

# 水稻根系的空間分布及其与产量的关系

蔡昆争<sup>1</sup>, 骆世明<sup>1</sup>, 段舜山<sup>2</sup>

(1 华南农业大学 农学院, 广东 广州510642; 2 暨南大学 水生态研究所, 广东 广州510632)

**摘要:** 选择9个水稻品种, 在水稻生长根系最旺盛的抽穗期进行取样, 研究高产水稻群体的根系空间分布特征. 结果表明: 不同水稻品种的根系体积和质量的总量存在差异. 各品种水稻根系的体积和质量均随土层深度增加而下降, 但主要分布在土壤耕作层(0~20 cm), 且表层(0~10 cm)占80%以上. 其垂直分布可用指数模型、乘幂模型、对数函数、多项式函数表示, 相关系数都在0.9以上. 上层根(0~10 cm)质量与产量之间没有显著的相关关系, 而下层根质量(10 cm以下)与产量之间呈显著正相关关系, 相关系数达0.7258. 研究认为, 从整株根系和高产的角度来看, 适当减少表层根系, 培育和增加深层根系的比例有利于促进水稻产量的提高.

**关键词:** 水稻; 根系; 空间分布; 产量

中图分类号: S181; S314

文献标识码: A

文章编号: 1001-411X(2003)03-0001-04

理想株型结构是作物高产的重要基础<sup>[1,2]</sup>. 良好的株型必须保证植株充分利用光能, 有利于群体内气体的交换, 以及减少个体之间的竞争<sup>[3]</sup>. Donald<sup>[4]</sup>提出了理想株型(Ideotype)的概念, 他指出禾谷类作物理想株型的特征应该是在同类植株间相互干扰最小. 松岛省三<sup>[5]</sup>从水稻高产栽培的角度提出了理想稻的形态要求, 即多穗、矮秆、短穗, 上部2~3叶要短、厚、直立, 抽穗后叶色褪淡缓慢, 绿叶较多. 我国在株型育种上曾先后经历了矮化育种阶段、理想株型育种阶段、超高产育种阶段<sup>[6~9]</sup>. 对水稻株型分布的研究主要集中在地上部, 而关于水稻根系的空間分布研究相对较少, Yoshida<sup>[10]</sup>使用1081个水稻品种, 在温室中用根箱观察了不同品种的株高、分蘖和根系生长的关系, 发现根系分布较深的品种植株较高, 分蘖也很少<sup>[10]</sup>. 凌启鸿<sup>[11]</sup>采用水培实验研究了叶角与根系分布的关系认为, 根系分布较深且多纵向时, 叶角较小, 叶片趋向于直立; 根系分布较浅且少纵向时, 叶角较大, 叶片趋向于披垂<sup>[11]</sup>. 这些研究大都在个体条件(单株)或水培条件下进行, 而系统研究大田高产群体条件下根系的空間分布规律较少. 本研究通过选择目前生产上推广的品种进行研究, 试图寻找高产水稻群体的根系分布特征, 并建立描述根系空間分布的模型, 从而为培育优良根型提供依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

水稻品种选用培杂72、丰矮占1号、特三矮、二

青矮、七山占、粳粳89、华粳粳74、华航1号、七华占. 其中培杂72、二青矮、华粳粳74、华航1号、七华占由华南农业大学农学院植物育种系提供, 丰矮占1号、特三矮、七山占、粳粳89由广东省农业科学院水稻研究所提供.

### 1.2 方法

1998~1999年在华南农业大学试验农场进行. 本田每公顷施N 150 kg, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 90 kg, K<sub>2</sub>O 150 kg. 插植规格为20 cm×20 cm, 每穴插两苗, 设3个重复, 随机区组排列, 小区面积为24 m<sup>2</sup>, 田间管理同一般大田. 根系取样采用田间土柱法. 在水稻根系最旺盛的抽穗期取样, 以水稻植株为中心, 先割取地上部分, 然后借助铁铲挖取20 cm长×20 cm宽×40 cm深的土柱, 沿垂直方向上每5 cm切割为1个层次, 重复3~4次. 取出的土样, 小心用水漂洗干净, 将泥土和根系分离, 带回实验室测定. 根系体积采用排水法、根质量用烘干法测定. 成熟期进行测产和考种.

## 2 结果与分析

### 2.1 根系体积的空間分布

从表1可看出, 不同水稻品种的根系体积总量存在差别, 比较大的品种有华航1号、七华占、华粳粳74、二青矮, 单株根系体积都超过20 cm<sup>3</sup>, 而不同水稻品种根系在土壤不同层次的分布差异较大, 根系体积都随着土层深度增加而逐渐减少, 主要分布在耕作层(0~20 cm), 而耕作层以下则根较少. 在同一层中, 不同品种在上层(0~10 cm)和下层(10 cm以

收稿日期: 2002-07-11

作者简介: 蔡昆争(1970-), 男, 助理研究员, 博士.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(39770138和30100107); 教育部博士点基金资助项目(2000065402); 广东省自然科学

基金资助项目(980145和20000636)

©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

下)有明显差异。

2.2 根系质量的空间分布

从表 1 可看出,不同水稻品种的根系质量总量存在差别,比较大的品种有二青矮、七山占、华航 1 号、特三矮,单株根系质量都超过 3.0 g,而各品种在

土壤不同层次的分布差异较大,根系质量都随土层深度增加而减少,主要分布在耕作层(0~20 cm),而大多数品种在表层(0~10 cm)就占 80%以上,10 cm 以下根质量所占比例为 11.91%~22.27%,20 cm 以下就更少了。

表 1 不同水稻品种根系体积和质量的空间分布

| Tab. 1 Spatial distribution of root volume and mass with different rice varieties |            |           |                 |           |            |            |             |                 |           |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------|-----------|-----------------|-----------|------------|------------|-------------|-----------------|-----------|------------|
| 项目                                                                                | 土壤层次       | 培杂 72     | 丰矮占 1 号         | 特三矮       | 二青矮        | 七山占        | 粳粳 89       | 华粳粳 74          | 华航 1 号    | 七华占        |
| item                                                                              | soil layer | Pei za 72 | Feng' ai zhan 1 | Tesan' ai | Erqing' ai | Qishanzhan | Jingxian 89 | Huajing-xian 74 | Huahang 1 | Qihua zhan |
| 体积<br>volume<br>(cm <sup>3</sup> ·株 <sup>-1</sup> )                               | 0~5 cm     | 8.6±4.1   | 9.4±3.0         | 13.4±6.2  | 14.1±0.6   | 11.8±0.7   | 9.0±1.0     | 13.7±3.4        | 16.2±5.1  | 13.0±2.6   |
|                                                                                   | 5~10 cm    | 4.1±1.8   | 3.9±1.1         | 3.6±1.3   | 4.2±1.7    | 5.2±2.9    | 4.1±1.5     | 5.2±0.9         | 6.2±1.4   | 7.3±4.0    |
|                                                                                   | 10~15 cm   | 2.2±0.9   | 2.2±0.9         | 1.7±0.9   | 1.9±0.2    | 1.5±0.3    | 2.0±0.9     | 2.5±0.9         | 1.8±0.3   | 2.3±1.6    |
|                                                                                   | 15~20 cm   | 0.7±0.1   | 1.0±0.4         | 1.0±0.5   | 1.3±0.3    | 1.1±0.4    | 1.2±0.2     | 1.2±0.6         | 1.2±0.3   | 0.7±0.1    |
|                                                                                   | 20~25 cm   | 0.3±0.1   | 0.7±0.1         | 0.5±0.1   | 0.8±0.4    | 0.5±0.1    | 0.7±0.2     | 0.7±0.5         | 0.4±0.0   | 0.5±0.4    |
|                                                                                   | 25~30 cm   | 0.3±0.1   | 0.4±0.0         | 0.2±0.0   | 0.3±0.0    | 0.2±0.1    | 0.2±0.1     | 0.1±0.1         |           |            |
|                                                                                   | 30~35 cm   | 0.1±0.0   | 0.2±0.1         |           |            |            |             |                 |           |            |
|                                                                                   | 总 total    | 16.3±1.8  | 17.8±2.5        | 20.4±5.8  | 22.6±2.1   | 20.3±3.1   | 17.2±2.5    | 23.4±3.2        | 25.8±6.0  | 23.8±7.9   |
|                                                                                   | 0~10 cm/%  | 77.91     | 74.72           | 83.33     | 81.00      | 83.70      | 76.20       | 80.77           | 86.82     | 85.29      |
|                                                                                   | >10 cm/%   | 22.09     | 25.28           | 16.67     | 19.00      | 16.30      | 23.80       | 19.23           | 15.18     | 14.71      |
| 质量<br>mass<br>(g·株 <sup>-1</sup> )                                                | 0~5 cm     | 1.26±0.68 | 1.43±0.54       | 2.20±1.23 | 2.55±0.52  | 2.41±0.25  | 1.77±0.39   | 1.58±0.39       | 2.24±0.76 | 1.98±0.24  |
|                                                                                   | 5~10 cm    | 0.59±0.26 | 0.56±0.17       | 0.52±0.16 | 0.79±0.24  | 0.85±0.34  | 0.74±0.22   | 0.64±0.17       | 0.74±0.19 | 0.83±0.25  |
|                                                                                   | 10~15 cm   | 0.28±0.09 | 0.23±0.13       | 0.27±0.14 | 0.32±0.11  | 0.28±0.09  | 0.30±0.21   | 0.31±0.13       | 0.24±0.03 | 0.22±0.11  |
|                                                                                   | 15~20 cm   | 0.12±0.02 | 0.13±0.01       | 0.16±0.06 | 0.17±0.02  | 0.10±0.05  | 0.09±0.02   | 0.12±0.12       | 0.12±0.04 | 0.10±0.02  |
|                                                                                   | 20~25 cm   | 0.06±0.04 | 0.07±0.02       | 0.09±0.02 | 0.11±0.06  | 0.06±0.11  | 0.08±0.02   | 0.04±0.07       | 0.04±0.01 | 0.06±0.04  |
|                                                                                   | 25~30 cm   | 0.05±0.02 | 0.02±0.01       | 0.03±0.00 | 0.04±0.00  | 0.03±0.01  | 0.03±0.01   | 0.02±0.01       | 0.01±0.01 | 0.02±0.01  |
|                                                                                   | 30~35 cm   | 0.02±0.00 |                 |           |            |            |             |                 |           |            |
|                                                                                   | 总 total    | 2.38±0.32 | 2.44±0.43       | 3.27±0.82 | 3.98±0.56  | 3.73±0.41  | 3.01±0.50   | 2.71±0.36       | 3.39±0.88 | 3.21±0.39  |
|                                                                                   | 0~10 cm/%  | 77.73     | 81.15           | 83.18     | 83.92      | 87.40      | 83.39       | 81.82           | 87.91     | 88.09      |
|                                                                                   | >10 cm/%   | 22.27     | 18.85           | 16.82     | 16.08      | 12.60      | 16.61       | 18.18           | 12.09     | 11.91      |

2.3 根系干质量分布与产量的关系

将 9 个水稻品种的上下层根质量分别与对应的产量及其产量构成进行相关分析。结果(表 2)表明,上、下层根质量对穗数、粒数、结实率、千粒质量、产量的相关性不同,上层根与每穗粒数和产量成负相关关系,其中与每穗粒数成显著负相关( $R = -0.7595^*$ );与结实率成显著正相关( $R = 0.7685^*$ );下层根质量则相反,与每穗粒数、千粒质量和产量成正相关关系,其中与产量达到显著正相关水平( $R = 0.7258^*$ ),而与穗数和结实率成负相关。总根质量与每穗粒数成显著负相关( $R = -0.7137^*$ ),与结实率成显著正相关( $R = 0.7413^*$ ),而与产量并没有显著相关关系。由于上

层根占总根的 80%以上,因此上层根与产量及产量构成因子的相关关系和总根质量相似。可见,下层根与水稻高产的关系更为密切。

2.4 水稻根系的空间分布模型

将水稻不同层次的根干质量或根体积( $Y$ )与相应的土层深度( $X$ ),分别用指数函数( $Y = aX^b$ )、乘幂函数( $Y = ae^{bX}$ )、对数函数[ $Y = a\ln(X) + b$ ]、多项式函数( $Y = aX^2 - bX + c$ )建立根干质量和根体积的空间分布模型,以上这些函数都可以用来描述根系干质量和根体积的空间分布,相关系数都在 0.9 以上,接近于 1.0,均达极显著相关水平。比较这 4 种空间分布模型,相对而言,以指数函数的模拟精度最高,相关系数较大。

表 2 水稻空间分布与产量构成的关系

| Tab. 2 Relationship between spatial distribution of root system and yield component |                                                            |                               |                                    |                               |                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------|
| 品种<br>varieties                                                                     | 有效穗数 effective<br>panicle number<br>/(条·hm <sup>-2</sup> ) | 每穗粒数<br>grains per<br>panicle | 结实率<br>filled grains<br>percent/ % | 千粒质量<br>1000-grain<br>mass/ g | 产量<br>yield<br>/(kg·hm <sup>-2</sup> ) |
| 培杂 72 Peiza 72                                                                      | 2.75×10 <sup>6</sup>                                       | 227                           | 72.0                               | 19.2                          | 8 020.8                                |
| 丰矮占 1 号 Feng' aizhan 1                                                              | 2.75×10 <sup>6</sup>                                       | 200                           | 54.5                               | 20.6                          | 6 506.9                                |
| 特三矮 Tesan' ai                                                                       | 2.00×10 <sup>6</sup>                                       | 172                           | 68.8                               | 28.8                          | 7 930.5                                |
| 二青矮 Erqing' ai                                                                      | 2.75×10 <sup>6</sup>                                       | 139                           | 86.6                               | 24.7                          | 7 255.5                                |
| 七山占 Qishanzhan                                                                      | 3.50×10 <sup>6</sup>                                       | 124                           | 82.2                               | 18.4                          | 4 555.5                                |
| 粳粳 89 Jingxian 89                                                                   | 3.00×10 <sup>6</sup>                                       | 133                           | 76.7                               | 19.3                          | 5 833.5                                |
| 华粳粳 74 Huajingxian 74                                                               | 2.50×10 <sup>6</sup>                                       | 146                           | 72.6                               | 21.5                          | 5 306.3                                |
| 华航 1 号 Huahang 1                                                                    | 2.50×10 <sup>6</sup>                                       | 151                           | 88.6                               | 19.8                          | 5 166.8                                |
| 七华占 Qihuazhan                                                                       | 2.75×10 <sup>6</sup>                                       | 126                           | 83.6                               | 19.7                          | 4 743.8                                |
| <i>m</i> (0~10 cm 根 root)                                                           | 0.226 2                                                    | -0.759 5 *                    | 0.768 5 *                          | 0.188 6                       | -0.343 9                               |
| <i>m</i> >10 cm 根 root)                                                             | -0.148 3                                                   | 0.183 1                       | -0.048 9                           | 0.594 8                       | 0.725 8 *                              |
| <i>m</i> (总根 total root)                                                            | 0.199 4                                                    | -0.713 7 *                    | 0.741 3 *                          | 0.267 4                       | -0.232 8                               |

这里仅列出指数函数( $Y = ae^{bX}$ ), 培杂 72、丰矮占 1 号、特三矮、二青矮、七山占、粳粳 89、华粳粳 74、华航 1 号、七华占根质量空间分布模型分别为  $Y = 2.192 4e^{-0.135 0X}$ ,  $R = 0.992 9$ ;  $Y = 1.782 8e^{-0.107 3X}$ ,  $R = 0.985 0$ ;  $Y = 3.452 4e^{-0.155 8X}$ ,  $R = 0.984 7$ ;  $Y = 4.319 9e^{-0.155 5X}$ ,  $R = 0.982 6$ ;  $Y = 4.766 4e^{-0.176 6X}$ ,  $R = 0.991 3$ ;  $Y = 3.540 1e^{-0.161 5X}$ ,  $R = 0.988 0$ ;  $Y = 3.214 9e^{-0.152 7X}$ ,  $R = 0.998 0$ ;  $Y = 6.293 1e^{-0.208 6X}$ ,  $R = 0.996 7$ ;  $Y = 5.592 1e^{-0.200 6X}$ ,  $R = 0.989 1$ .

培杂 72、丰矮占 1 号、特三矮、二青矮、七山占、粳粳 89、华粳粳 74、华航 1 号、七华占根体积空间分布模型分别为;  $Y = 16.916e^{-0.147 8X}$ ,  $R = 0.987 6$ ;  $Y = 14.199e^{-0.197 7X}$ ,  $R = 0.994 1$ ;  $Y = 23.133e^{-0.161 3X}$ ,  $R = 0.992 0$ ;  $Y = 20.319e^{-0.135 4X}$ ,  $R = 0.969 3$ ;  $Y = 20.307e^{-0.147 1X}$ ,  $R = 0.987 1$ ;  $Y = 15.558e^{-0.130 4X}$ ,  $R = 0.992 5$ ;  $Y = 28.179e^{-0.157 9X}$ ,  $R = 0.995 0$ ;  $Y = 37.52e^{-0.178 4X}$ ,  $R = 0.992 1$ ;  $Y = 44.09e^{-0.199 9X}$ ,  $R = 0.989 4$ . 可见, 不同品种的根系分布与系数  $b$  关系很大,  $b$  为负值,  $b$  的绝对值越小, 根系分布越深. 根据根系干质量的空间分布模型中  $b$  值的大小可看出, 根系分布较深的品种有丰矮占 1 号、培杂 72、华粳粳 74、特三矮、二青矮, 根系分布较浅的有华航 1 号、七华占, 粳粳 89、七山占则处于中间.

3 讨论

不同水稻品种的根系体积和根干质量的总量存在差别, 在土壤不同层次的分布差异较大, 根系体积和根干质量都随土层深度增加而减少, 主要分布在

耕作层(0~20 cm), 而表层(0~10 cm)就占 80%以上, 10 cm 以下根质量所占比例 11.91%~22.27%, 20 cm 以下就更少了. 在同一耕作层中, 不同品种在上层(0~10 cm)和下层(10 cm 以下)所占比例有明显差别. 本研究表明, 上层根和下层根与产量的相关关系不一样. 下层根质量与每穗粒数和千粒质量成正相关关系, 而且与产量达到显著正相关水平( $R = 0.725 8^*$ ); 上层根和总根质量与每穗粒数成负相关, 与结实率成正相关, 每穗粒数和结实率相互抵消, 因此使得上层根质量与产量没有显著相关关系. 上层根主要是在生育中后期形成, 对于提高结实率和粒质量作用明显, 而下层根主要在生育前期形成, 对于促进分蘖、奠定足穗大穗基础有重要作用<sup>[12]</sup>. 因此培育深层根系有利于产量的提高, 这与前人研究<sup>[13~15]</sup>相似, 即水稻产量水平在达到一定程度时, 与上层根关系密切, 而要更高产时, 下层根作用更大.

凌后鸿<sup>[11]</sup>研究认为叶角的大小在很大程度上受根系分布的调控, 在群体叶面积指数较大的情况下, 培育分布深而多纵向的根系, 有利于改善群体通风透光, 增加群体光合作用和提高产量<sup>[11]</sup>. 一般可通过下列措施如育种(选育深层根系的品种)、深耕、施肥(深施肥和增施有机肥)、水分管理(干湿交替、一定水分胁迫等)等促进下层根的发育. 对于水分管理方面, 在分蘖早发的情况下, 有效分蘖期后应及早排水, 分次搁田, 生育中后期坚持湿润灌溉, 更新土壤环境, 从而使根系向深层扩展, 提高根系活力<sup>[13]</sup>.

参考文献:

[ 1 ] 刘振业. 作物高光效育种[ M ]. 北京: 农业出版社, 1983. 12—19.

[ 2 ] AQUINO R C, JENNINGS P R. Inheritance and significance of an indica rice variety[ J ]. *Crop Science*, 1966, (6): 551—554.

[ 3 ] 孙旭初. 籼稻株型性状的遗传研究[ J ]. 安徽农学院学报, 1984, (2): 33—40.

[ 4 ] DONALD C M. The breeding of crop ideotypes[ J ]. *Euphytica*, 1968, (17): 385—403.

[ 5 ] 松岛省三. 稻作的理论与技术[ M ]. 庞城译. 北京: 农业出版社, 1981. 278—345.

[ 6 ] 黄耀祥. 水稻超高产育种研究[ J ]. 作物杂志, 1990, 9 (4): 1—2.

[ 7 ] 张龙步, 陈温福, 杨守仁. 水稻株型育种的理论与方法再论[ J ]. 中国水稻科学, 1987, (3): 144—154.

[ 8 ] KHUSH G S. Increasing the genetic yield potential of rice; prospects and approaches[ J ]. *International Rice Commission Newsletter*, 1994, 43(1): 1—8.

[ 9 ] 杨守仁. 水稻理想株型育种的理论和方法初论[ J ]. 中国农业科学, 1984, (3): 6—13.

[ 10 ] YOSHIDA S. Relationship between rice plant type and root growth[ J ]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1982, 28(4): 473—482.

[ 11 ] 凌启鸿, 陆卫平, 蔡建中, 等. 水稻根系分布与叶角关系的研究初报[ J ]. 作物学报, 1989, 15(2): 123—131.

[ 12 ] 凌启鸿, 凌励. 水稻不同层次根系的功能及对产量形成作用的研究[ J ]. 中国农业科学, 1984(5): 3—11.

[ 13 ] 川田信一郎. 水稻的根系[ M ]. 申延秀, 刘执钧, 彭望琰译. 北京: 农业出版社, 1984. 107—116.

[ 14 ] YAMAZAKI K. The formation of rice root system and effect on yield[ J ]. *Japanese Agricultural Research Quarterly*, 1982, 15(3): 153—160.

[ 15 ] 森田茂纪, 管微也, 山崎耕宇. 水稻的根长密度与产量[ J ]. 日本作物学会纪事, 1988, 57(3): 438—443.

The Relationship Between Spatial Distribution of Rice Root System and Yield

CAI Kun-zheng<sup>1</sup>, LUO Shi-ming<sup>1</sup>, DUAN Shun-shan<sup>2</sup>

(1 College of Agronomy, South China Agric. Univ., Guangzhou 510642, China;

2 Institute of Aquatic Ecoscience, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

**Abstract:**Nine typical varieties were selected to study the spatial distribution of rice root system. The results showed that difference of dry mass and volume of root system existed among these varieties. The root mass decreased with the increase of soil depth. The root system was mainly distributed in the tillage layer(0—20 cm), especially in surface soil layer(0—10cm). More than 80% of the root system was at this layer. The vertical distribution of root mass and root volume could be expressed by exponential equation, power equation, logarithmic equation and polynomial equation, respectively. All coefficients of the correlation were more than 0. 9. However, exponential equation was the best. The upper layer root mass has no significant correlation with yield, but lower layer( $\geq 10$  cm) root mass had significant positive correlation with yield, the coefficient of correlation was 0. 725 8. It implied that adequate reduction of surface layer root system and the increase of the deep root system were beneficial to rice yield.

**Key words:** rice; root system; spatial distribution; yield

【责任编辑 周志红】