

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2008.01637

## 以盒维数法分形分析水稻根系形态特征及初探其与锌吸收积累的关系

汪洪<sup>1</sup> 金继运<sup>1</sup> 山内章<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 / 农业部植物营养与养分循环重点开放实验室, 北京 100081; <sup>2</sup> 名古屋大学生命农学研究所, 日本名古屋市 464-8601)

**摘要:** 利用特定根盒装土, 培养 4 个水稻品种(MADHUKAR、IR8192-200、IR26、IR8192-31)植株, 用钉板法结合透明塑料膜固定获得近似原位根系样品, 扫描得到根系的二维平面图像, 以分形理论为基础, 利用盒维数法结合根系图像分形分析程序计算根系构型的分形维数和分形丰度, 比较各品种根系的形态特征, 并对分形参数、根系长度和植株锌含量间的相关关系做了初步探讨。结果表明, 根系分形维数和分形丰度以 MADHUKAR 最大, IR8192-200 最小, 说明 MADHUKAR 根系分支多, 在土壤中拓展体积大。分形维数、分形丰度与根系总长度之间均呈明显正相关, 而且根系总长度与分形丰度相关系数高于与分形维数的相关系数。分形维数和分形丰度与植株地上部干重、单位 Zn 浓度所产出的地上部生物量、地上部 Zn 吸收总量之间均呈显著正相关, 与地上部 Zn 浓度呈负相关。水稻根系形态和构型的变化影响植株生长, 影响植株 Zn 吸收积累及体内 Zn 的利用效率。盒维数法分形分析模型可用于研究水稻根系形态和构型, 为其提供新方法。

**关键词:** 分形; 根系; 水稻; 锌

## Fractal Analysis of Root System Architecture by Box-Counting Method and Its Relationship with Zn Accumulation in Rice (*Oryza sativa* L.)

WANG Hong<sup>1</sup>, JIN Ji-Yun<sup>1</sup>, and YAMAUCHI Akira<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Plant Nutrition and Nutrient Cycling Research, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China; <sup>2</sup> Graduate School of Bioagricultural Sciences, Nagoya University, Chikusa, Nagoya 464-8601, Japan)

**Abstract:** The analysis on the characterization of root system architecture would assist to better understand the functional and growth strategies of root systems of rice plants, which is closely related to rice plant's adaptation to insufficient supply of soil water and nutrient. The fractal analytical method was used to examine the difference of the root systems of four rice genotypes (MADHUKAR, IR8192-200, IR26, and IR8192-31) and the relationship between root length and plant Zn uptake was explored. The root systems were grown for one month in root boxes with 25 cm in length, 2 cm in width and 40 cm in depth, which were filled with soil. The root systems were harvested following the needle-pinboard method, and then spread on the transparent plastic films with nets after carefully washing out the soils. The two-dimensional images of root systems were digitized by using a scanner. The digitized images were used for analysis based on fractal geometry with the box-counting method. The fractal parameters differed among the four selected rice genotypes. Variety of MADHUKAR had the greatest values of fractal dimension (FD) and fractal abundance (FA). IR8192-200's roots had the smallest FD and FA. It was suggested that MADHUKAR had a higher capacity of root branch and a larger volume of soils explored by the whole root systems than other three rice genotypes. The FD and FA had significant correlations with total root length. Moreover, the correlation coefficient between FA and total root length was higher than that FD and total root length. The FD and the FA of rice roots were observed to positively correlate with shoot dry weight, shoot biomass per unit of Zn concentration, and Zn accumulation in shoot. However, shoot Zn concentration was negatively correlated with FD and FA. Root configuration changes might affect the growth of rice plants, plant Zn uptake and Zn use efficiency. The fractal

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2007CB109302); 人事部留学回国人员科研活动择优资助项目

作者简介: 汪洪(1970-), 男, 安徽桐城人, 博士, 副研究员。主要研究领域: 植物根系生物学与中微量元素营养、农业环境生态与植物重金属胁迫。Tel: 010-82108662; E-mail: wanghong@caas.ac.cn

Received(收稿日期): 2007-08-22; Accepted(接受日期): 2008-03-28.

analysis of root structure by box-counting method can be used to evaluate root system of different rice genotypes.

**Keywords:** Fractal analysis; Root systems; Rice (*Oryza sativa* L.); Zn

1967 年法国数学家 Mandelbrot B B 在 *Science* 杂志上发表题为“英国的海岸线有多少长”的文章<sup>[1]</sup>, 提出分形(fractal)概念。1977 年和 1982 年他又相继出版著作《分形: 形状、机遇和维数》(Fractal: Form, Chance and Dimension)和《自然界的分形几何》(The Fractal Geometry of Nature)<sup>[2-3]</sup>, 将分形理论及应用推向一个全新的阶段。目前分形理论已成为一种描述大自然特征的崭新工具, 广泛应用于数学、物理、化学、冶金、社会、经济等领域。所谓分形就是由各个部分组成的形态, 每个部分以某种方式与整体相似, 具有自相似性和标度不变性。自相似性(self-similarity)被称作分形体的本质特征, 是指某种结构或过程的特征从不同的空间尺度或时间尺度来看都是相似的; 标度不变性是指在分形体上任选一局域, 其放大图又会显示原图的形态特征。

分形体是复杂多样的, 不论其起源或构造的方法如何, 可用 Mandelbrot 提出分数维(fractal dimension)的概念来度量物体的分形特征, 是表征分形体的一个重要参数<sup>[2-3]</sup>。分形维数大多为非整数维, 定义很多, 有 10 多种不同的维数计算方式, 如 Hausdorff 维数、盒维数、关联维数、信息维、相关维、填充维等等。盒维数(box-counting or box dimension)也称计盒维数或盒子维, 是应用最为广泛的一种维数<sup>[4-8]</sup>。根据 Mandelbrot 的分维估算模型, 用盒维数表示根系分枝状况的原理如下。将根系投影或平展在边长为  $L$  的正方形二维平面上, 再将平面分成  $(L/r)^2$  个边长为  $r$  的小正方形, 计算根系所截的小正方形数目  $N_r$ , 如果小正方形边长  $r$  逐渐减小, 也就是测量尺度减小, 根系所截的小正方形数目  $N_r$  的值就不断增大, 即正方形覆盖的根系越来越精细, 能反映出的根系分枝越来越多。得到不同水平上相应  $N_r$  值后, 分别以  $\lg r$  和  $\lg N_r$  为横坐标和纵坐标作图, 回归直线方程为  $\lg N_r = -D \lg r + \lg K$ , 公式中  $K$  为定值, 即  $N_r \propto r^{-D}$ , 回归直线斜率的负数即  $D$  值就是所求的分形维数(fractal dimension),  $\lg K$  为回归直线的截距, 称为分形丰度(fractal abundance)<sup>[4-7]</sup>。

植物根系是土壤水分和养分的直接吸收利用者, 理想的根系形态、构型以及生理生化特性对于植株高效吸收利用土壤中养分和水分具有重要作用<sup>[9-13]</sup>。

植物根系的结构极其复杂, 根系粗细和长短不一, 形状各异, 由成千上万的根尖以及不同级别的根组成, 根系在生长介质中的空间分布称为根系构型<sup>[10-11]</sup>, 但复杂的根系结构也具有科学的规律, 根系形态存在着明显的自相似性<sup>[4-6,10-11]</sup>。如直根系, 主根可以分支产生一级侧根, 一级侧根伸长到一定距离产生二级侧根, 二级侧根到一定距离再产生三级侧根……, 每一分生次级侧根都与主根具有相似的分布形态; 须根系的分生能力较为一致, 每一级根的侧根发育以相似的比例分生<sup>[4-6]</sup>。1989 年日本名古屋大学 Tatsumi 等人发表论文, 根据分形几何理论, 提出以盒维数法对植物根系形态特征进行分形分析<sup>[6]</sup>。自此, 分形理论在植物根系的描述和形态模拟上得到普遍应用<sup>[7-8,14-20]</sup>。王义琴等<sup>[4-5]</sup>利用盒维数法计算春小麦和高粱根系的分形维数, 对根系的分枝习性进行定量测量, 反映出根系的分枝特性。分形维数大, 表明植物根系生长发育较好。杨培岭等<sup>[21-22]</sup>应用分形理论研究小麦根系形态。廖成章和余翔华<sup>[23]</sup>应用分形理论研究马尾松根系的分形维数和胸径、树高之间的相关关系。但还少见应用分形理论来研究与分析比较作物不同品种根系的分形特征。锌(Zn)是植物必需的营养元素, 缺 Zn 不仅影响水稻生长和产量提高<sup>[24]</sup>, 还影响锌在稻米籽粒中的积累, 继而通过食物链影响人体 Zn 的摄入([www.harvestplus.org](http://www.harvestplus.org))。中国约 6667 万公顷水稻土缺锌, 土壤有效 Zn 含量低于  $0.5 \mu\text{g g}^{-1}$ <sup>[25]</sup>。国际水稻研究所(IRRI)通过田间试验筛选出一批水稻品种进行耐低 Zn 胁迫和植株 Zn 积累的研究<sup>[24,26-27]</sup>。但对不同品种水稻根系形态特征及与水稻植株 Zn 吸收、积累和利用之间关系, 还未见报道。本文以盒维数法分形分析理论为基础, 利用基于 NIH1.61 软件(US National Institutes of Health, <http://rsb.info.nih.gov>)开发出的分析程序研究不同品种水稻根系的构型特征, 初步探讨水稻根系分形参数与根系长度以及植株 Zn 元素含量之间的关系。

## 1 材料与方 法

### 1.1 水稻品种

MADHUKAR、IR8192-200、IR26、IR8192-31, 种子来自 IRRI。

## 1.2 土壤

火山灰发育的黑土, 土壤 pH (1 5 的土 H<sub>2</sub>O) 5.94, 含全 C 2.07%、无机态 N (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N) 10.3 mg kg<sup>-1</sup>、Truog-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> [pH 3.0 的(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 提取] 50.0 mg kg<sup>-1</sup>, 交换态 K<sub>2</sub>O 130.0 mg kg<sup>-1</sup>、HCl-Zn 2.6 mg kg<sup>-1</sup>。播种前按照 N 0.20 g kg<sup>-1</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.12 g kg<sup>-1</sup>, K<sub>2</sub>O 0.08 g kg<sup>-1</sup> 土施尿素和 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 以 ZnCl<sub>2</sub> 形式施入 Zn 5.0 mg kg<sup>-1</sup>。

## 1.3 植株培养与根系样品采集

水稻种子 70% 酒精消毒 10 min, 3% 次氯酸钠溶液消毒 15 min, 去离子水清洗干净, 浸泡过夜, 放置在湿润滤纸上 24 h, 发芽后播种在有机玻璃板制成的根盒(长 25 cm, 宽 2 cm, 深 40 cm)中, 每盒装风干土壤 1.8 kg, 种植水稻苗 1 株, 去离子水灌溉, 维持土壤水分含量 25%~30%。植株生长 1 个月后, 先收获地上部, 再将根盒的宽面有机玻璃板撤出, 用间隔 2 cm 的钉板压入土壤, 固定好根系, 小心冲洗去附着在根系上的土壤, 收获完整的根系样品, 用特制的透明塑料薄膜固定好根系, 保持根系的二维平面。每品种设 3 次重复。

## 1.4 根系分形分析与根系长度、直径测定

根系样品经 0.25% 考马斯亮蓝染色后, 在 EPSON ES2200 扫描仪上以 300 dpi 分辨率数字化为图形文件, 然后利用基于 NIH1.61 软件上开发出的程序<sup>[6,28]</sup>对根系二维图像进行分析, 原理是在根系二维平面上, 分成边长  $r$  (1~64 mm) 不同的小正方形格子, 计算根系所截的小正方形格子数目  $N_r$ 。以  $\lg N_r$  为纵坐标,  $\lg r$  为横坐标, 作线性回归, 得到方程  $\lg N_r = -D \lg r + \lg K$ , 回归直线斜率的负数  $D$  值即为分形维数  $FD$  ( $1 \leq FD \leq 2$ ),  $\lg K$  称为分形丰度  $FA$ <sup>[6,28]</sup>。利用基于 NIH1.61 软件上开发出的程序<sup>[29-30]</sup>测定根系长度随直径的分布, 获得总根系长度以及直径分别

$\leq 0.15$  mm、0.15~0.60 mm 和  $>0.60$  mm 的根系长度。

## 1.5 地上部生物量和 Zn 含量测定

收获水稻地上部, 用去离子水洗净, 在 105℃ 下杀青 30 min, 70℃ 下烘 72 h, 称干重。样品经不锈钢的粉碎机粉碎过筛, 用 HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub> 消煮, 火焰原子分光光度计测定 Zn 含量。

## 1.6 数据统计

用 SPSS 统计软件对数据进行方差分析、LSD 多重比较检验以及相关分析, 在  $P=0.05$  水平上统计比较显著性差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 水稻植株地上部生物量与根系长度

4 个水稻品种中以 MADHUKAR 地上部干物重最大, 根系总长度最长, 直径  $\leq 0.15$  mm 和 0.15~0.60 mm 根系长度最长, IR8192-31 为其次, IR26 和 IR8192-200 生物量最小, 根系长度最短(表 1)。图 1 和图 2 显示直径为 0.08~0.15 mm 和 0.15~0.30 mm 范围内的根系长度占总根系长度的比例最高, 本试验期间生长的水稻根系多分布在  $\leq 0.30$  mm 范围内。不同直径范围内根系长度在总根长中所占比例在 4 个水稻品种间无明显差异(图 2)。

### 2.2 根系分形参数及其与根系长度之间的相关分析

用盒维数法计算的水稻根系分形参数包括分形维数和分形丰度(表 2)。水稻品种 MADHUKAR 根系分形维数最大, IR8192-31 为其次, IR8192-200 和 IR26 最小(表 2), 说明水稻品种 MADHUKAR 根系分支明显比其他 3 个品种多。MADHUKAR 根系分形丰度最大, IR8192-31 和 IR26 为其次, IR8192-200 最小(表 2)。反映出 MADHUKAR 根系在土壤中拓展的体积明显比其他 3 个品种大。

表 1 不同水稻品种的地上部干物重和根系长度

Table 1 Shoot dry weight and root length of four rice genotypes

品种 Genotype	地上部干物重 Shoot dry weight (g plant <sup>-1</sup> )	根系总长度 Total root length (cm)	直径 0.15 mm 根系长度 The root length of diameter 0.15 mm (cm)	直径 0.15~0.60 mm 根系长度 The root length of diameter 0.15-0.60 mm (cm)	直径 >0.60 mm 根系长度 The root length of diameter >0.60 mm (cm)
MADHUKAR	7.87 b	7520.7 c	3422.5 b (45.6) <sup>†</sup>	3860.6 b (51.3)	237.7 b (3.1)
IR8192-200	2.32 a	3445.5 a	1576.4 a (45.6)	1763.4 a (51.3)	105.7 ab (3.2)
IR26	3.59 a	4524.9 ab	2436.8 a (53.4)	2022.8 a (45.1)	65.3 a (1.5)
IR8192-31	4.36 a	5155.9 b	2391.7 a (46.7)	2614.9 a (50.5)	149.4 ab (2.8)

<sup>†</sup> 括号内数据是不同直径范围内根系长度占总根长的百分比例。标以不同字母的值在  $P=0.05$  水平上差异显著。

<sup>†</sup> Values in the parentheses show the percentage of the length of roots with various diameters in total root length. Means within a column followed by the same letter are not significant at  $P=0.05$ .

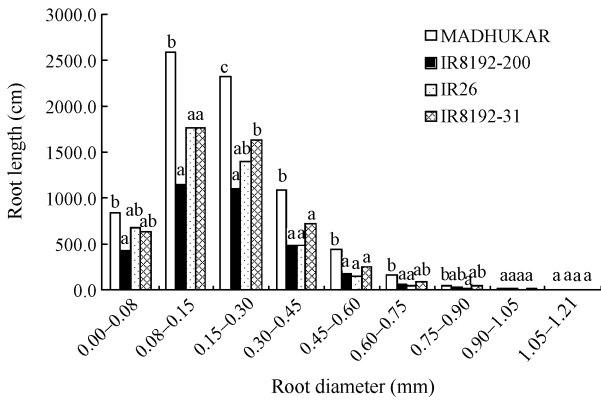


图 1 不同直径的根系长度分布

Fig. 1 Root length distribution classified by various root diameters

图中框柱上标注不同字母的表示水稻品种之间在  $P=0.05$  水平上差异显著。

Bars with different letters are significantly different (LSD test at  $P<0.05$ ) between the four rice genotypes.

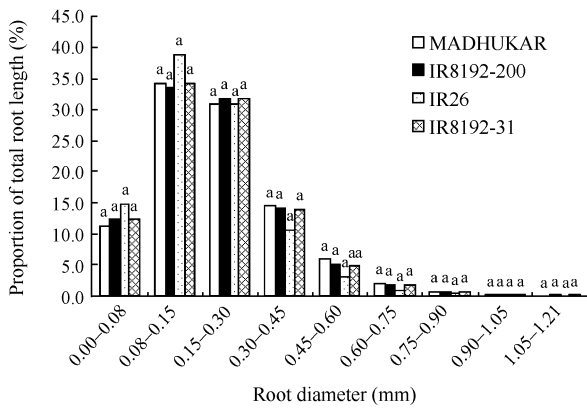


图 2 不同直径范围内根系长度占总根长的百分比例

Fig. 2 Proportion (%) of root length with different diameters in total root length

图中框柱上标注不同字母的表示水稻品种之间在  $P=0.05$  水平上差异显著。

Bars with different letters are significantly different (LSD test at  $P<0.05$ ) between the four rice genotypes.

分形维数和分形丰度与根系总长度之间呈明显的直线相关关系。分形丰度与根系总长度之间相关系数达到 0.983, 高于分形维数与根系总长度之间相

关系数 0.824。不同直径范围内根系长度与分形维数和分形丰度相关性也较高, 但以直径为 0.15~0.60 mm 范围内的根系长度与分形维数和分形丰度相关系数最大(表 3), 说明植株细根越多, 根系分形维数和分形丰度越大, 根系分支就越多, 根系在土壤中拓展的体积越大。

表 2 不同水稻品种的根系分形维数和分形丰度  
Table 2 Fractal values (fractal dimension and fractal abundance) of roots in four rice genotypes

品种 Genotype	分形维数 Fractal dimension	分形丰度 Fractal abundance
MADHUKAR	1.62 b	6.31 c
IR8192-200	1.50 a	5.95 a
IR26	1.54 a	6.05 ab
IR8192-31	1.56 ab	6.14 b

标以不同字母的值在  $P=0.05$  水平上差异显著。

Means within a column followed by the same letter are not significant at  $P=0.05$ .

### 2.3 根系分形参数与水稻植株地上部锌吸收量之间相关分析

4 个水稻品种中, IR8192-31 植株体内 Zn 浓度最高, 而 MADHUKAR 最低, 但 MADHUKAR 地上部生物量较大, 其 Zn 吸收总量较高。单位地上部 Zn 浓度所产出的生物量以 MADHUKAR 最大, 其余 3 个品种间差异不显著。这反映出 MADHUKAR 可能是个 Zn 高效利用品种, 而 IR8192-31 可能是 Zn 高效吸收品种, 因为其体内 Zn 浓度较高(表 4)。

根系分形维数和分形丰度与地上部干重、单位 Zn 浓度所产出的地上部生物量之间呈明显直线正相关关系, 分形丰度与地上部干重、单位 Zn 浓度所产出的地上部生物量之间相关系数高于分形维数与这些因素之间的相关系数。

分形维数和分形丰度与地上部 Zn 吸收总量之间直线相关关系明显, 而且分形丰度与地上部 Zn 吸收总量之间相关系数高于分形维数与其相关系

表 3 根系分形维数、分形丰度指标与根系长度间的相关分析

Table 3 The correlation coefficient of fractal dimension and fractal abundance with total root length and the length of root with different diameters

	根系总长度 Total root length	直径 $\leq 0.15$ mm 根系长度 The root length of diameter 0.15 mm	直径 0.15~0.60 mm 根系长度 The root length of diameter 0.15~0.60 mm	直径 $>0.60$ mm 根系长度 The root length of diameter $>0.60$ mm
分形维数 Fractal dimension	0.824**	0.689*	0.872**	0.717**
分形丰度 Fractal abundance	0.983**	0.915**	0.973**	0.727**

标以不同字母的值在  $P=0.05$  水平上差异显著。

Means within a column followed by the same letter are not significant at  $P=0.05$ .

表4 水稻地上部 Zn 浓度、Zn 吸收量及单位地上部 Zn 浓度所产出的生物量

Table 4 Zn concentration in shoot, Zn accumulation in shoot and shoot dry weight per unit of shoot Zn concentration

品种 Genotype	Zn 浓度 Zn concentration in shoot ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	Zn 吸收积累量 Zn accumulation in shoot ( $\mu\text{g plant}^{-1}$ )	单位 Zn 浓度所产出的地上部生物量 Shoot dry weight/shoot Zn concentration
MADHUKAR	150.4 a	175.0 c	0.053 b
IR8192-200	184.1 ab	98.6 a	0.012 a
IR26	181.1 ab	117.0 ab	0.020 a
IR8192-31	208.9 b	142.0 b	0.025 a

标以不同字母的值在  $P=0.05$  水平上差异显著。

Means within a column followed by the same letter are not significant at  $P=0.05$ .

表5 水稻根系分形维数、分形丰度与地上部生物量和锌吸收之间的相关分析

Table 5 The correlation coefficient of fractal dimension and fractal abundance with shoot dry weight and Zn uptake in shoots

	地上部生物量 Shoot dry weight	单位 Zn 浓度所产出的地上部生物量 Shoot dry weight /shoot Zn concentration	Zn 浓度 Zn concentration in shoot	Zn 吸收积累量 Zn accumulation in shoot
分形维数 Fractal dimension	0.796**	0.781**	-0.745**	0.677*
分形丰度 Fractal abundance	0.859**	0.835**	-0.647*	0.847**

标以不同字母的值在  $P=0.05$  水平上差异显著。

Means within a column followed by the same letter are not significant at  $P=0.05$ .

数。但分形维数和分形丰度与地上部 Zn 浓度之间呈明显直线负相关关系。反映出根系构型的变化影响水稻植株 Zn 吸收积累量和体内 Zn 的利用效率。

### 3 讨论

根系形态的分形维数直接反映根系在不同环境影响下发育程度的差异,分形维数越高,根系越发达,分支多,相对小的分形维数反映出根系的分生能力相对较弱。廖成章和余翔华<sup>[23]</sup>通过对马尾松根系的分形维数的研究表明:细根含量越多,分形维数也越高。杨培岭和罗远培<sup>[17]</sup>研究也同样发现,抽穗期是冬小麦根系发育的最高阶段,85%~90%田间持水量的水分条件下,根系长度最大,分形维数最高。陈吉虎等<sup>[31]</sup>研究表明,干旱条件和水涝条件下,根系的分形维数和根系长度逐渐减小,根系长度和分形维数呈显著正相关关系。本研究也得出类似结果,分形维数与根系总长度之间呈明显正相关关系,直径为 0.15~0.60 mm 范围内的根系长度与分形维数相关系数较大,可以说细根越多,根系分形维数越大,根系分支就越多。但 Tatsumi<sup>[18]</sup>报道分形维数与根系的长度和面积之间关系不明显,而和侧根的分支数和侧根密度密切相关。Izumi 等<sup>[32]</sup>发现水稻种子根的分形维数和 S 型(短和没有再分支)第一级侧根数目和长度明显相关。

根系分形丰度的应用还较少,该参数反映植物根系在土壤中的拓展体积<sup>[6,24]</sup>,分形丰度值大,表明植物根系在土壤中的所占体积范围越大。本研究发

现水稻 MADHUKAR 根系分形丰度最大,其根系在土壤中拓展范围明显高于其他 3 个品种。分形丰度与根系总长度之间呈明显正相关关系,尤其是直径为 0.15~0.60 mm 范围内的根系长度与分形丰度相关系数最大,细根与水稻根系分形丰度参数关系密切。陈吉虎等<sup>[31]</sup>研究也发现,干旱和水涝胁迫条件下银叶椴根系分形丰度和根系长度逐渐减小,根系长度和分形丰度间存在显著正相关关系。

植物根系构型对土壤养分吸收十分重要<sup>[9-13]</sup>。Liao 等<sup>[33]</sup>报道在缺磷胁迫条件下,菜豆主根深扎、基根变浅的“伞状”构型,是一种理想的根系构型,有利于植株对土壤中磷的吸收。菜豆根系在根长和根表面积等形态参数均相等的情况下,浅根型品种对耕作土壤(上层土壤含磷量较高,下层土含磷较低)中磷的吸收高出深根品种 50%或以上。Nielsen 等<sup>[19]</sup>研究发现根系平面分形维数与菜豆地上部磷含量有很好的相关性,但这是在土壤磷供应合适的条件下,如果土壤低磷条件下,平面分形维数与菜豆地上部 P 含量之间没发现明显的相关性。植物种类和品种不同,根系构型不同,可能影响植物对土壤中 Zn 的吸收和植株体内 Zn 利用效率<sup>[34]</sup>。Dong 等<sup>[35]</sup>报道, Zn 高效小麦品种 Excalibur 与 Zn 低效硬粒小麦品种 Durati 相比,直径 $\leq 0.2$  mm 细根在总根长中比例较高。细根比例高,根系比表面积增加,有利于提高植物对土壤中锌的吸收<sup>[36]</sup>。本研究表明分形维数和分形丰度与地上部干重呈显著性正相关关系,表明根系形态的变化可能与植株生长有关。分形维数和分

形丰度与单位 Zn 浓度所产出的地上部生物量之间都呈显著性正相关关系, 但分形维数和分形丰度与地上部 Zn 浓度之间呈明显负相关关系, 反映出根系形态的变化影响水稻植株 Zn 吸收和体内 Zn 的利用效率。当然水稻 Zn 的吸收和利用不仅受到根系形态的影响, 可能还与作物的基因型、土壤养分供应状况等因素有关<sup>[34]</sup>。

本文对水稻根系的分形分析是在二维平面上进行的, 而且所做的分析是静态的。水稻不同发育时期其根系分形维数和分形丰度的变化特征及其与土壤中养分和水分吸收利用之间的关系、水稻根系形态和构型的三维分形分析, 还有待进一步深入研究。

#### 4 结论

盒维数法分形分析模型可以应用于研究水稻根系结构特征。水稻 MADHUKAR 的分形维数和分形丰度数值最高, 表明其根系分支多, 根系在土壤中拓展范围较大, 而 IR8192-200 分形维数和分形丰度较小。分形维数、分形丰度与根系总长度间呈明显正相关, 与水稻植株单位 Zn 浓度所产出的地上部生物量、地上部 Zn 吸收总量间呈良好的正相关, 但与地上部 Zn 浓度间呈负相关。水稻根系形态和构型的变化影响水稻植株 Zn 吸收积累及体内 Zn 的利用效率。

#### References

- [1] Mandelbrot B B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. *Science*, 1967, 165: 636-638
- [2] Mandelbrot B B. *Fractals: Form, Chance and Dimension*. San Francisco: Freeman, 1977
- [3] Mandelbrot B B. *The Fractal Geometry of Nature*. San Francisco: Freeman, 1982
- [4] Wang Y-Q(王义琴), Zhang H-J(张慧娟), Yang D-A(杨奠安), Bai K-Z(白克智), Kuang T-Y(匡廷云). Fractal analysis about effect of elevated CO<sub>2</sub> on root growth of young plant. *Chin Sci Bull (科学通报)*, 1998, 43(16): 1736-1738 (in Chinese)
- [5] Wang Y-Q(王义琴), Zhang H-J(张慧娟), Bai K-Z(白克智), Sun Y-R(孙勇如). Application of fractal geometry in the studies of plant root systems. *Nat Mag (自然杂志)*, 1999, 21(3): 143-146 (in Chinese)
- [6] atsumi J, Yamauchi A, Kono Y. Fractal analysis of plant root systems. *Ann Bot*, 1989, 64: 499-503
- [7] Tatsumi J. Fractal geometry of root system morphology: Fractal dimension and multifractals. In: Proceeding of the 6th Symposium International Society of Root Research. 11-15 Nov. Nagoya, Japan, 2001. pp 24-25
- [8] Walk T C, Van Erp E, Lynch J P. Modelling applicability of fractal analysis to efficiency of soil exploration by roots. *Ann Bot*, 2004, 94: 119-128
- [9] Lynch J. Root architecture and plant productivity. *Plant Physiol*, 1995, 109: 7-13
- [10] Fitter A H. Architecture and biomass allocation as components of the plastic response of root systems to soil heterogeneity. In: Caldwell M M, Percy R W eds. *Exploitation of Environmental Heterogeneity by Plants*. San Diego, CA: Academic Press, 1994. pp 305-323
- [11] Fitter A H. Characteristics and functions of root systems. In: Waisel Y, Eshel A, Kafkafi U P, eds. *Pant Roots, the Hidden Half*, 3rd edn. New York: Marcel Dekker Inc., 2002. pp 15-32
- [12] Yamauchi A, Pardales J R Jr, Kono Y. Root system structure and its relation to stress tolerance. In: Ito O, Johansen C, Adu-Gyamfi J J, Katayama K, Kumar Rao J V D K, Rego T J, eds. *Dynamics of Roots and Nitrogen in Cropping Systems of the Semi-arid Tropics*. Tsukuba, Japan: Japan International Research Center for Agricultural Sciences, 1996. pp 211-233
- [13] Wang H, Yamauchi A. Growth and function of roots under abiotic stress in soil. In: Huang B ed. *Plant-Environment Interactions*, 3rd edn. Boca Raton, FL: CRC/Taylor & Francis, 2006. pp 271-320
- [14] Fitter A H, Stickland T R. Fractal characterization of root system architecture. *Funct Ecol*, 1992, 6: 632-635
- [15] Berntson G M. Root systems and fractals: How reliable are calculations of fractal dimension? *Ann Bot*, 1994, 73: 281-284
- [16] Berntson G M, Lynch J P, Snapp S. Fractal geometry and plant root systems: Current perspectives and future applications. In: Baveye P, Parlange J Y, Stewart B A, eds. *Fractals in Soil Science*. New York: Lewis Publishers, 1997. pp 113-152
- [17] Lynch J P, van Beem J. Growth and architecture of seedling roots of common bean genotypes. *Crop Sci*, 1993, 33: 1253-1257
- [18] Tatsumi J. Fractal geometry in root systems: quantitative evaluation of distribution pattern. *Jpn J Crop Sci*, 1995, 64: 50-57(in Japanese)
- [19] Nielsen K L, Miller C R, Beck D, Lynch J P. Fractal geometry of root systems: Field observations of contrasting genotypes of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) grown under different phosphorus regimes. *Plant Soil*, 1999, 206: 181-190
- [20] Dannowski M, Block A. Fractal geometry and root system structures of heterogeneous plant communities. *Plant Soil*, 2005, 272: 1-2, 61
- [21] Yang P-L(杨培岭), Luo Y-P(罗远培). The fractal characteristics of root morphology of winter wheat. *Chin Sci Bull (科学通报)*, 1994, 39(20): 1911-1913 (in Chinese)
- [22] Yang P-L(杨培岭), Ren S-M(任树梅), Luo Y-P(罗远培). Measurement of fractal curve and express of root morphology.

- Sci Agric Sin* (中国农业科学), 1999, 32(1): 89–92 (in Chinese with English abstract)
- [23] Liao C-Z(廖成章), Yu X-H(余翔华). Application of fractal theory on studies of the root structure of plant. *Acta Agric Univ Jiangxiensis* (江西农业大学学报), 2001, 23(2): 192–196 (in Chinese with English abstract)
- [24] Quijano-Guerta C, Kirk G J D, Portugal A M, Bartolome V I, McLaren G C. Tolerance of rice germplasm to zinc deficiency. *Field Crops Res*, 2002, 76: 123–130
- [25] Liu Z(刘铮). Regularities of content and distribution of zinc in soils of China. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 1994, 27(1): 30–37 (in Chinese with English abstract)
- [26] Gregorio G B. Progress in breeding for trace minerals in staple crops. *J Nutr*, 2002, 132: 500S–502S
- [27] Qadar A. Selecting rice genotypes tolerant to zinc deficiency and sodicity stresses: I. Differences in zinc, iron, manganese, copper, phosphorus concentrations, and phosphorus/zinc ratio in their leaves. *J Plant Nutr*, 2002, 25: 457–473
- [28] Ketipearachchi K W, Tatsumi J. Local fractal dimension and multifractal analysis of the root system of legumes. *Plant Prod Sci*, 2000, 3: 287–295
- [29] Kimura K, Kikuchi S, Yamasaki S. Accurate root length measurement by image analysis. *Plant Soil*, 1999, 216: 117–127
- [30] Kimura K, Yamasaki S. Accurate root length and diameter measurement using NIH Image: Use of Pythagorean distance for diameter estimation. *Plant Soil*, 2003, 254: 305–315
- [31] Chen J-H(陈吉虎), Yu X-X(余新晓), You X-L(有祥亮), Liu-P(刘苹), Zhang C-D(张长达), Xie G(谢港). Fractal characteristics of *Tilia tomentosa*'s root system under different water conditions. *Sci Soil Water Conserv* (中国水土保持科学), 2006, 4(2): 71–74 (in Chinese with English abstract)
- [32] Izumi Y, Kono Y, Yamauchi A, Iijima M. Analysis of time course changes in root-system morphology of rice in excised root culture. *Jpn J Crop Sci*, 1995, 64: 636–643
- [33] Liao H, Ge Z Y, Yan X. Ideal root architecture for phosphorus acquisition of plants under water and phosphorus coupled stress: from simulation to application. *Chin Sci Bull*, 2001, 46: 1346–1351
- [34] Hacisalihoglu G, Kochian L. How do some plants tolerate low levels of soils zinc? Mechanisms of zinc efficiency in crop plants. *New Phytol*, 2003, 159: 341–350
- [35] Dong B, Rengel Z, Graham R D. Root morphology of wheat genotypes differing in zinc efficiency. *J Plant Nutr*, 1995, 18: 2761–2773
- [36] Rengel Z, Graham R D. Wheat genotypes differ in Zn efficiency when grown in chelate-buffered nutrient solution: I. Growth. *Plant Soil*, 1995, 173: 307–316

## 《中国农业科技导报》2009年征订启事

《中国农业科技导报》是由科学技术部主管、中国农村技术开发中心主办、中国农业科学院生物技术研究所承办的全国性、综合性学术期刊。

本刊是中国科技核心期刊，以发展现代农业为导向，主要报道农业高科技领域的最新科研进展、创新成果、转化应用、农业产业化发展态势，以及政策导向和项目指南(863计划、科技支撑计划等)信息，是农业高新技术创新成果重要的宣传阵地。设置综述专论、研究论文、研究简报、前沿动态和信息交流等栏目。读者对象为国内外农业科研机构的研究和管理人员；相关领域的各级管理部门的管理人员；农业高技术企业的管理和研发人员；相关专业的大专院校师生。

诚邀业内人士积极投稿、订阅《中国农业科技导报》，并欢迎咨询洽谈广告业务。

本刊于1999年6月创刊，彩色封面，大16开本，双月刊，逢双月中旬出版，国内外公开发行。自2009年起将扩版至144页，采用铜版纸4色印刷，每册定价22.00元，全年定价132.00元。可通过邮局或与编辑部联系订阅，免费邮寄。国内统一刊号：CN11-3900/S；国际统一刊号：ISSN 1008-0864。广告经营许可证号：京西工商广字0058号。邮发代号：82-245。

地址：北京市海淀区中关村南大街12号中国农业科学院生物技术研究所，《中国农业科技导报》编辑部，邮编：100081

联系人：蔡晶晶，徐妙云，孙丽萍；电话：010-82106118

E-mail: nykjdb@163.com; nkdb@caas.net.cn; 网址: <http://www.nkdb.net>