗粒分析仪测定的土壤粒径分布是土壤颗粒体积分布,故本文用土壤粒径分布体积分形维数表征土壤质地特性,计算公式为^[16]

$$\lg \frac{V}{V_T} = (3 - D) \lg \frac{R}{R_{\max}} \quad (1)$$

式中 D ——土壤粒径分布体积分形维数

R ——某一特定粒径

R_{\max} ——最大土壤颗粒粒径

V ——测定尺度小于某一特定粒径 R 的土壤颗粒构成的体积

V_T ——土壤颗粒总体积

(2) 地统计学

地统计学通过计算研究变量的半方差函数($\gamma(h)$)来分析研究变量的空间变异特征,半方差函数的计算公式为^[17]

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (Z(x_i) - Z(x_i + h))^2 \quad (2)$$

式中 $Z(x_i)$ ——区域化变量在点 x_i 处的值

$Z(x_i + h)$ ——区域化变量在点 $x_i + h$ 处的值

$N(h)$ ——间距为 h 时的样本对数

(3) 联合多重分形

利用联合多重分形方法确定 2 个变量在多尺度上的相关性时,需要确定的联合多重分形参数为 $\alpha(q_1, q_2)$ 、 $\beta(q_1, q_2)$ 和 $f(\alpha, \beta)$,计算公式为^[18]

$$\alpha(q_1, q_2) = -(\lg(N(\delta)))^{-1} \sum_{i=1}^{N(\delta)} (\mu_i(q_1, q_2, \delta) \lg(p_{i,1}(\delta))) \quad (3)$$

$$\beta(q_1, q_2) = -(\lg(N(\delta)))^{-1} \sum_{i=1}^{N(\delta)} (\mu_i(q_1, q_2, \delta) \lg(p_{i,2}(\delta))) \quad (4)$$

$$f(\alpha, \beta) = -(\lg(N(\delta)))^{-1} \cdot \sum_{i=1}^{N(\delta)} (\mu_i(q_1, q_2, \delta) \lg(\mu_i(q_1, q_2, \delta))) \quad (5)$$

其中 $\mu_i(q_1, q_2, \delta) = \frac{(p_{i,1}(\delta))^{q_1} (p_{i,2}(\delta))^{q_2}}{\sum_{i=1}^{N(\delta)} (p_{i,1}(\delta))^{q_1} (p_{i,2}(\delta))^{q_2}}$

$$p_{i,1}(\delta) = \mu_{i,1} / \sum_{i=1}^{N(\delta)} \mu_{i,1}$$

$$p_{i,2}(\delta) = \mu_{i,2} / \sum_{i=1}^{N(\delta)} \mu_{i,2}$$

式中 δ ——尺度

$N(\delta)$ ——尺度为 δ 时划分的网格数

$p_{i,1}(\delta)$ ——变量 1 的质量概率

$\mu_{i,1}$ ——第 i 处变量 1 的值

$p_{i,2}(\delta)$ ——变量 2 的质量概率

$\mu_{i,2}$ ——第 i 处变量 2 的值

q_1, q_2 ——实数

$\alpha(q_1, q_2)$ ——变量 1 的联合奇异指数

$\beta(q_1, q_2)$ ——变量 2 的联合奇异指数

$f(\alpha, \beta)$ ——变量 1 和变量 2 联合奇异指数的维数分布函数

2 结果与分析

2.1 玉米穗质量与影响因素的空间变异特征

图 3 给出了玉米穗质量、叶绿素含量、茎粗、土壤含水率、土壤饱和含水率、土壤容重、土壤粒径分布体积分形维数的变异系数。后文为便于绘制玉米穗质量与影响因素的联合多重分形谱,分别用符号 W 、 C 、 E 、 F 、 G 、 H 、 M 、 N 、 B 、 D 表示玉米穗质量、叶绿素含量、6 月 14 日茎粗、7 月 11 日茎粗、7 月 31 日茎粗、8 月 24 日茎粗、土壤含水率、土壤饱和含水率、土壤容重、土壤粒径分布体积分形维数,全文统一用上述符号表示玉米穗质量及其影响因素。根据变异

系数(C_V)与变异程度的对应关系可知, $C_V \leq 0.1$,表示变异程度为弱变异, $0.1 < C_V < 1$ 表示变异程度为中等变异, $C_V \geq 1$ 表示变异程度为强变异^[19]。从图 3 可以看出,研究区玉米穗质量的变异程度为中等变异,叶绿素含量的变异程度为弱变异,茎粗的变异程度随着时间的变化逐渐降低,由中等变异变为弱变异;土壤含水率、土壤饱和含水率、土壤容重和土壤粒径分布体积分形维数的变异程度均为弱变异。

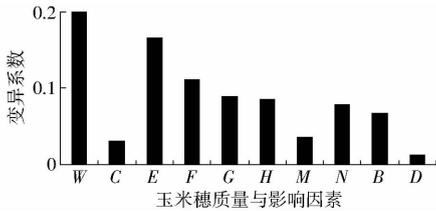


图 3 玉米穗质量与影响因素的变异系数
Fig. 3 Variation coefficient of corn ear weight and its affecting factors

玉米穗质量、叶绿素含量、茎粗、土壤含水率、土壤饱和含水率、土壤容重、土壤粒径分布体积分形维数的半方差函数参数如表 1 所示。半方差函数主要包括块金值、基台值和变程 3 个参数,根据地统计学原理可知,块金值大于零表示研究变量存在由小于采样尺度和试验误差导致的变异;块金值与基台值之比表示研究变量的空间相关程度,小于 25% 表示具有强烈空间相关性,大于 75% 表示具有弱空间相关性,介于 25% 和 75% 之间表示具有中等空间相关性,变程表示研究变量的空间相关范围。分析表 1 可知,玉米穗质量、叶绿素含量、茎粗、土壤含水率、土壤饱和含水率、土壤容重、土壤粒径分布体积分形维数半方差函数的块金值均大于零,变程介于 7.15 ~ 66.51 m,玉米穗质量、叶绿素含量、土壤容重、土壤粒径分布体积分形维数的块金值与基台值之比小于 25%,茎粗、土壤含水率、土壤饱和含水率的块金值与基台值之比介于 25% 和 75% 之间。研究区玉米穗质量、叶绿素含量、茎粗、土壤含水率、土壤饱和含水率、土壤容重、土壤粒径分布体积分形维数均存在由小于采样尺度和试验误差导致的变异,空间相关范围介于 7.15 ~ 66.51 m,玉米穗质量、叶绿素含量、土壤容重、土壤粒径分布体积分形维数具有强烈空间相关性,其空间变异性主要由结构因子导致,茎粗、土壤含水率、土壤饱和含水率具有中等空间相关性,其空间变异性由结构因子和随机因子

表 1 玉米穗质量与影响因素的半方差函数参数

Tab. 1 Semivariance parameters of corn ear weight and its affecting factors

项目	模型	块金值	基台值	变程/m	块金值与基台值之比/%
W	Spherical	0.145	1.024	9.81	14.16
C	Spherical	0.191	1.031	7.15	18.53
E	Exponential	0.314	1.080	24.60	29.07
F	Linear	0.798	1.097	37.82	72.74
G	Spherical	0.639	1.279	66.51	49.96
H	Linear	0.773	1.110	37.82	69.64
M	Linear to sill	0.455	1.205	33.33	37.76
N	Linear	0.815	1.121	37.82	72.70
B	Spherical	0.224	1.007	7.15	22.24
D	Spherical	0.182	0.991	7.15	18.37

共同作用导致。

2.2 玉米穗质量与影响因素的单一尺度相关特征

玉米穗质量与土壤特性、不同时期作物生长指标在单一尺度上的相关特征如表 2 所示,本文中单一尺度指的是取样尺度(6 m × 6 m)。分析表 2 可知,在单一尺度上,玉米穗质量与土壤含水率的相关性不显著,土壤水肥气热是影响作物生长的重要因子,而且它们之间相互联系,相互制约,玉米穗质量与土壤含水率相关性不显著的原因是研究区域内土壤含水率并不单独对作物产生显著影响,而是土壤水肥气热一起对作物产生显著影响,因此分析土壤含水率对作物的影响时,需要同时考虑土壤水肥气热的影响,这也是本文有待于进一步深入研究的问题。玉米穗质量与土壤饱和含水率、土壤容重、土壤粒径分布体积分形维数的相关性均不显著。玉米穗质量除与 6 月 14 日茎粗的相关性不显著外,与其他时间茎粗的相关性显著;玉米穗质量与叶绿素含量的相关性显著。

上述分析表明,在单一尺度上,整体上而言,茎粗和叶绿素含量对玉米穗质量的空间变异性有显著影响,土壤含水率、土壤饱和含水率、土壤容重、土壤粒径分布体积分形维数对玉米穗质量空间变异性的影响程度并不明显。土壤特性和作物信息的空间变异性具有尺度效应,玉米穗质量与土壤特性、不同时期作物生长指标在单一尺度上的这种相关特征,并不一定能深入地揭示出玉米穗质量与土壤特性、不同时期作物生长指标之间

表 2 玉米穗质量与影响因素在单一尺度上的相关性

Tab. 2 Correlations between corn ear weight and its affecting factors at single scale

项目	M	N	B	D	E	F	G	H	C
W	-0.076	-0.002	0.054	0.072	0.117	0.474**	0.447**	0.428**	0.405**

注: **表示在 $p < 0.01$ 水平上显著,下同。

相关特征,为此,需要对玉米穗质量与土壤特性、不同时期作物生长指标在多尺度上的相关特征进行进一步研究。

2.3 玉米穗质量与影响因素的多尺度相关特征

为确定玉米穗质量与土壤特性、不同时期作物生长指标在多尺度上的相互关系,绘制了玉米穗质量与土壤特性、不同时期作物生长指标的联合多重分形谱(图4、5),其中 α_M 、 α_N 、 α_B 、 α_D 、 α_E 、 α_F 、 α_C 、 α_H 、 α_C 、 β_w 分别表示土壤含水率、土壤饱和含水率、土壤容重、土壤粒径分布体积分形维数、6月14日茎粗、7月11日茎粗、7月31日茎粗、8月24日茎粗、叶绿素含量、玉米穗质量的联合奇异指数。本文中的多尺度是指应用多重分形和联合多重分形方法

时构建的 $6\text{ m} \times 6\text{ m}$ 、 $12\text{ m} \times 12\text{ m}$ 、 $16\text{ m} \times 16\text{ m}$ 和 $24\text{ m} \times 24\text{ m}$ 尺度。从图4和图5可以看出,玉米穗质量与土壤含水率、土壤饱和含水率、土壤容重、土壤粒径分布体积分形维数、茎粗、叶绿素含量的联合多重分形谱呈现不同的结构特征,也就是说,玉米穗质量与上述因素的多尺度相关特征有所差异。为进一步量化分析玉米穗质量与上述因素的多尺度相关特征,确定了玉米穗质量与土壤特性、不同时期作物生长指标联合奇异指数的相关性(表3),玉米穗质量与土壤特性、不同时期作物生长指标联合奇异指数的相关程度越强,玉米穗质量与土壤特性、不同时期作物生长指标的相关程度越强^[18, 20-21]。

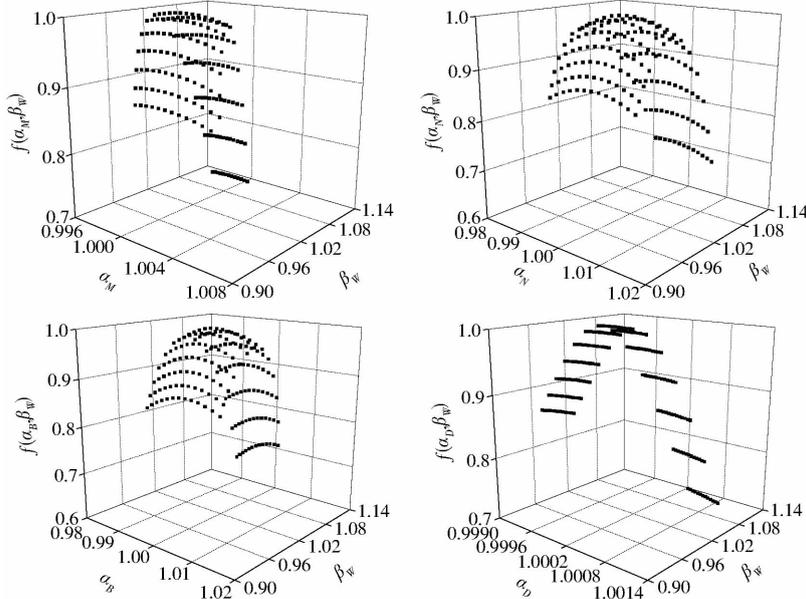


图4 玉米穗质量与土壤特性的联合多重分形谱

Fig. 4 Joint multifractal spectra between corn ear weight and soil properties

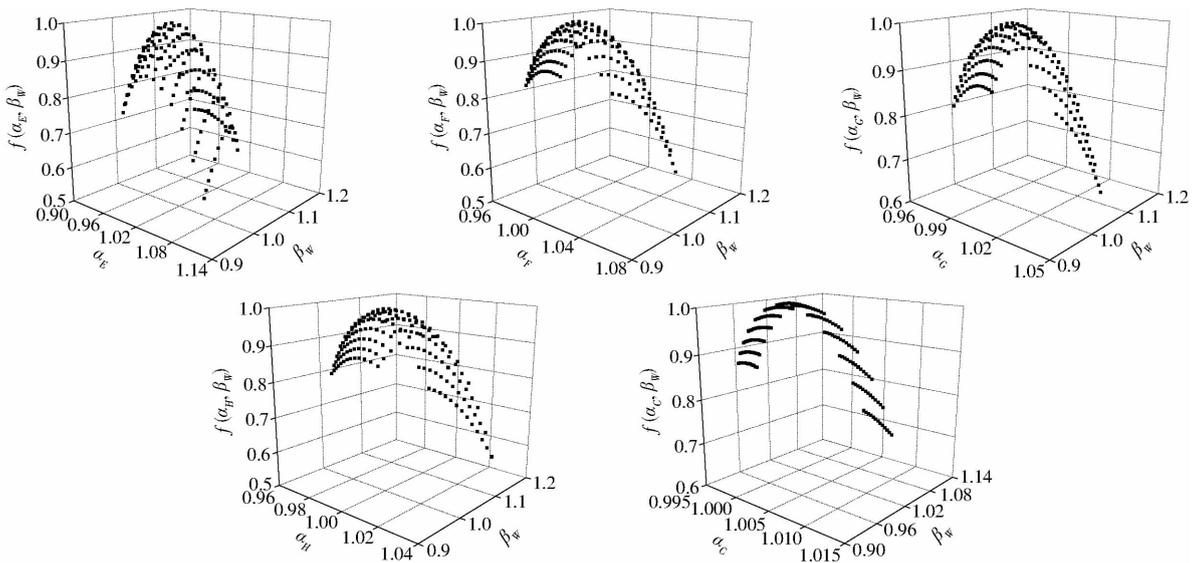


图5 玉米穗质量与茎粗、叶绿素含量的联合多重分形谱

Fig. 5 Joint multifractal spectra between corn ear weight and stem diameter and chlorophyll content

表3 玉米穗质量与影响因素联合奇异指数的相关性

Tab.3 Correlations between joint singularity exponents of corn ear weight and its affecting factors

项目	α_M	α_N	α_B	α_D	α_E	α_F	α_G	α_H	α_C
β_w	-0.437 **	0.111	-0.053	0.879 **	0.033	0.841 **	0.859 **	0.803 **	0.948 **

分析表3可以发现,在多尺度上,玉米穗质量与土壤含水率的相关性显著,两者呈现负相关的原因可能是由于玉米穗质量越大,玉米生长过程中吸收利用的水分越多而导致的,具体原因有待于进一步研究。玉米穗质量与土壤饱和含水率、土壤容重的相关性不显著,玉米穗质量与土壤粒径分布体积分形维数的相关性显著,除玉米穗质量与6月14日茎粗的相关性不显著外,玉米穗质量与其他取样时间茎粗的相关性显著,玉米穗质量与叶绿素含量的相关性显著。上述分析表明,在多尺度上,整体上而言,叶绿素含量、土壤粒径分布体积分形维数、茎粗、土壤含水率对玉米穗质量的空间变异性有显著影响。除玉米穗质量与土壤容重、6月14日茎粗的多尺度相关程度小于单一尺度上的相关程度外,玉米穗质量与其他土壤特性以及不同时期作物生长指标之间的多尺度相关程度均大于单一尺度上的相关程度。随取样时间变化,玉米穗质量与茎粗在单一尺度和多尺度上的相关程度均先增后降,但开始降低的时间不同。空间变异性是不同尺度上不同因素和过程综合作用的结果,多尺度分析能深入地揭示出玉米穗质量与土壤特性、其他作物信息之间的相关特征。

3 结论

(1)研究区玉米穗质量的变异程度为中等变异,土壤含水率、土壤饱和含水率、土壤容重、土壤粒径分布体积分形维数、叶绿素含量的变异程度为弱变异,茎粗的变异程度随时间变化由中等变异变为弱变异;玉米穗质量、叶绿素含量、茎粗、土壤含水

率、土壤饱和含水率、土壤容重、土壤粒径分布体积分形维数均存在由小于采样尺度和试验误差导致的变异;空间相关范围介于7.15~66.51 m;玉米穗质量、叶绿素含量、土壤容重、土壤粒径分布体积分形维数具有强烈空间相关性,其空间变异性主要由结构因子导致,茎粗、土壤含水率、土壤饱和含水率具有中等空间相关性,其空间变异性由结构因子和随机因子共同作用导致。

(2)单一尺度上,茎粗和叶绿素含量对玉米穗质量的空间变异性有显著影响,土壤含水率、土壤饱和含水率、土壤容重、土壤粒径分布体积分形维数对玉米穗质量空间变异性的影响程度不明显;多尺度上,叶绿素含量、土壤粒径分布体积分形维数、茎粗、土壤含水率对玉米穗质量的空间变异性有显著影响,土壤饱和含水率、土壤容重对玉米穗质量空间变异性的影响程度不明显;玉米穗质量与土壤特性、不同时期作物生长指标的多尺度相关程度绝大部分都大于单一尺度上的相关程度;随取样时间变化,玉米穗质量与茎粗在单一尺度和多尺度上的相关程度均先增后降,但开始降低的时间不同。

(3)玉米穗质量的空间变异特征及其与土壤特性、不同时期作物生长指标在单一尺度和多尺度上的相关特征,对揭示研究区玉米穗质量的空间变异性机理,识别玉米穗质量与土壤特性、不同时期作物生长指标相互关系的尺度效应,指导作物和土壤的精准管理以及提高作物产量等具有重要意义,如合理提高研究区农田土壤含水率,玉米生长过程中提高玉米叶片叶绿素含量和茎粗,适当增加农田土壤粘粒含量等措施可提高研究区玉米穗质量和产量。

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 徐英,孔东.不同生育阶段土壤水分和养分空间变异与冬小麦产量关系的研究[J].灌溉排水学报,2009,28(3):27-30. XU Ying, KONG Dong. Relationships between yield and spatial variability of soil water and nutrient contents at different growing stages of winter wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(3): 27-30. (in Chinese)
- 3 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)
- 4 LI T, HAO X M, KANG S Z. Spatial variability of grape yield and its association with soil water depletion within a vineyard of arid northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2017, 179: 158-166.
- 5 RÜTH B, LENNARTZ B. Spatial variability of soil properties and rice yield along two catenas in southeast China[J]. Pedosphere, 2008, 18(4): 409-420.

- 6 LIU Z J, ZHOU W, SHEN J B, et al. A simple assessment on spatial variability of rice yield and selected soil chemical properties of paddy fields in south China[J]. *Geoderma*, 2014, 235-236:39-47.
- 7 YANG Z P, ZHANG Q, WANG Y L, et al. Spatial and temporal variability of soil properties under *Caragana microphylla* shrubs in the northwestern Shanxi Loess Plateau, China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2011, 75:538-544.
- 8 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)
- 9 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/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(4):179-183.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140428&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.028.
WANG Weihua, WANG Quanjiu. Scale-dependency of spatial variability of soil air permeability on typical oasis croplands at middle reaches of Heihe river [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(4):179-183. (in Chinese)
- 10 刘继龙, 任高奇, 付强, 等. 松嫩平原黑土区玉米穗质量构成要素的空间变异性研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(12):178-184, 222. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161222&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.022.
LIU Jilong, REN Gaoqi, FU Qiang, et al. Spatial variability of components of corn ear weight in black soil region of Songnen plain [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(12):178-184, 222. (in Chinese)
- 11 ZELEKE T B, SI B C. Characterizing scale-dependent spatial relationships between soil properties using multifractal techniques [J]. *Geoderma*, 2006, 134:440-452.
- 12 刘继龙, 周延, 付强, 等. 黑土区玉米地作物信息多重分形与多尺度相关特征研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(6):163-170, 162. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160621&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.021.
LIU Jilong, ZHOU Yan, FU Qiang, et al. Multifractal and multi-scale correlation characteristics of crop information of corn field in black soil region [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(6):163-170, 162. (in Chinese)
- 13 KRAVCHENKO A N, BULLOCK D G, BOAST C W. Joint multifractal analysis of crop yield and terrain slope[J]. *Agronomy Journal*, 2000, 92(6):1279-1290.
- 14 BANERJEE S, HE Y H, GUO X L, et al. Spatial relationships between leaf area index and topographic factors in a semiarid grassland: joint multifractal analysis[J]. *Australian Journal of Crop Science*, 2011, 5(6):756-763.
- 15 贾晓红, 李新荣, 张景光, 等. 沙冬青灌丛地的土壤颗粒大小分形维数空间变异性分析[J]. *生态学报*, 2006, 26(9):2827-2833.
JIA Xiaohong, LI Xinrong, ZHANG Jingguang, et al. Spatial heterogeneity analysis of fractal dimension of soil particle for *Ammopiptanthus mongolicus* shrub[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(9):2827-2833. (in Chinese)
- 16 慈恩, 杨林章, 程月琴, 等. 不同耕作年限水稻土土壤颗粒的体积分形特征研究[J]. *土壤*, 2009, 41(3):396-401.
CI En, YANG Linzhang, CHENG Yueqin, et al. Volume fractal property of soil particle size distribution of paddy soils cultivated for different years[J]. *Soils*, 2009, 41(3):396-401. (in Chinese)
- 17 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- 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 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.
- 20 LI Y, LI M, HORTON R. Single and joint multifractal analysis of soil particle size distributions[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(1):75-83.
- 21 ZHANG F S, YIN G H, WANG Z Y, et al. Quantifying spatial variability of selected soil trace elements and their scaling relationships using multifractal techniques[J]. *Plos One*, 2013, 8(7):1-7.