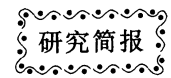


DOI: 10.3724/SP.J.1006.2009.00745



## 基于图像处理的玉米分形维数及其种植密度效应评价

梁淑敏<sup>1</sup> 杨锦忠<sup>2,\*</sup> 李娜娜<sup>1</sup> 郝建平<sup>1</sup> 杜天庆<sup>1</sup> 崔福柱<sup>1</sup> 程丽娟<sup>1</sup>

<sup>1</sup>山西农业大学, 山西太谷 030801; <sup>2</sup>青岛农业大学, 山东青岛 266109

**摘要:** 以玉米品种强盛 49 为试材, 采用数字图像处理技术和计盒维数方法, 研究了种植密度对株型的影响。结果表明, 随着种植密度增加(2.4~7.8 株 m<sup>-2</sup>), 植株的分形维数(FD 值)从 1.192 逐渐下降至 1.163。随着生育进程的推进, 所有种植密度下 FD 值都呈现出先上升后下降的趋势。分形维数与株高、光合叶源和生物产量有一定的相关性。FD 值是定量描述玉米株型的一种重要新性状, 在作物长势与长相生长诊断研究中有广泛的应用前景。

**关键词:** 玉米; 图像处理; 分形维数; 种植密度; 株型

## Effects of Plant Population Density on Fractal Dimension of Corn Based on Image Processing

LIANG Shu-Min<sup>1</sup>, YANG Jin-Zhong<sup>2,\*</sup>, LI Na-Na<sup>1</sup>, HAO Jian-Ping<sup>1</sup>, DU Tian-Qing<sup>1</sup>, CUI Fu-Zhu<sup>1</sup>, and CHENG Li-Juan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China; <sup>2</sup> Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China

**Abstract:** Using fractal analysis method and image process, corn cultivar Qiangsheng 49 was analyzed the effects of plant population density on fractal dimension (FD) of plant skeletal images. When the population density increased from 2.4 to 7.8 plants per square meters by 1.2 increment, the FD value decreased gradually from 1.192 to 1.163. Under all population density conditions, the FD values increased till early kernel filling and then decreased. The FD value was correlated with plant height, photosynthetic leaf sources and biomass to some extents. FD can be used widely in describing corn plant architecture as a new meaningful indicator.

**Keywords:** Corn; Image process; Fractal dimension; Plant population density; Plant architecture

作物株型指植株个体各部分在空间的几何分布, 是影响冠层结构、群体光合、乃至产量的重要因素之一<sup>[1]</sup>。玉米的株型是一种复杂的几何形状, 其特征一般通过茎叶夹角、叶向值、叶均角、株高、穗位高、叶层距、叶片披垂度等进行描述, 但这些方法均是从一个方面或者几个方面反映株型特征, 不能从总体上同时反映叶片、叶鞘、茎秆、雌雄穗的空间配置状态, 因而实际应用效果受到很大限制。

分形维数(fractal dimension, FD)是描述物体的非规则形状的一个重要定量特征, 自 1975 年由 Mandelbrot 提出后<sup>[2]</sup>, 逐渐应用于作物生产的研究, 如不同作物及杂草识别、作物根系结构, 甚至产量的实时监测和耕地的时空变化等<sup>[2-6]</sup>。在玉米上, 相关研究尚不多见<sup>[7]</sup>。

本研究借助现代图像处理技术, 对玉米的株型进行 FD 分析, 拟明确 FD 随生育进程的变化规律, 种植密度对

FD 的影响, 以及 FD 与农艺和其他株型性状的相关性, 讨论其潜在的应用价值。

### 1 材料与方法

#### 1.1 田间试验

试验于 2007 年 4—9 月在山西农业大学农场进行。供试玉米品种为强盛 49, 设置 2.4~7.8 株 m<sup>-2</sup> 共 4 个等间隔的种植密度, 间隔为 1.2 m, 拉丁方设计, 小区面积为 31.11 m<sup>2</sup>。耕层土壤含有有机质 1.55%, 全氮 0.839 g kg<sup>-1</sup>, 速效氮 0.033 g kg<sup>-1</sup>, 有效磷 0.067 g kg<sup>-1</sup>, 速效钾 0.196 g kg<sup>-1</sup>, pH 8.27。施肥量为 276 kg N hm<sup>-2</sup>, 112 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> hm<sup>-2</sup>, 145.4 kg K<sub>2</sub>O hm<sup>-2</sup>。磷、钾肥作底肥施用, 尿素分别在拔节期和大喇叭口期按 2 : 1 比例施用。

#### 1.2 图像采集

出苗后第 10 天(苗期)、29 天(拔节期)、54 天(大喇叭

本研究由山西省资助回国留学人员科研项目(2003049)和青岛农业大学人才基金项目(630746)资助。

\* 通讯作者(Corresponding author): 杨锦忠, E-mail: jzyang@qau.edu.cn; Tel: 0532-88030340

第一作者联系方式: E-mail: shuminliang@163.com; Tel: 15810618263

Received(收稿日期): 2008-09-09; Accepted(接受日期): 2008-12-29.

口期)、71天(吐丝期)、92天(灌浆中期)和118天(成熟期)分6次取样,前期每处理8个植株,后期4个植株。用EPSON CCD PC 850Z型相机,采集分辨率为640×480的JPEG图像。为了保证图像质量,摄像棚内安装3组各4个摄影灯(32 W),1组在上前方,2组在左右前侧向照明,单个植株自然姿态最大侧面向着相机拍照。每批次都先行校正白平衡和几何标定。

### 1.3 测定项目及方法

基于玉米植株的骨架图(图1),采用计盒维数法<sup>[7]</sup>测定分形维数(FD值)。图像处理及FD计算所用软件为笔者开发的计算机代码。参考李少昆等<sup>[8]</sup>的方法测定叶夹角与叶向值。叶层距定义为相邻两片叶叶环之间的距离<sup>[9]</sup>。其他测定项目为株高、穗位高、叶面积指数(LAI)、光合势(LAD)、生物产量与经济产量,方法参见<sup>[10-11]</sup>。

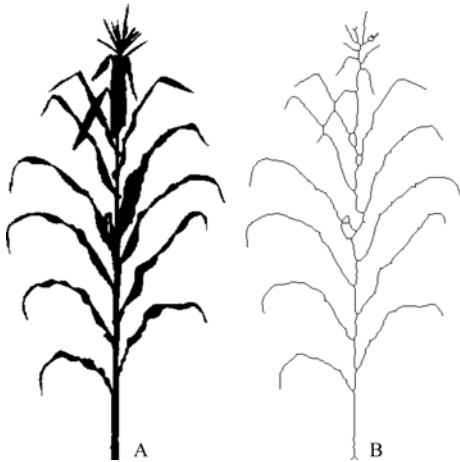


图1 玉米吐丝期植株的二值图(A)及其骨架图(B)  
Fig. 1 Binary (A) and skeleton of binary (B) images of corn plant at silking stage

## 2 结果与分析

### 2.1 不同生育时期的FD动态

随着玉米生育时期的推进,FD值呈现先增后降的趋势,除苗期和成熟期外均达极显著水平(图2)。在玉米拔节期、大喇叭口期、吐丝期和灌浆中期,种植密度间的FD值差异显著( $P$ 值分别为0.005、0.003、0.019和0.001),而

苗期和成熟期,种植密度间的FD值差异不显著( $P$ 值为0.117和0.063)。相同种植密度下不同生育时期的FD值差异均达显著水平( $P < 0.001$ )。显然,植株结构的复杂度随着生育进程增加,受叶数、株高、叶片的空间分布的影响较大。这种变化通过FD得到反映,FD越小,玉米株型越简单;FD越大,株型越复杂。

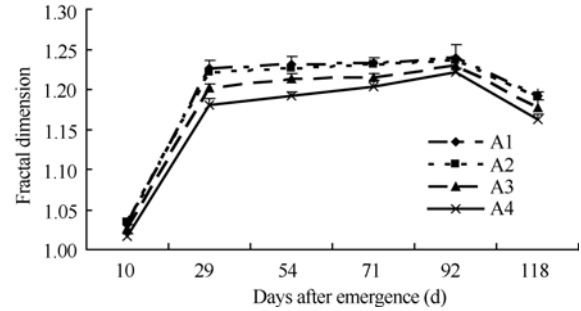


图2 不同种植密度的玉米分形维数的动态变化  
Fig. 2 dynamics of fractal dimension under four population densities in corn

A1 to A4 denote the four population density treatments with plant density of 2.4, 4.2, 6.0, and 7.8 plant  $m^{-2}$ , respectively.

### 2.2 种植密度对FD的影响

2.2.1 不同种植密度下的株型特征的变化 株高和穗位高均随种植密度增加而增加,密度间差异显著。穗上叶夹角和穗下叶夹角均随密度增加而减少,低与高密度间差异显著。穗上叶向值随密度增加而增加,穗下叶向值低中高密度间差异不显著。叶层距随密度增加而增加,且差异显著(表1)。

2.2.2 种植密度对FD的影响 同一生育时期,随着种植密度增加,FD呈下降趋势(图2),其差异均达到显著水平( $P$ 值分别为0.005、0.003、0.019和0.001)。全生育期平均值必然也有相同的趋势,即A1( $FD = 1.192$ ) > A2( $FD = 1.189$ ) > A3( $FD = 1.177$ ) > A4( $FD = 1.163$ )。说明FD值随密度增加而减小。

### 2.3 分形维数与其他性状的相关性

随着植株发育,株高和FD成正相关,株高增加,FD增加。穗位高和FD成负相关,穗位高增加,FD减小(表2)。株高到吐丝期后不再增加,但是由于植株穗部结构发

表1 不同种植密度下玉米的植株形态特征

Table 1 Plant type characteristics under different planting densities

密度 Density (plant $m^{-2}$ )	分形维数 Fractal dimension	株高 Plant height (cm)	穗位高 Ear height (cm)	穗上叶夹角 Leaf angle above ear( $^{\circ}$ )	穗下叶夹角 Leaf angle below ear( $^{\circ}$ )	穗上叶向值 Leaf orientation value above ear( $^{\circ}$ )	穗下叶向值 Leaf orientation value below ear( $^{\circ}$ )	叶层距 Leaf layer space (cm)
2.4	1.192 ± 0.010 a	244.9 ± 4.5 a	109.9 ± 1.9 a	15.6 ± 0.5 a	27.1 ± 0.5 a	48.1 ± 3.3 a	45.9 ± 3.3 a	11.3 ± 0.3 a
4.2	1.189 ± 0.009 a	251.8 ± 1.9 b	113.6 ± 2.5 b	15.7 ± 0.8 a	26.4 ± 0.6 a	58.6 ± 4.0 a	44.9 ± 1.1 a	12.4 ± 0.2 b
6.0	1.177 ± 0.007 b	258.8 ± 3.6 b	116.1 ± 2.4 b	13.8 ± 1.9 ab	22.9 ± 0.6 b	60.8 ± 2.6 a	43.6 ± 1.5 a	13.3 ± 0.2 c
7.8	1.163 ± 0.008 c	272.2 ± 4.4 c	127.0 ± 5.0 b	11.1 ± 0.9 b	20.2 ± 0.5 c	61.1 ± 3.2 b	44.3 ± 1.5 a	13.7 ± 0.2 c

同一列内以不同字母表示处理间差异显著( $n=4$ )。

In each column, values followed by different letters are significantly different at the 0.05 probability level ( $n=4$ ).

表 2 分形维数与冠层结构、光合叶源和生物产量的相关系数  
Table 2 Correlation coefficients between fractal dimension and canopy, photosynthetic capability indices, and biomass yield

性状 Trait	拔节期 Shooting	大喇叭口期 Male tetrad	吐丝期 Silking	灌浆中期 Midfilling	成熟期 Maturity
株高 Plant height	0.640*	0.389	0.344	0.625*	—
穗位高 Ear height	—	—	—	-0.329*	—
叶面积指数 Leaf area index	0.699	0.769	0.869	0.989*	0.843
光合势 Leaf area duration	-0.867	-0.734	-0.694	-0.991**	-0.853
单株干物质 Total biomass per plant	0.784*	0.826*	0.736*	0.838**	0.629*
单株经济产量 Weight of kernels per plant	—	—	—	—	0.860*

\*Significant at  $P < 0.05$ ; \*\*Significant at  $P < 0.01$ .

生变化, 所以 FD 值增加。

随着玉米生育时期的推进(成熟期除外), FD 与 LAI 和单株干物质质量均呈正相关, 而且相关性随着生育进程的发展有增大趋势, 灌浆中期达到最大(表 2)。FD 与 LAD 呈极显著负相关。说明灌浆中期维持良好的植株空间分布结构, 对于持续超过 6 周的高 LAI、强 LAD 范围和较高的单株干物质积累有重要意义, 即 FD 可以反映玉米植株的叶片冠层分布和光合叶源状况。

通过密度调控影响了玉米植株的空间分布, 表现为 FD 的规律变化, 进一步影响到单株经济产量和单位面积经济产量, 结果: FD 和单株经济产量呈极显著正相关; 和单位面积经济产量呈极显著负相关。即随着 FD 降低, 单株经济产量减小而单位面积经济产量增加。表明维持良好的植株空间分布结构, 有利于群体经济产量的提高。

### 3 讨论

由于玉米植株在大田生产上很少有分蘖, 并且分布在同一个平面的叶片很少有交叠, 所以玉米的株型结构相对简单, 其特征和空间占有模式可以简单的来描述。决定玉米株型结构变化的因素有叶龄、叶数、叶层距、叶倾角、叶方位角和叶向值等。本研究表明这些株型特征在中、低密度和高密度间差异显著, 与同类研究有相同的结果<sup>[11]</sup>, 说明试验达到了通过种植密度调节株型的预期效果, 意味着基于试验结果对 FD 进行分析有较好的代表性。

目前, 育种上玉米株型按叶向值的大小, 有紧凑、松散和中间类型之分<sup>[12-13]</sup>, 这种划分还不能够从总体上反映叶片与茎秆之间夹角的大小、叶片的下披程度、叶片的长宽、茎秆的高度、雄穗的大小及它们的着生方位和相互配置疏紧的情况。茎叶夹角不能反映叶片的波折程度, 叶向值没有充分考虑叶片达最高点后的部分在空间的分布状态<sup>[8]</sup>, 并且这些性状包括叶均角都没有考虑叶层距<sup>[8,14]</sup>。叶层距与冠层中的通风透光状况有密切的关系, 任何忽视它的株型描述方法, 都不可能是一种很好的方法。

实践中经常发现相同品种在不同生长条件下, 叶层距有较大变化<sup>[9]</sup>。如果其他条件保持不变, 人为地将叶层距改变(加大或减小), 株型发生明显变化, FD 也会发生相应改变(具体计算结果略), 说明 FD 与其他表示株型特征

的性状不同, 能够从整体上描述植株的几何结构。根据 FD 的定义, 既能计算整个植株的 FD 值, 也可以计算以果穗为界植株上/下半部的 FD 值, 甚至可以计算植株的每个构造单元(节间+节上叶)的 FD 值。值得指出, FD 还可以定量描述雄穗的大小与分枝的多少及其披散程度, 为精确描述玉米株型提供了可行途径。总之, FD 能从整体对玉米株型进行定量描述, 为评价栽培措施对冠层的影响提供了一种新颖有效的方法, 奠定了定量描述冠层结构的基础, 可以作为一个衡量玉米植株结构复杂程度的重要性状。因此, 有必要明确 FD 在不同产量水平和不同生长条件下的变化规律, 探索依据 FD 建立玉米群体的生长检测与诊断技术。

### References

- [1] Li S-K(李少昆), Wang C-T(王崇桃). The methods of obtaining and expressing information of crop plant shape and population structure. *J Shihezi Univ* (石河子大学学报), 1997, 1(3): 250–256 (in Chinese with English abstract)
- [2] Li Z-C(李志臣), Ji C-Y(姬长英). Calculation of weed fractal dimension based on image analysis. *Trans CSAE* (农业工程学报), 2006, 22(11): 175–178 (in Chinese with English abstract)
- [3] Frontier S. Application of fractal theory to ecology. In: Legendre P, Legendre L, eds. *Developments in Numerical Ecology*. New York: NATO Scientific Affairs Division, 1987. pp 335–377
- [4] Eghball B, Settimi J R, Maranville J W, Parkhurst A M. Fractal analysis for morphological description of corn roots under nitrogen stress. *Agron J*, 1993, 85: 287–289
- [5] Li X-H(李谢辉), Tashpolat Tiyip(塔西甫拉提·特依拜), Ren F-W(任福文). Dynamic changes of cropland based on fractal theory and its driving forces in aridoasis. *Trans CSAE* (农业工程学报), 2007, 23(2): 65–70 (in Chinese with English abstract)
- [6] Fournier C, Andrieu B. A 3D architectural and process-based model of maize development. *Ann Bot*, 1998, 81: 233–250
- [7] Foroutan-Pour K, Dutilleul P, Smith J D L. Effects of plant population density and intercropping with soybean on the fractal dimension of corn plant skeletal images. *Agron Crop Sci*, 2000, 184: 89–100
- [8] Li S-K(李少昆), Zhang X(张弦), Zhao M(赵明), Wang S-A(王树安). Studies on the technique of multi-media image processing

- for plant shape information of crop. *Acta Agron Sin* (作物学报), 1998, 24(3): 265–271 (in Chinese with English abstract)
- [9] Guan C-H(关彩虹), Yang J-Z(杨锦忠). Plant similarity studies within different summer corn populations. *Acta Bot Boreali-Occident Sin* (西北植物学报), 2000, 20(2): 238–242 (in Chinese with English abstract)
- [10] Xiao S-H(肖世和), Chen X(陈孝), Wu Z-S(吴兆苏). Dynamic analysis of biomass yield and its components after anthesis in wheat. *Acta Agron Sin* (作物学报), 1995, 21(2): 155–160 (in Chinese with English abstract)
- [11] Lü L-H(吕丽华), Tao H-B(陶洪斌), Xia L-K(夏来坤), Zhang Y-J(张雅杰), Zhao M(赵明), Zhao J-R(赵久然), Wang P(王璞). Canopy structure and photosynthesis traits of summer maize under different planting densities. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2008, 34(3): 447–455(in Chinese with English abstract)
- [12] Zhang L-X(章履孝), Chen J(陈静). The maize plant type of standards and analysis. *Jiangsu Agric Sci* (江苏农业科学), 1991, (5): 30–31(in Chinese)
- [13] Pei X-D(裴鑫德). The discriminant model of maize plant type. *Acta Agric Boreali-Sin* (华北农学报), 1994, 9(2): 1–8(in Chinese with English abstract)
- [14] Zhang X(张弦), Yan Y-L(严衍录). Gain crop shape information with image processing technique. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 1996, 29(5): 89–93(in Chinese with English abstract)