



作物学报
Acta Agronomica Sinica
ISSN 0496-3490, CN 11-1809/S

《作物学报》网络首发论文

题目：施氮量对滴灌水稻根系形态构型和分形特征的影响
作者：唐清芸，杨晶晶，赵蕾，宋志文，王国栋，李玉祥
收稿日期：2023-09-26
网络首发日期：2024-02-21
引用格式：唐清芸，杨晶晶，赵蕾，宋志文，王国栋，李玉祥. 施氮量对滴灌水稻根系形态构型和分形特征的影响[J/OL]. 作物学报.
<https://link.cnki.net/urlid/11.1809.s.20240220.0934.005>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

施氮量对滴灌水稻根系形态构型和分形特征的影响

唐清芸¹ 杨晶晶¹ 赵 蕾¹ 宋志文¹ 王国栋^{2,*} 李玉祥^{1,*}

¹ 石河子大学农学院 / 新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室, 新疆石河子 832003; ² 新疆农垦科学院 / 农业农村部西北绿洲节水农业重点实验室 / 水肥资源高效利用兵团重点实验室, 新疆石河子 832000

摘 要: 旨在探明水稻在膜下滴灌下根系形态、构型、氮利用效率变化及其与分形维数的关系。于 2021—2022 年, 以氮高效品种(T-43)和氮低效品种(垦-26)为材料, 设置滴灌(drip irrigation, DI)、淹灌(flooding irrigation, FI)2 种方式与 4 种施氮水平(0、150、300 和 450 kg hm⁻²)的盆栽试验。基于盒维数法结合根系图像分形分析程序计算根系形态的分形维数和分形丰度, 研究滴灌及施氮对水稻产量、氮素利用效率、根系形态、构型、分形维数、分形丰度的影响。结果表明, (1) 在相同施氮水平下, 与淹灌相比, 滴灌处理下 T-43 和垦-26 细根百分比、根长密度(root length density, RLD) β 值、氮肥农学利用效率(nitrogen agronomic efficiency, NAE)显著提高(分别为 6.8%~14.5%和 9.9%~17.2%、0.65%~5.45%和 0.32%~3.43%、12.1%~22.4%和 12.2%~20.5%); >0.5 mm RLD、0~40 cm 土层表面积密度(surface area density, SAD)和根体积密度(RLD)、分形维数(fractal dimension, FD)、分形丰度(fractal abundance, FA)显著降低, 造成产量降低(3.8%~37.4%和 7.6%~48.3%)。(2) 滴灌模式下, 施氮显著提高了水稻根系 FD 和 FA, T-43 在施氮量为 300 kg hm⁻²时, FD 和 FA 最高(分别为 1.55 和 14.07); 垦-26 在施氮量为 450 kg hm⁻²时最高(分别为 1.62 和 14.78)。(3) 相关分析表明, FD、FA 与直径 0.1~0.3 mm RLD、0~10 cm 土层根长和根质量密度、产量、氮素稻谷生产效率呈显著正相关, 与 30~40 cm 土层表面积密度呈显著负相关。因此, 在滴灌条件下, 氮高效品种“T-43”配施 300 kg hm⁻²氮肥, 能够增加细根根长密度比例, 优化表层根系形态分布, 提高根系分形维数和丰度, 进而实现滴灌水稻产量和氮肥利用效率协同提高。

关键词: 水稻; 滴灌; 施氮量; 根系形态; 分形维数

Effect of nitrogen application on morphological conformation and fractal characteristics of drip irrigated rice roots

TANG Qing-Yun¹, YANG Jing-Jing¹, ZHAO Lei¹, SONG Zhi-Wen¹, WANG Guo-Dong^{2,*}, and LI Yu-Xiang^{1,*}

¹ Key Laboratory of Oasis Ecological Agriculture / College of Agriculture, Shihezi University / Xinjiang Production and Construction Corps, Shihezi 832003, Xinjiang, China; ² Key Laboratory of Water-saving Agriculture in Northwest Oasis / Key Laboratory of Efficient Utilization of Water and Fertilizer Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs / Xinjiang Academy of Agricultural Reclamation Sciences, Shihezi, 832000, Xinjiang, China

Abstract: The aim of this study was to explore the changes of root morphology, configuration, and nitrogen use efficiency of rice under mulched drip irrigation and their relationship with fractal dimension. From 2021 to 2022, a pot experiment was conducted with two irrigation methods of drip irrigation (DI) and flooding irrigation (FI) and four nitrogen (N) application levels (0, 150, 300 and 450 kg hm⁻²) using high nitrogen efficient (high-NUE) cultivar (T-43) and low-NUE cultivar (Ken-26) as the experimental materials. Based on the box-counting method combined with the root image fractal analysis program, the fractal dimension and fractal abundance of root morphology were calculated, and the effects of drip irrigation and nitrogen application on rice yield, nitrogen use

本研究由国家自然科学基金项目(31460541, 32360527), 第三师图木舒克市科技计划项目(KJ2023CG03), 石河子大学青年创新拔尖人才项目(CXBJ202003), 石河子大学自主支持科研项目(ZZZC2022008)和石河子大学 SRP 项目(SRP2023027)资助。

This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (31460541, 32360527), the Science and Technology Plan Project of Tumushuke City, the Third Division (KJ2023CG03), the Young Innovative Top Talents Project of Shihezi University (CXBJ202003), the Independent Support Scientific Research Project of Shihezi University (ZZZC2022008), and the SRP Program of Shihezi University (SRP2023027).

* 通信作者(Corresponding authors): 王国栋, E-mail: 664812734@qq.com; 李玉祥, Email: yxli@shzu.edu.cn.

第一作者联系方式: E-mail: 20212012005@stu.shzu.edu.cn

Received (收稿日期): 2023-09-26; Accepted (接受日期): 2024-01-30

efficiency, root morphology, configuration, fractal dimension, and fractal abundance were studied. The results showed that: (1) under the same N application level, compared with FI, the fine root percentage, root length density (RLD) β value, and N agronomic efficiency (NAE) of the two varieties under DI were significantly increased (6.8%–14.5% and 9.9%–17.2%, 0.65%–5.45% and 0.32%–3.43%, 12.1%–22.4% and 12.2%–20.5%); >0.5 mm RLD, surface area density (SAD) and root bulk density (RLD), fractal dimension (FD), fractal abundance (FA) were significantly lower in the 0–40 cm soil layer, resulting in lower yields (3.8%–37.4% and 7.6%–48.3%). (2) Under DI, nitrogen application significantly increased FD and FA of rice roots. T-43 had the highest FD and FA when the nitrogen application rate was 300 kg hm⁻² (1.55 and 14.07), and Ken-26 had the highest FD and FA when the nitrogen application rate was 450 kg hm⁻² (1.62 and 14.78). (3) Correlation analysis showed that FD and FA were significantly or extremely significantly positively correlated with RLD of 0.1–0.3 mm in diameter, root length, and root mass density, yield and N grain production efficiency in 0–10 cm soil layer, and significantly negatively correlated with the surface area density in 30–40 cm soil layer. Therefore, under drip irrigation, the high-NUE cultivar "T-43" with 300 kg hm⁻² N fertilizer can increase the proportion of fine root length density, optimize the distribution of surface root morphology, and increase the fractal dimension and abundance of the root system, thus achieving a synergistic increase in the yield of drip-irrigated rice and the efficiency of nitrogen fertilizer utilization.

Keywords: rice; drip irrigation; nitrogen application rate; root morphology; fractal dimension

根系是植物吸收土壤水分和养分的器官组织,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^[1-4]。根系构型即根系在生长介质中的空间分布特征^[5],在一定程度上反映了植物对环境的适应能力^[6-7]。研究者们提出许多测定植物根系的方法^[8-9](图像分析法、根长密度法等),虽然在一定程度上能反映根系的生长,但难以反映根系分枝及结构的变化。为了研究根系形态、构型对胁迫环境的适应性变化,研究者们对植物根系进行量化。其中,分形维数(FD: Fractal Dimension)是研究分形的主要方法之一^[10-11]。分形维数大多为非整数维,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^[12]。盒维数(box dimension)也称计盒维数或盒子维,是应用最为广泛的一种维数。其原理虽相对复杂,但能有效量化根系的空间复杂性且数据处理简单、重复性好^[13]。汪洪等^[13]用盒维数法分形分析水稻根系形态特征,反映出分形维数高,根系分支多,在土壤中拓展体积大;陈绍明等^[14]用分形理论研究棉花根系构型随生育阶段的变化特征,表明蕾期–花期根系构型的盒维数都逐步增大,根系分布逐步趋向连续空间。杨培岭等^[15]发现,抽穗期是冬小麦根系发育的最高阶段,田间持水量在 85%~90%时,根系长度最大,分形维数最高。

水分和氮素是影响水稻生长发育的 2 个重要环境生态因子,对改善根系生长环境,协调地上地下生长具有重要意义^[16]。现代水稻是由其生活在沼泽地带的野生先祖逐渐驯化而来^[17],沼泽使水稻很好适应淹水厌氧环境,根系构型、通气组织均很发达,这是根系对环境高度适应性的表现。膜下滴灌技术突破了传统的“水作”种植方式,势必导致水稻根系在形态、结构及构型等方面发生巨大变化^[18]。氮素对水稻生长的影响仅次于水,过量施用氮肥导致土壤养分过剩,根长密度及根系在深层土壤中的分布减少,地上部生长受到影响、氮利用率降低^[19]。如何定量研究水氮变化对滴灌水稻根系构型的影响,需要更多关注根系在分形维数及丰度等方面的变化。陈吉虎等^[20]通过不同水分条件下盆栽银叶槭根系的分形维数发现,淹水处理下根系的分形维数值最小(1.613),先干旱后复水促使维数值变大(1.747);Wang 等^[21]研究水稻根系对干旱胁迫响应的分形分析发现,粳稻根系更有利于从干燥的土壤中提取更多的水分。但还少见应用分形理论来研究不同水稻品种根系的分形特征,且关于滴灌水稻根系形态特征变化及与分形维数关系的研究也鲜见报道。因此,本文选用氮高效品种 T-43 和氮低效品种垦-26 为供试材料,以盒维数法分形分析理论为基础,基于 ImageJ 软件(NIH, <https://zhuanlan.zhihu.com/p/136367644>)的分析程序研究不同水稻品种根系的特征;以淹灌水稻作为对照,评估滴灌水稻根系形态、构型对氮环境的响应,明确根系分形参数与根系长度、根系在土层中的扩展能力以及植株氮吸收效率之间的关系,了解根系对环境的适应能力,以期为膜下滴灌水稻栽培技术的推广应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

于 2021—2022 年在新疆农垦科学院(新疆石河子, 44°18' N, 86°03' E)进行。研究区域具典型干旱半干旱大陆性气候, 降雨稀少, 光热集中, 年均气温 6.5~8.1℃, 年均降雨 180 mm、蒸发量 1200 mm 左右。供试土壤为沙壤土, pH 8.37、有机质 11.21 g kg⁻¹、全氮 0.74 g kg⁻¹, 速效磷 51.2 mg kg⁻¹, 速效钾为 193.0 mg kg⁻¹, 碱解氮 61.0 mg kg⁻¹。2021—2022 年作物全生育期降雨量为 73.1 mm 和 84.6 mm, >5 mm 有效降雨量为 3 次和 5 次, 日平均最高气温为 27.5℃和 28.5℃、最低气温为 12.3℃和 12.8℃ (图 1)。从 2004 年开始, 新疆天业农业科学研究所引进同纬度中国宁夏、中国黑龙江、中国吉林和日本等地 300 多个水稻(*Oryza sativa* L.)品种, 通过连续 5 年的小区试验, 最终筛选、驯化出适合北疆地区膜下滴灌种植的 6 个水稻品种^[22], 本研究利用其中的 2 个水稻品种 T-43 和垦-26 (Ken-26, K-26)作为研究材料。

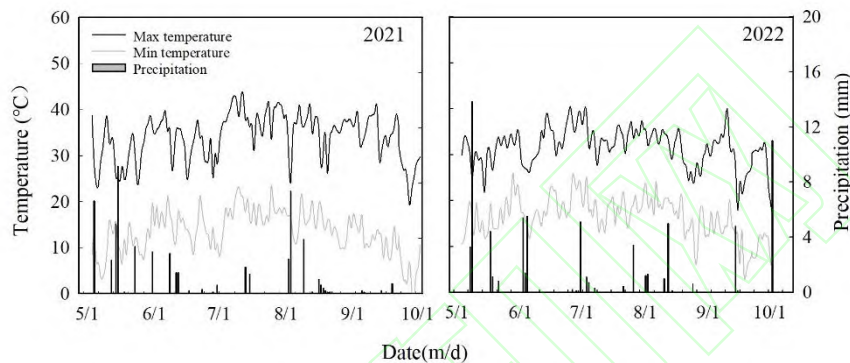


图 1 水稻生长季节降雨量和温度的变化

Fig. 1 Precipitation and temperature in rice during growth season period

1.2 试验设计

采用裂区试验设计, 主区为滴灌(DI)、淹灌(CK, FI) 2 种水分管理模式, 副区为 4 种氮肥水平, N0 (不施氮)、N1 (13.04 g pot⁻¹, 相当于大田 150 kg hm⁻²)、N2 (26.09 g pot⁻¹, 相当于大田 300 kg hm⁻²)和 N3 (39.13 g pot⁻¹, 相当于大田 450 kg hm⁻²) (表 1), 重复 6 次, 共计 96 盆。滴灌采用网纹聚乙烯盆、淹灌为不透水聚乙烯盆(长 0.70 m×宽 0.50 m×高 0.50 m), 每盆种植 2 行 12 穴水稻; 株行距 10+26+10 cm, 滴灌带铺设于行中间。取大田耕层 0~20 cm 土壤, 按每盆 90 kg 标准(风干土)装盆、沉实、平整土壤, 埋入田间 45 cm。2 年均于 5 月 1 日人工播种、9 月 30 日收获; 滴头流量 2.1 L h⁻¹、间距 30 cm, 干播湿出。出苗后, 滴灌保留地膜和滴灌设施, 淹灌拆除; 及时放苗, 每穴保苗 8 株。出苗 15 d 后, 滴灌按拔节前每隔 4 d、拔节后每隔 3 d 进行滴水, 滴水时间每天 8 h, 成熟前 15 d 停止灌溉, 总灌水量为 10,200 m³ hm⁻²。淹灌苗期保持 2~3 cm 水层, 其余生育期保持 3~5 cm 水层, 收获前 15 d 断水。肥料品种为氮肥(尿素, N 46%)和磷钾肥(磷酸二氢钾, P₂O₅ 52.1%; K₂O 34.6%), 氮肥运筹方式见表 1, 其他管理与大田一致。

表 1 滴灌和淹灌全生育期肥料施用量

Table 1 Fertilizer application over the full growth stage of drip and flood irrigation

肥料品种 Fertilizer type		生育时期 Growth stage							
		苗期 Seedling stage	三叶期 Three leaf stage	分蘖期 Tillering stage	拔节期 Jointing stage	孕穗期 Booting stage	抽穗期 Heading stage	扬花期 Flowering stage	灌浆期 Grain filling stage
CO(NH ₂) ₂	N0	0	0	0	0	0	0	0	0
	N1	0.65	1.96	2.62	1.30	1.30	1.30	1.30	2.60
	N2	1.30	3.92	5.22	2.61	2.61	2.61	2.61	5.22
	N3	1.96	5.87	7.83	3.91	3.91	3.91	3.91	7.83
KH ₂ PO ₄ -2		0.46	1.38	1.85	0.92	0.92	0.92	0.92	1.85

1.3 测定项目与方法

1.3.1 根系总根长、表面积、平均直径、体积等形态学指标测定 抽穗期将水稻与塑料盆挖出，破坏性取样，切掉塑料盆一侧。去掉地上部植株，以 2 行最外侧稻穴中心为起点，划分为长 10 cm×宽 25 cm×高 10 cm 土块；按层取出土块置于 20 目筛网中，流水洗净泥沙，收集 0~10、10~20、20~30 和 30~40 cm 土层根系。室内置于根盒(长 28 cm、宽 21 cm)，保持 0.5 cm 水层使根系完全舒展，Epson V800 扫描仪以 300 dpi 分辨率数字化为图形文件。利用 WinRHIZO Pro 2017 (Regent Co., Ltd., 加拿大)根系分析软件，测定根长、表面积、根体积密度、平均直径及根长随直径的分布，其中：根系直径按<0.1 mm、0.1~0.3 mm、0.3~0.5 mm、0.5~0.7 mm、0.7~0.9 mm、0.9~1.1 mm、>1.1 mm 划分，并将<0.3 mm 定义为细根、>0.3 mm 定义为粗根^[13,23]，之后 85 °C 烘干并称量各深度根系干物质量。

1.3.2 根系分形维数的测定 根系形态学样品收集完后修整土壤剖面，将自制的间隔 2 cm 的钉板 (ZL201720192129.6, 一种须根系植物的根系采集装置，长 50 cm、宽 50 cm、钉长 10 cm) 纵向压入土壤(图 2)，固定水稻根系切割下整块土壤，小心用流水冲洗干净根系上的土壤，获得完整的水稻根系样品。盖上孔间距 2 cm 玻璃板，翻转钉板保持根系的二维平面，将水稻根系取出，置于 Epson 12000 XL 扫描仪上以 300 dpi 分辨率数字化为图形文件，重复 3 次。利用 ImageJ 图像处理软件(盒维数法)对图形文件进行二值化和二维图像分形分析(分形维数插件, Fractal Box Count)，其原理是在根系二值化图像二维平面上，覆盖边长 r (2、3、4、6、8、12、16、32 和 64 mm) 的小正方形格子，计算根系所占的小正方形格子数目 Nr 。以 $\log_{10} Nr$ 为纵坐标、 $\log_{10} r$ 为横坐标作直线回归，按如下公式计算根系分形维数和分形丰度：

$$\log_{10} Nr = -D \log_{10} r + \log_{10} K \quad (1)$$

式中，回归斜率的负数 D 值即为分形维数 FD ($1 \leq FD \leq 2$)， $\log_{10} K$ 为分形丰度 FA ^[8,13,15]。

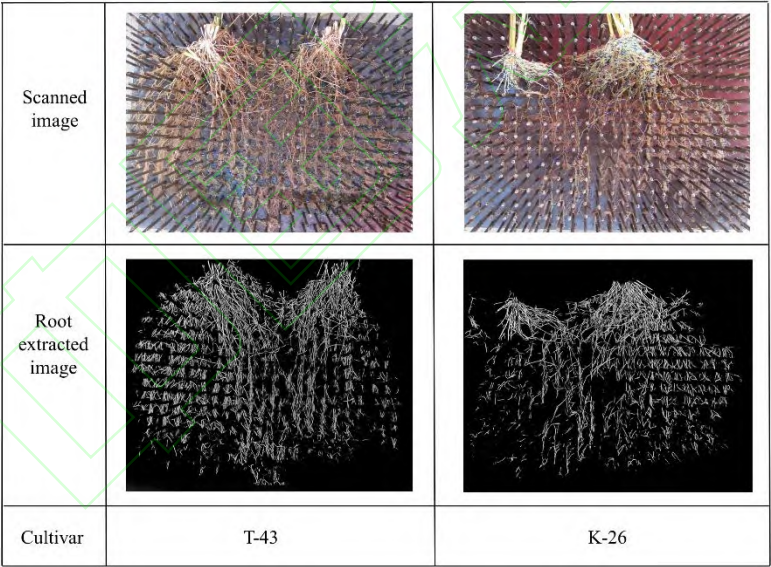


图 2 根系采集装置

Fig. 2 Root collection device

1.3.3 根系构型学参数计算 根系构型学参数用渐近方程描述总根长、总面积、根体积、根质量的垂直分布，计算如下：

$$Y = 1 - \beta^D \quad (2)$$

式中， D 为土壤深度(cm)， Y 为地表到土层 D 的各形态学指标占总体比例(0~1)； β 为深度系数， β 越小，根分布越靠近土壤表面； β 越大，根分布越深；计算 D 为 20 cm 时的 β 值。

1.3.4 干物质积累和氮素吸收、积累及转运 于水稻抽穗期按每盆茎蘖数的平均数取代表性植株 3 穴，分根、茎鞘、叶和穗 4 个部分，105°C 下杀青 30 min，80°C 下烘干至恒重后称重记录，粉碎后过 0.246 mm

筛, 采用浓 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮, 用 FOSS 8400 半微量凯氏定氮仪分别测定各器官的氮含量。计算参数如下: 氮积累总量($\text{NA}, \text{g pot}^{-1}$)=某生育期单位面积植株氮素的积累量; 氮素稻谷生产效率($\text{NGPE}, \text{kg kg}^{-1}$)=单位面积籽粒产量/单位面积植株氮积累量; 氮肥偏生产力($\text{PFP}, \text{kg kg}^{-1}$)=施氮区产量/氮肥施用量; 氮肥农学利用率($\text{NAE}, \text{kg kg}^{-1}$)=(施氮区产量-无氮区产量)/施氮量。

1.3.5 产量测定 成熟期取各处理 3 盆用于考种, 考查每盆穗数、每穗粒数、结实率和千粒重。

1.4 统计分析

采用 SPSS 16.0 对试验数据进行方差分析和差异显著性检验($\alpha=0.05$), LSD 法比较; 图表制作采用 Microsoft Excel 2016 和 Origin 2023 共同绘制, 图中数据用平均值 $\pm \text{SE}$ 表示。因 2 年的试验结果趋势基本一致, 故本文根系性状以 2022 年的数据进行分析。

2 结果与分析

2.1 水分管理和施氮量对产量和氮素利用效率的影响

由表 2 可知, 与 FI 相比, DI 显著降低了 2 品种产量、氮积累总量、氮肥偏生产力, 降幅分别为 14.1%~23.5%、10.4%~19.5%、29.5%~37.5%; 显著提高了氮肥农学利用效率, 增幅为 12.1%~22.4%。DI 条件下, 2 品种产量和氮积累总量随施氮量的增加呈增加趋势, 其中 N_{300} 与 N_{450} 之间无显著差异; 氮肥偏生产力随施氮量的增加呈下降趋势; 氮素稻谷生产效率、氮积累总量在 3 种施氮水平下无显著差异(2022 垦-26 的氮肥农学利用效率除外)。品种间, 与垦-26 相比, T-43 在 2 种水分管理下产量和氮素稻谷生产效率分别提高 14.0%~42.5%、8.9%~34.2%, 氮肥农学利用效率降低 5.4%~15.6%。方差分析表明, 水分管理对产量和氮素利用效率各指标的影响达极显著水平($P<0.01$), 氮肥对产量和稻谷生产效率、氮肥农学利用效率的影响达显著水平($P<0.05$), 水氮互作对产量、氮素稻谷生产效率、氮肥偏生产力、氮肥农学利用效率的影响达极显著水平($P<0.01$)。

表 2 水分管理和施氮量对产量和氮素利用效率的影响

年份 Year	品种 Cultivar	处理 Treatment	产量 Yield (g pot ⁻¹)	N 积累总量 TNA (g pot ⁻¹)	氮素稻谷生产效率 NGPE (kg kg ⁻¹)	氮肥偏生产力 PFP (kg kg ⁻¹)	氮肥农学利用效率 NAE (kg kg ⁻¹)
2021	T-43	FI-N ₀	169.84±14.85 cd	4.81±0.41 c	89.63±4.23 a	—	—
		FI-N ₁₅₀	234.50±37.43 bc	5.16±0.95 bc	75.23±5.25 ab	37.25±8.05 a	4.90±7.54 b
		FI-N ₃₀₀	293.59±47.95 a	7.57±0.49 a	65.36±4.21 abc	31.64±5.16 ab	5.46±3.71 ab
		FI-N ₄₅₀	268.53±18.56 a	5.29±0.49 bc	62.77±4.12 abc	19.31±1.32 c	4.42±1.33 b
		DI-N ₀	129.63±23.82 d	4.23±0.36 c	73.21±3.56 ab	—	—
		DI-N ₁₅₀	186.86±13.92 c	5.20±0.65 bc	60.76±12.35 abc	40.28±3.03 a	5.33±3.73 ab
		DI-N ₃₀₀	270.08±67.44 a	6.45±0.25 b	58.36±4.20 bc	26.94±7.26 bc	6.97±5.75 a
		DI-N ₄₅₀	249.97±67.44 ab	6.93±1.06 ab	54.65±1.20 bcd	19.41±4.84 c	4.09±5.59 b
	K-26	FI-N ₀	147.26±8.04 c	5.30±1.02 bc	75.23±9.84 b	—	—
		FI-N ₁₅₀	170.46±44.86 b	6.61±0.72 b	64.56±10.42 b	36.76±9.69 a	5.36±10.99 c
		FI-N ₃₀₀	266.98±58.47 a	7.57±0.30 a	55.36±6.09 b	28.77±6.30 ab	6.58±5.79 b
		FI-N ₄₅₀	249.35±39.91 b	7.26±0.60 ab	49.78±19.63 b	15.25±2.87 c	4.12±2.31 d
		DI-N ₀	100.85±16.71 c	3.57±0.10 d	85.35±4.25 a	—	—
		DI-N ₁₅₀	167.99±31.86 b	3.85±0.03 d	95.47±7.88 a	36.20±6.84 a	7.44±10.24 ab
		DI-N ₃₀₀	205.11±17.63b	5.03±0.57 cd	84.77±5.36 a	22.10±1.89 bc	8.22±3.21 a
		DI-N ₄₅₀	225.84±5.88 ab	5.32±0.49 c	78.66±11.56 a	11.78±0.41 c	6.53±1.21 b
2022	T-43	FI-N ₀	233.26±6.19 c	4.68±0.39 e	73.46±5.81 a	—	—
		FI-N ₁₅₀	267.29±8.04 b	5.61±1.38 c	65.93±17.58 ab	37.59±1.73 b	2.69±0.39 bc
		FI-N ₃₀₀	296.37±2.78 a	8.07±0.54 a	64.66±2.92 ab	26.92±0.30 c	3.47±0.74 bc
		FI-N ₄₅₀	288.95±16.09 a	5.42±0.74 cd	62.77±3.72 abc	21.32±1.16 d	2.36±1.50 c
		DI-N ₀	204.49±8.97 d	4.23±0.36 f	62.77±3.72 abc	—	—
		DI-N ₁₅₀	241.00±7.12c	5.20±0.65 d	60.76±7.18 abc	44.03±1.91 a	5.87±3.37 ab
		DI-N ₃₀₀	270.39±1.24 b	6.45±0.25 bc	51.53±1.50 bc	25.95±0.76 cd	6.63±1.03 a
		DI-N ₄₅₀	256.47±2.78 bc	6.93±1.06 b	51.65±8.08 bc	18.43±0.19 e	5.76±0.68 ab
	K-26	FI-N ₀	163.66±12.07 c	4.81±1.02 bc	55.24±9.84 b	—	—
		FI-N ₁₅₀	237.9±26.61 b	6.40±0.72 b	49.51±10.42 c	51.63±6.57 a	5.73±6.57 c
		FI-N ₃₀₀	259.87±26.30 a	7.02±0.26 ab	48.46±6.09 c	28.29±3.21 c	6.68±6.43 b
		FI-N ₄₅₀	281.52±13.92 a	7.76±1.08 a	46.11±19.63 c	21.23±0.34 d	4.81±1.01 d
		DI-N ₀	126.84±13.92 d	3.13±0.02 d	108.75±11.86 a	-	-
		DI-N ₁₅₀	168.91±8.66 c	3.25±0.03 d	109.81±18.64 a	36.76±2.03 b	6.03±2.03 b
		DI-N ₃₀₀	225.84±4.64 b	4.59±0.20 d	86.89±7.09 a	24.41±0.53 cd	8.05±0.53 a
		DI-N ₄₅₀	234.81±5.26 b	5.12±0.42 bc	86.81±6.90 a	13.71±0.44 e	5.46±0.44 c
方差分析 ANOVA							
水分管理 Water management (W)			165.86**	347.8**	73.2**	506.3**	73.2**
氮肥 Nitrogen (N)			180.58**	4.40NS	7.39*	4.75NS	7.39*
水分×施肥 W×N			7.03**	3.72NS	13.1**	39.3**	13.1**

同列数据后不同字母表示同一品种间在 5% 概率水平差异显著。NS 表示在 $P<0.05$ 水平上差异不显著，*、** 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平上差异显著和极显著。DI: 滴灌, FI: 淹灌, TNA: 氮素积累总量, NGPE: 氮素稻谷生产效率, PFP: 氮肥偏生产力, NAE: 氮肥农学利用效率。

Different letters after the data in the same column indicate significant differences between the same cultivars at the 5% probability level. NS: not significant ($P>0.05$). * and ** represents $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively. DI: drip irrigation; FI: flooding irrigation. TNA: the total N accumulation; NGPE: N grain production efficiency; PFP: N partial factor productivity; NAE: nitrogen agronomic efficiency.

2.2 水分管理和施氮量对水稻根系形态学指标的影响

由表 3 可知,与 FI 相比,DI 显著降低了 2 品种的根长密度、表面积密度、根体积密度与平均直径($P<0.05$), T-43 和 垦-26 的根长密度分别降低 32.4%~42.6%、37.5%~54.1%, 根表面积密度分别降低 27.1%~49.7%、33.5%~59.8%, 根体积密度分别降低 24.3%~55.9%、34.8%~64.8%, 平均直径分别降低 10.8%~13.9%、8.9%~15.6%。DI 下,与 N₀ 相比, N₁₅₀、N₃₀₀、N₄₅₀ 下 T-43 的根长密度分别显著增加 27.4%、31.2%、20.5%; 垦-26 显著增加 31.5%、58.7%、107.4%, 根表面积密度、根体积密度表现出相同趋势。品种间,与 垦-26 相比,DI 下 T-43 根长密度和表面积密度分别增加 56.3%~77.4%和 23.5%~117.2%。方差分析表明,水分管理对根系形态各指标的影响达极显著水平($P<0.01$), 施肥和水氮互作对根长、表面积、平均直径的影响达极显著水平($P<0.01$)。

表3 水分管理和施氮量对根系形态学指标的影响

Table 3 Effect of water management and nitrogen application on morphological indices of root system

品种 Cultivar	施氮量 Nitrogen	根长密度 RLD (cm dm ⁻³)	根表面积密度 SAD (cm ² dm ⁻³)	平均直径 AD (cm)	根体积密度 RVD (cm ³ dm ⁻³)
T-43	FI-N ₀	1652.2±71.3 d	278.3±20.5 d	0.54±0.01 a	3.7±0.4 c
	FI-N ₁₅₀	1893.9±63.2 c	330.5±7.4 c	0.54±0.02 a	4.6±0.1 b
	FI-N ₃₀₀	2625.2±2.8 a	456.0±6.1 a	0.55±0.01 a	6.3±0.2 a
	FI-N ₄₅₀	2413.7±73.4 b	418.9±19.9 b	0.54±0.01 a	5.8±0.4 a
	DI-N ₀	1027.5±139.9 f	156.8±22.1 f	0.46±0.01 b	1.9±0.3 d
	DI-N ₁₅₀	1309.5±42.4 e	197.2±10.1 e	0.46±0.01 c	2.4±0.2 d
	DI-N ₃₀₀	1354.0±16.3 e	198.3±3.8 e	0.46±0.01 c	2.3±0.1 d
	DI-N ₄₅₀	1238.2±228.5 e	193.6±35.3 e	0.49±0.02 c	2.4±0.5 d
K-26	FI-N ₀	2393.8±101.5 c	364.6±21.1 d	0.49±0.01 bc	4.4±0.3 c
	FI-N ₁₅₀	2664.6±302.3 b	444.7±65.5 c	0.53±0.01 a	6.0±1.1 b
	FI-N ₃₀₀	3126.1±248.5 a	495.8±35.8 b	0.54±0.03 a	6.3±0.4 b
	FI-N ₄₅₀	3249.3±43.90 a	573.0±15.9 a	0.55±0.01 a	8.1±0.4 a
	DI-N ₀	878.9±49.3 f	117.8±4.3 g	0.42±0.01 c	1.3±0.1 f
	DI-N ₁₅₀	1155.7±28.9 e	174.5±3.0 f	0.52±0.05 ab	2.1±0.1 e
	DI-N ₃₀₀	1395.4±21.1 e	198.3±5.8 f	0.44±0.01 bc	2.3±0.1 e
	DI-N ₄₅₀	1823.3±116.5 d	265.2±13.9 e	0.46±0.01 bc	3.1±0.1 d
方差分析 ANOVA					
水分管理 Water management (W)		429.6**	524.0**	347.8**	536.5**
施肥 Nitrogen (N)		27.1**	23.0**	4.40NS	18.3**
水分×施肥 W×N		30.4**	30.7**	3.72NS	28.3**

同列数据后不同字母表示同一品种间在 5% 概率水平差异显著。NS 表示在 $P<0.05$ 水平上差异不显著，*、** 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平上差异显著和极显著。DI: 滴灌; FI: 淹灌; RLD: 根长密度; SAD: 表面积密度; AD: 平均直径; RVD: 根体积密度。处理同表 2。

Different letters after the data in the same column indicate that the differences between the same cultivars at the 5% level of significance. NS, not significant ($P>0.05$). * and ** represents $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively. DI: drip irrigation; FI: flooding irrigation; RLD: root length density; SAD: surface area density; AD: AvgDiam; RVD: root volume density. Abbreviation treatments are the same as those given in Table 2.

2.3 水分管理和施氮对不同直径范围根长密度的影响

由图 3-A 可知, 与 FI 相比, DI 下 T-43 和 垦-26 各直径范围内 RLD 显著降低($P<0.05$), 0.1-0.3 mm(细根)降幅为 36.1%~42.5%和 45.8%~51.3%; >0.5mm(粗根)降幅为 51.1%~68.6%和 65.1%~78.4%。施氮后显著提高了 DI 下各直径范围根长密度($P<0.05$), 与 N₀ 相比, N₃₀₀ T-43 和 垦-26 细根增加 46.7%和 85.7%; 粗根增加 80.5%和 167.7%。同时, 与 FI 相比, DI 可显著增加细根占总根长比例(图 3-B), T-43 和 垦-26 增幅为 6.8%~14.5%和 9.9%~17.2%; 粗根则显著降低, 降幅为 8.8%~36.8%和 12.1%~67.5%。DI 下与 N₀ 相比, N₃₀₀ 细根比下降 8.9%和 9.1%, 粗根比增加 77.3%和 96.8%。品种间, 与 垦-26 相比, T-43 0.1~0.3 mm 和 0.5~0.7 mm 的 RLD 显著降低($P<0.05$), 降幅为 32.1%~43.7%和 25.2%~34.3%。

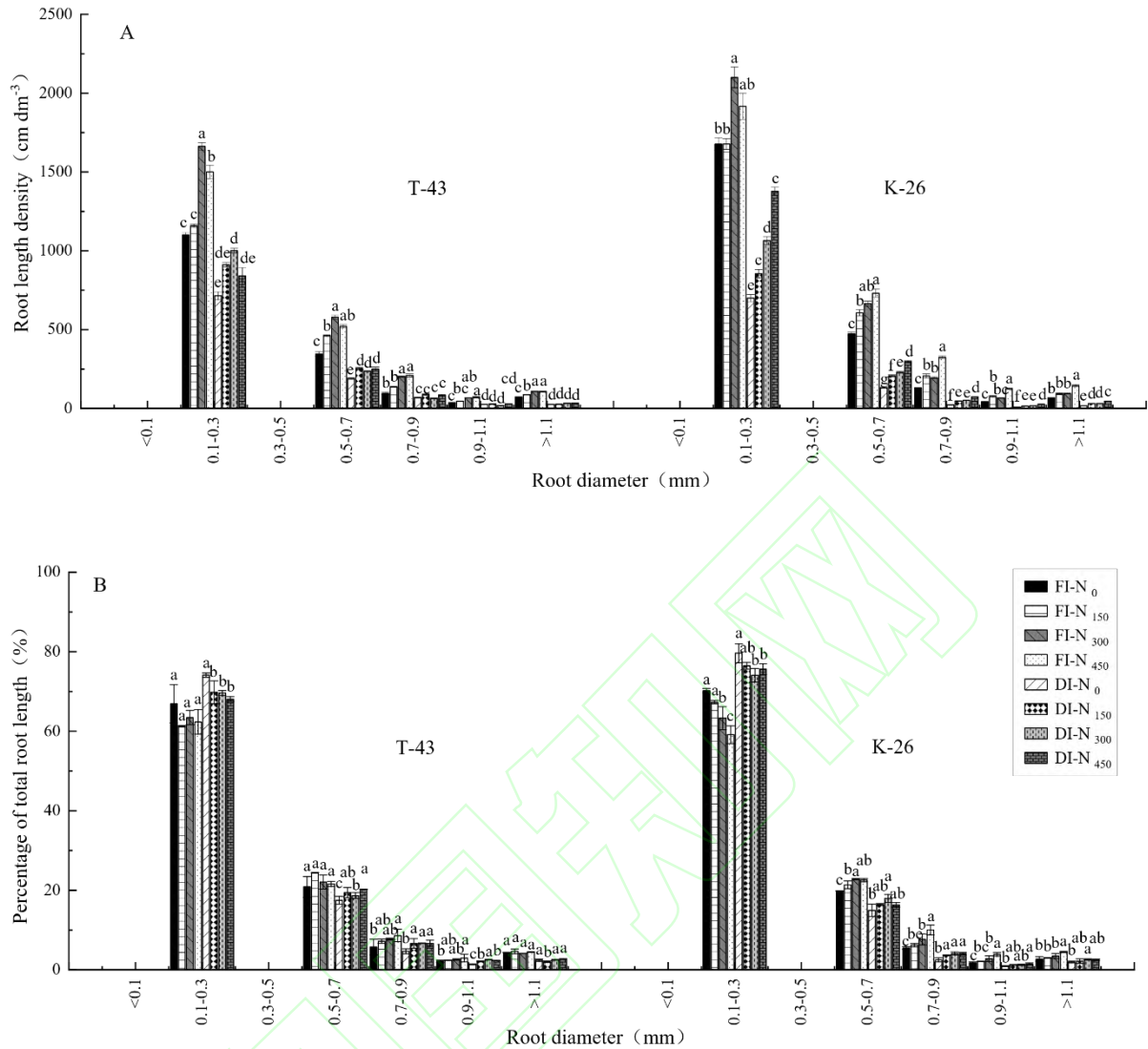


图3 不同直径根系长度分布及占总根长的比例

Fig. 3 Root length distribution classified by various root diameters

T-43: 氮高效品种; 垦-26: 氮低效品种。DI: 滴灌; FI: 淹灌。不同字母表示同一水分管理不同施氮量间差异在 0.05 概率水平差异显著。
T-43: high-NUEs cultivar; Ken-26: low-NUEs cultivar. DI: drip irrigation; FI: flooding irrigation. Different letters indicate significant differences between different nitrogen applications in the same moisture management at the 0.05 probability level.

2.4 水分管理和施氮对水稻根系垂直分布的影响

如图 4 所示, 水稻根系在土层中的分布明显不同。FI 下 0~10cm 土层根长、表面积、根体积及根质量密度约占总根系的 63.2%~67.5%、49.1%~68.5%、51.7%~69.9%、60.0%~72.9%, DI 下根长、表面积、根体积及根质量密度约占总根系的 48.9%~66.8%、52.8%~68.1%、56.7%~69.4%、69.1%~77.6%; 10 cm 以下土层根系分布较少, FI 下根长密度占总根长密度的 32.4%~36.7%, DI 下根长密度约占 33.5%~51.1%。与 FI 相比, DI 显著降低了 2 品种在 0~40 cm 土层的根长、表面积、根体积及根质量密度, 降幅为 40.3%~90.5%、67.4%~92.7%、95.5%~222.2%及 9.6%~24.9%。DI 下, 与 N₀ 相比, T-43 N₁₅₀、N₃₀₀、N₄₅₀ 的根长、表面积、根体积及根质量密度显著提高, 其中 N₃₀₀ 与 N₄₅₀ 之间无显著性差异; 垦-26 N₄₅₀ 显著高于 N₃₀₀。其他 3 个土壤层次, 根系形态各指标均随施氮增加呈先升后降趋势。品种间, DI 下, 与相比, T-43 根长密度、表面积密度、根质量密度显著高于垦-26。

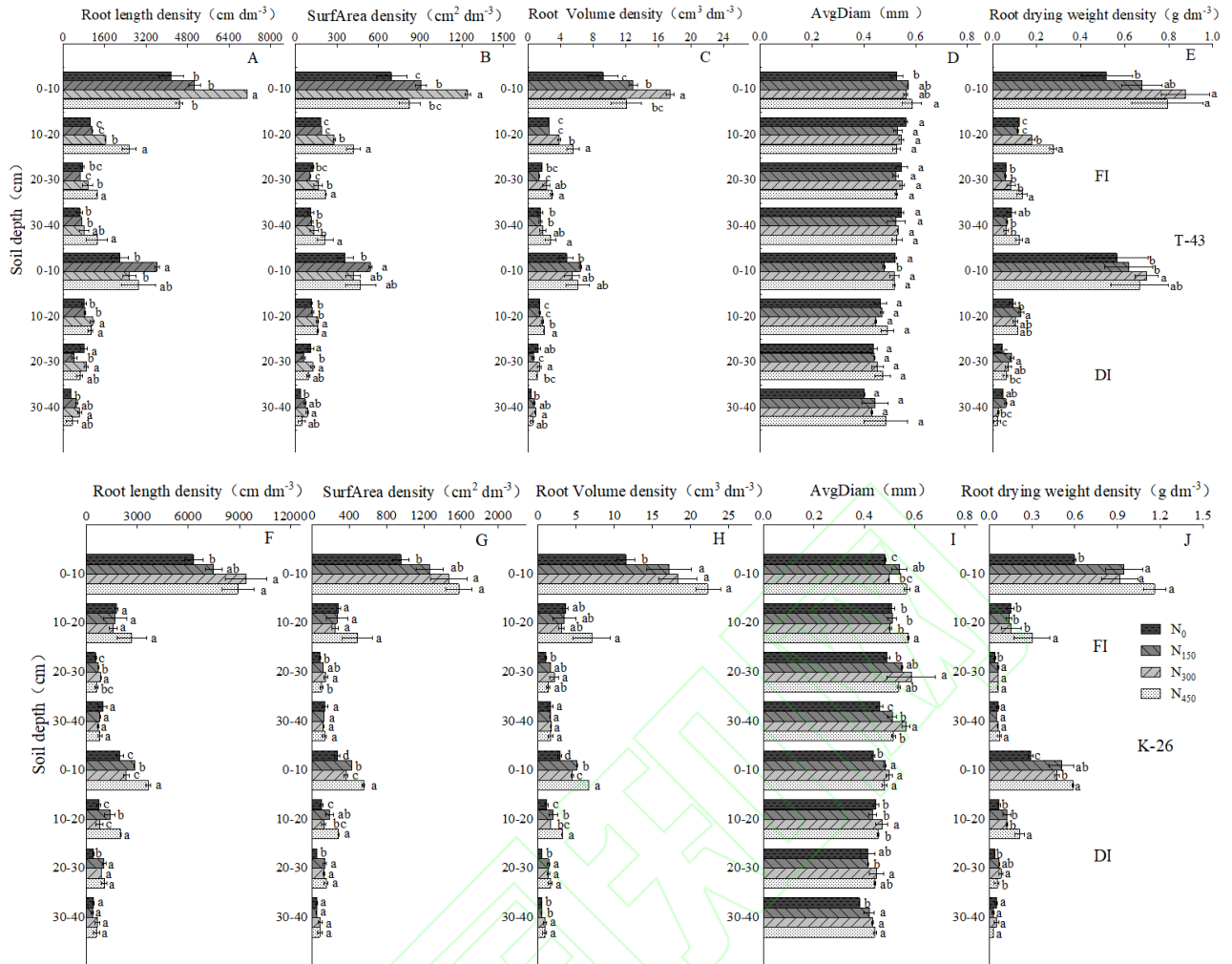


图4 水管理对水稻根系垂直分布的影响

Fig. 4 Effects of water management and nitrogen application on the vertical distribution of rice roots

T-43: 氮高效品种; 垦-26: 氮低效品种。DI: 滴灌; FI: 淹灌。不同字母表示同一水分管理不同施氮量间差异在 0.05 概率水平差异显著。

T-43: high-NUEs cultivar; Ken-26: low-NUEs cultivar. DI: drip irrigation; FI: flooding irrigation. Different letters indicate significant differences between different nitrogen applications in the same moisture management at the 0.05 probability level.

2.5 水管理对水稻根系构型 β 值分布的影响

根系构型学可用渐进方程 β 值的大小来描述(表 4)。与 FI 相比, DI 下 T-43 和 垦-26 根长密度、表面积密度、根体积密度、根质量密度 β 值分别提高 0.65%~5.45%和 0.32%~3.43%、0.22%和 2.99%、-0.11%和 2.66%、-1.32%和 1.68%。不同施氮量间, DI 下, T-43 和 垦-26 根长密度 β 值均为 N_{300} 最高, 与 N_0 相比提高 2.62%和 1.50%; 表面积密度、根体积密度、根质量密度 β 值变化与根长密度 β 值一致。品种间, 与 垦-26 相比, DI 下 T-43 表面积密度、根体积密度、根质量密度 β 值整体降低 1.1%~1.9%、0.4%~1.7%、0.7%~2.1%。方差分析表明, 水管理对根长密度、根质量密度 β 值的影响达显著水平, 施肥和水氮互作对根长密度、表面积密度、根体积密度 β 值的影响达极显著水平($P<0.01$)。

表 4 水分管理和施氮对水稻根系构型 β 值分布的影响Table 4 Effects of water management and nitrogen application on the distribution of β -values of rice root conformation

品种 Cultivar	施氮量 Nitrogen	根长密度 β RLD β	根表面积密度 SAD β	根体积密度 RVD β	根质量密度 RDWD β
T-43	FI-N ₀	0.915±0.001 c	0.914±0.001 d	0.913±0.001 b	0.900±0.010 bcd
	FI-N ₁₅₀	0.918±0.000 bc	0.915±0.001 d	0.912±0.001 b	0.905±0.010 bc
	FI-N ₃₀₀	0.924±0.012 b	0.925±0.013 bc	0.926±0.010 a	0.910±0.010 ab
	FI-N ₄₅₀	0.937±0.010 a	0.934±0.001 a	0.932±0.002 a	0.921±0.010 a
	DI-N ₀	0.917±0.001 bc	0.913±0.002 d	0.909±0.001 b	0.911±0.010 ab
	DI-N ₁₅₀	0.937±0.002 a	0.931±0.001 ab	0.924±0.001 a	0.891±0.000 cd
	DI-N ₃₀₀	0.941±0.010 a	0.936±0.010 a	0.932±0.010 a	0.902±0.020 bcd
	DI-N ₄₅₀	0.920±0.010 bc	0.918±0.001 cd	0.914±0.001 b	0.890±0.010 d
K-26	FI-N ₀	0.900±0.002 de	0.905±0.010 c	0.910±0.010 cd	0.893±0.001 cd
	FI-N ₁₅₀	0.906±0.001 cd	0.906±0.011 c	0.906±0.010 d	0.890±0.010 cde
	FI-N ₃₀₀	0.911±0.010 c	0.910±0.010 c	0.909±0.011 d	0.898±0.001 c
	FI-N ₄₅₀	0.894±0.010 e	0.891±0.011 d	0.888±0.010 e	0.882±0.010 de
	DI-N ₀	0.932±0.011 b	0.928±0.010 b	0.924±0.010 ab	0.904±0.001 bc
	DI-N ₁₅₀	0.929±0.012 b	0.926±0.001 b	0.922±0.002 bc	0.919±0.001 a
	DI-N ₃₀₀	0.946±0.011 a	0.942±0.001 a	0.937±0.001 a	0.920±0.000 ab
	DI-N ₄₅₀	0.927±0.011 b	0.925±0.010 b	0.923±0.010 bc	0.880±0.021 e
方差分析 ANOVA					
水分管理模式 Water management (W)		6.02*	1.50NS	0.12NS	10.2**
施肥 Nitrogen (N)		19.14**	17.4**	11.5**	0.88NS
栽培×施肥 W×N		8.07**	11.5**	11.1**	7.55**

处理缩写和指标缩写同表 2 和表 4。同列数据后不同字母表示同一品种间在 5% 概率水平差异显著。NS 表示在 $P<0.05$ 水平上差异不显著，*、** 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平上差异显著和极显著。

Abbreviations of indexes and treatments are the same as those given in Tables 2 and 4, respectively. Different letters after the data in the same column indicate significant differences between the same cultivars at the 5% probability level. NS: not significant ($P>0.05$). * and ** represent $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively.

2.6 水分管理和施氮对水稻根系分形维数和分形丰度的影响

由表 5 可知，相同施氮量下，T-43 和垦-26 分形维数、分形丰度在 DI 和 FI 处理下无显著差异。不同施氮量间，DI 下，与 N₀ 相比，N₃₀₀ 下 T-43 分形维数显著增加 4.73%；垦-26 显著增加 6.06%；T-43 分形丰度与分形维数表现一致，垦-26 分形丰度以 N₄₅₀ 最高，显著增加 16.1% (与 N₀ 相比)。品种间，DI 下，与垦-26 相比，T-43 分形维数显著增加 1.29%~6.57%，分形丰度显著增加 2.23%~5.34%。方差分析表明，水分管理对 2 品种分形维数和分形丰度的影响达显著水平 ($P<0.05$)，施肥对 T-43 分形丰度的影响达极显著水平 ($P<0.01$)，水氮互作对垦-26 的影响达显著水平 ($P<0.05$)。

表 5 水分管理和施氮对水稻根系分形维数和分形丰度的影响

Table 5 Effects of water management and nitrogen application on fractal dimension and fractal abundance of rice roots

施氮量 Nitrogen	分形维数FD		分形丰度FA	
	T-43	K-26	T-43	K-26
FI-N ₀	1.51±0.02 b	1.65±0.06 b	13.63±0.21 c	14.90±0.31 c
FI-N ₁₅₀	1.54±0.03 ab	1.70±0.04 ab	14.19±0.22 b	15.29±0.15 bc
FI-N ₃₀₀	1.59±0.03 a	1.72±0.03 ab	14.69±0.29 a	15.69±0.29 ab
FI-N ₄₅₀	1.55±0.02 ab	1.75±0.04 a	14.34±0.16 ab	15.91±0.40 a
DI-N ₀	1.48±0.02 b	1.43±0.04 b	13.06±0.56 b	12.73±0.45 c
DI-N ₁₅₀	1.50±0.01 b	1.47±0.05 b	13.30±0.25 b	12.83±0.32 c
DI-N ₃₀₀	1.55±0.02 a	1.57±0.02 a	14.07±0.25 a	14.07±0.34 b
DI-N ₄₅₀	1.52±0.01 ab	1.62±0.01 a	13.71±0.05 ab	14.78±0.08 a
方差分析 ANOVA				
水分管理 Water management (W)	8.97*	53.5**	11.78**	20.45**
施肥 Nitrogen (N)	3.62NS	8.21*	12.58**	2.93NS
水分×施肥 W×N	1.80NS	2.91NS	0.26NS	5.98*

处理缩写和指标缩写同表 2 和表 4。同列数据后不同字母表示同一品种间在 5% 概率水平差异显著。NS 表示在 $P<0.05$ 水平上差异不显著，*、** 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平上差异显著和极显著。FD: 分形维数; FA: 分形丰度。

Abbreviations of indexes and treatments are the same as those given in Table 2 and Table 4, respectively. Different letters after the data in the same column indicate significant differences between the same cultivars at the 5% probability level. NS: not significant ($P>0.05$). * and ** represent $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively. FD: fractal dimension; FA: fractal abundance.

2.7 根系分形参数与根系形态间的相关性分析

主成分分析结果(图 5)表明，T-43 主成分第 1 轴解释率为 58.4%，第 2 轴的解释率为 38.9%。垦-26 主成分第 1 轴和第 2 轴解释率分别为 69.6%和 32.2%。T-43 中，直径 0.1~0.3 mm 根长密度、0~10 cm 土层的根长、根体积、根质量密度及平均直径与分形维数、分形丰度呈显著正相关，土层 10~20 cm 和 20~30 cm 的根长密度与分形维数、分形丰度呈显著负相关；垦-26 中，直径 0.1~0.3 mm 和 0.5~0.7 mm 的根长密度、土层 0~10 cm 根长、根质量密度与分形维数、分形丰度呈显著正相关，10~20 cm 表面积密度和 30~40 cm 土层根长密度与分形维数、分形丰度的呈显著负相关。

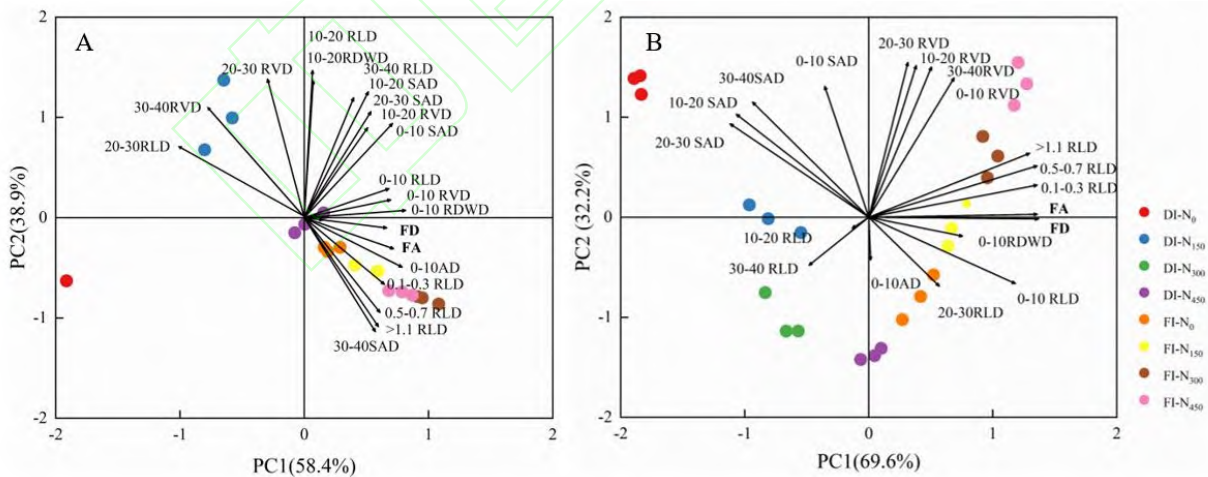


图 5 根系分形参数及其与根系形态间的相关性分析

Fig. 5 Root fractal parameters and their correlation with root morphology

处理缩写和指标缩写同表 2 和表 4。

Abbreviations of indexes and treatments are the same as those given in Tables 2 and 4, respectively. A: T-43; B: K-26.

2.8 根系分形参数与水稻产量、氮利用效率间相关分析

由图 5 可知，2 品种的产量、氮积累总量与分形维数、分形丰度均呈显著正相关关系，与氮肥偏生产力呈负相关关系。滴灌下氮素稻谷生产效率与分形维数、分形丰度呈显著正相关关系；淹灌下氮素稻谷生

产效率与分形维数、分形丰度无显著相关性，其中，滴灌的产量、氮积累总量相关性显著高于淹灌。品种间，T-43 的产量、氮积累总量与分形维数、分形丰度的相关性显著高于垦-26，氮素稻谷生产效率、氮肥偏生产力显著低于垦-26。

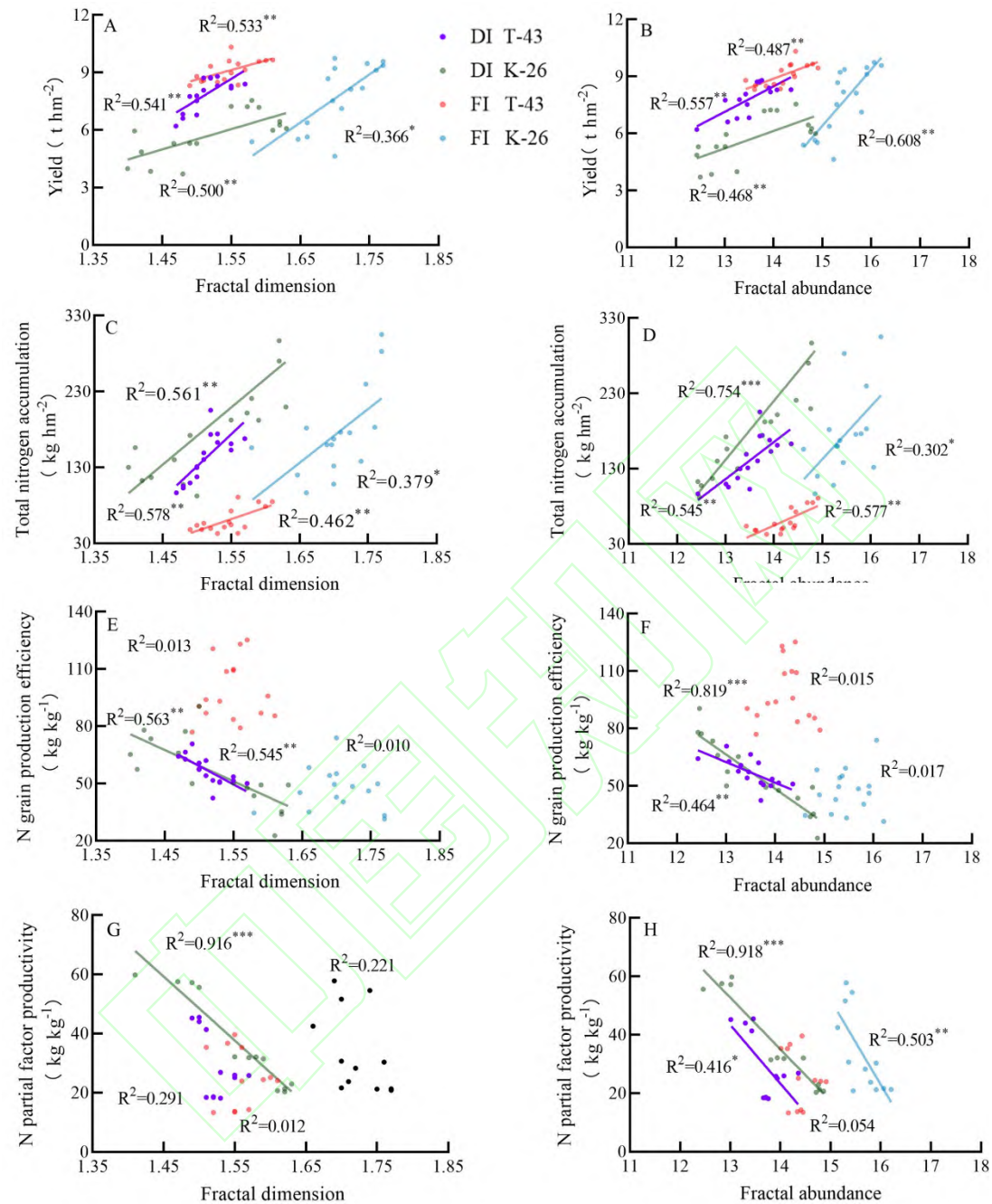


图 6 根系分形参数与水稻产量及氮利用效率间相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis between root fractal parameters and rice yield and nitrogen use efficiency

指标缩写同表 4。*、**、*** 分别表示在 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 水平上差异显著。

Abbreviations of indexes are the same as those given in Table 4. *, **, and *** means significant difference at the 0.05, 0.01, and 0.001 probability levels, respectively.

3 讨论

3.1 水稻根系形态构型、分形特征及氮素利用效率对不同水、氮环境的响应

根系起着吸收、传导水分和养分及支撑地上部等重要功能，根系的分支状况、构型对营养物质的吸收效率起着关键作用^[24]。张绍文等^[17]发现水稻控制灌溉后，抽穗期根长、根干物质和根体积显著高于淹灌，优化水分管理有助于提高根系形态指标与构型指数。本研究中，滴灌水稻根表面积、体积密度和直径 0.1~1.1

mm根长密度均显著低于淹灌，这与控制性、间歇性灌溉或轻度干湿交替等方式的结果并不一致。其原因可能是，滴灌后水分和养分局限于土壤湿润椭圆体内，根系感知土壤环境水分和养分变化，导致根系不再向深层扩展；另一方面滴灌对水稻而言会存在轻度水分胁迫，反馈至根系，植株活性氧积累^[25]，抑制根系生长。崔国贤等^[26]指出，旱作条件下水稻根系弯曲多、根毛繁茂，生长出大量的分枝根(特别是粗分枝根)，利于水稻根系下扎。本研究表明，2种水分管理模式下水稻根系均集中在0~10 cm土层，占到总量的60%左右；10~40 cm土层2种水分管理模式分布明显不同，淹灌根长密度占总根长的32.4%~36.7%，滴灌约占33.2%~51.1%。滴灌使土壤长期处于好氧环境，导致上层根系以短、粗的分支根为主；同时，覆膜后土壤硬度和容重降低，根长、根体积及根质量密度 β 值提高(表4)，促进了下层根系所占比例的提高^[27]。本研究中，滴灌后根系分形维数和丰度降低，陈吉虎等^[20]发现，干旱胁迫下银叶椴根系分形丰度会逐渐减小，而水稻为须根系植物，水分减少会带来不同分支根系数量同步降低，最终导致分形维数和丰度减少(表5和图3)。

旱地条件下合理施肥，可以扩大作物根系延伸范围，增强根系综合活力；同时认为，旱地合理施肥对作物的促根效应是“以肥调水，以水促肥”的机理所在^[28]。徐国伟等^[29]研究表明正常供水下施氮可增加水稻总根长和表层根长。本研究中，滴灌处理后增施氮肥(与 N_0 相比)，水稻各直径根系绝对数量、各土层根系形态指标(根长、表面积和根体积密度)提高。水氮互作处理对根系性状也具有不同效应，其中根长密度、表面积密度、根体积密度及根质量密度 β 值达极显著水平。Ranathunge等^[30]研究认为节水栽培条件下 NH_4^+-N 对根系生长及木质部汁液调节可能是氮素增强水稻抗旱性的原因之一。本试验进一步表明，采用滴灌管理，施氮量为 300 kg hm^{-2} 显著提高了氮高效水稻分形维数和丰度(1.55和14.07)。可见，在滴灌条件下，合理施用氮肥可起到“以肥济水”的作用，减轻土壤水分胁迫影响，促进根系分支和在土壤中扩展体积(图3和图4)。

合理的稻田灌溉和施肥是提高水稻产量和实现水、肥资源高效利用的重要基础^[16]。Carrijo等^[31]研究表明，与淹灌相比，节水灌溉下产量损失在3%~23%范围内。本研究发现，与淹灌相比，滴灌水稻T-43和垦-26产量下降3.8%~37.4%和14.1%~23.5%，而氮肥农学利用效率提高12.1%~22.4%，可能是滴灌后根系形态指标(表面积和体积密度、细根和粗根下的根长密度)均显著低于淹灌，导致产量降低，而滴灌后根系集中在上层土壤(图4)，根区溶氧能力增强，水稻根系活力提高^[27]，好氧环境下硝化作用会促进施入的氮素转化为 NO_3^-N ，水稻可同时利用 NH_4^+-N 和 NO_3^-N 两种形态的氮，进而提高氮素利用效率^[32-33]。水分和氮肥对不同水稻品种的产量影响不同^[34]。本研究中，采用滴灌后，施氮量为 300 kg hm^{-2} 时，相比氮低效品种垦-26，氮高效品种T-43产量和氮素稻谷生产效率显著增加，这可能是由于滴灌下土壤 NH_4^+ 绝大部分会转化为 NO_3^- ，对于氮高效水稻来讲，有利于氮素的吸收与利用并促进根系生长发育，使产量和氮利用效率增加。方差分析也表明，水氮互作对产量和氮素稻谷生产效率的影响达极显著水平，说明通过优化灌溉和施肥，可有效提高氮高效水稻品种产量。

3.2 水稻根系形态、氮利用效率与分形维数的相关性

分形维数可反映不同环境下根系发育程度、空间占有能力及营养物质吸收效率^[9,35]。廖成章和余翔华等^[1]研究表明，马尾松细根含量越多，分形维数越高；汪洪等^[13]认为分形维数与根系总长度之间呈显著正相关关系，直径0.15~0.60 mm根系长度与分形维数相关系数最大。本研究表明，2种栽培模式下分形维数、分形丰度与根系长度之间呈显著正相关关系，直径0.1~0.3 mm范围内的根长密度与分形维数和分形丰度相关系数最大，说明细根越多，根系分支就越多，这与前人研究结果相似。分形维数、分形丰度与0~10 cm土层根长、根质量密度和平均直径呈显著正相关关系，尤其是0~10 cm土层根质量密度与分形丰度相关系数最大；与20~30 cm土层的根长密度、表面积密度呈显著负相关关系。可见，表层根系形态与根系分支密切，根系空间占有能力与营养物质吸收效率更高。

Nielsen 等^[36]认为在土壤磷适宜条件下，根系分形维数与地上部磷含量呈显著正相关。本研究表明，灌溉模式影响着氮素吸收，滴灌下氮素稻谷生产效率($R^2=0.563^{**}$ 、 $R^2=0.819^{***}$)、氮积累总量($R^2=0.578^{**}$ 、 $R^2=0.754^{**}$)与分形维数、分形丰度呈显著正相关关系，氮肥偏生产力($R^2=0.916^{***}$ 、 $R^2=0.918^{***}$)与二者呈负

相关关系,表明滴灌下水稻细根百分比提高、根系比表面积增加,提高了水稻植株氮积累和稻谷生产效率,但氮肥偏生产力会随施氮量的增加显著降低(表 3)。Cabangon 等^[37]研究表明,作物种类和品种不同,根系维数不同,可能影响植物对养分的吸收和植株体内养分利用效率。本研究中,T-43 的产量、氮素稻谷生产效率与分形维数、分形丰度的相关性显著高于垦-26,可能是由于滴灌始终使水稻根系处在铵、硝混合环境下,促进了氮高效品种对氮素的吸收,使产量优势更显著。水稻产量、氮吸收和利用不仅受到根系形态影响,可能还与根系的生理活性、解剖结构、叶片光合特性等因素有关,需在今后的研究中予以重点关注。

4 结论

与淹灌相比,滴灌处理 2 品种 0.1~0.3 mm 细根和根系在下层(10~40 cm)土壤中的比例增加,根系绝对数量降低,分形维数和分形丰度下降,导致产量降低;但氮肥农学利用效率提高。滴灌水稻分形维数和丰度与产量、氮积累总量、氮素稻谷生产效率的相关系数显著高于淹灌,且分形维数和丰度与直径 0.1~0.3 mm 根长密度、0~10 cm 土层根长、根质量密度、产量、氮积累总量、氮素稻谷生产效率呈显著正相关。因此,滴灌处理下氮高效品种“T-43”在适宜施氮量(300 kg hm⁻²)时可改善根系形态和构型,促进根系对养分和水分的吸收,进而实现产量和氮肥利用效率协同提高。

References

- [1] 张晨晖,章岩,李国辉,杨子君,查莹莹,周驰燕,许 轲,霍中洋,戴其根,郭保卫.侧深施肥下水稻高产形成的根系形态及其生理变化特征.作物学报,2023,49: 1039–1051.
Zhang C H, Zang Y, Li G H, Yang Z J, Zha Y Y, Zhou C Y, Xu K, Huo Z Y, Dai Q G, Guo B W. Characteristics of root morphology and its physiological changes in the formation of high yielding rice under lateral deep fertilization. *Acta Agron Sin*, 2023, 49: 1039–1051 (in Chinese with English abstract).
- [2] Henke M, Sarlikioti V, Kurth W, Gerhard H, Sorlin B, Pagès L. Exploring root developmental plasticity to nitrogen with a three-dimensional architectural model. *Plant Soil*, 2014, 385: 49–62.
- [3] Ristova D, Busch W. Natural variation of root traits: from development to nutrient uptake. *Plant Physiol*, 2014, 166: 518–527.
- [4] 吴昊,张瑛,王琛.栽培优化对长江下游水稻灌浆期根系特征和稻米淀粉特性的影响.作物学报,2024,50: 478–492.
Wu H, Zhang Y, Wang C. Effects of cultivation optimization on root characteristics and starch characteristics of rice at grain filling stage in the lower reaches of the Yangtze River. *Acta Agron Sin*, 2024, 50: 478–492. (in Chinese with English abstract).
- [5] Rogers E D, Benfey P N. Regulation of plant root system architecture: Implications for crop advancement. *Curr Opin Biotechnol*, 2015, 32: 93–98.
- [6] 闫励,杨方社,李怀恩.砒砂岩区不同立地下沙棘根系分形特征.干旱区研究,2019,36: 467–473.
Yan L, Yang F D, Li H E. Fractal characteristics of the root system of sea buckthorn under different elevations in an arsenic sandstone area. *Arid Zone Res*, 2019, 36: 467–473 (in Chinese with English abstract).
- [7] 马雄忠,王新平.阿拉善高原 2 种荒漠植物根系构型及生态适应性特征.生态学报,2020,40: 6001–6008.
Ma X Z, Wang X P. Root architecture and adaptive strategy of two desert plants in the Alxa Plateau. *Acta Ecol Sin*, 2020, 40: 6001–6008 (in Chinese with English abstract).
- [8] 王义琴,张慧娟,白克智,孙勇如.分形几何在植物根系研究中的应用.自然杂志,1999,21(3): 143–146.
Wang Y Q, Zhang H J, Bai K Z, Sun Y R. Application of fractal geometry to the study of plant roots. *J Nat Chin*, 1999, 21(3): 143–146 (in Chinese with English abstract).
- [9] Dannowski M, Block A. Fractal geometry and root system structures of heterogeneous plant communities. *Plant Soil*, 2005, 272: 61–76.
- [10] Fernandez-Martinez M, Sanchez-Granero M A. Fractal dimension for fractal structures. *Topology Appl*, 2014, 163: 93–111.
- [11] Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature. *Am J Phys*, 1983, 51: 286–286.
- [12] Costa C, Dwyer L M, Dutilleul P. Morphology, and fractal dimension of root systems of maize hybrids bearing the leafy trait. *Can J Bot*, 2003, 81: 706–713.

- [13] 汪洪, 金继运, 山内章. 以盒维数法分析水稻根系形态特征及初探其与锌吸收积累的关系. 作物学报, 2008, 34: 1637–1643.
Wang H, Jin J Y, Shan N Z. Fractal analysis of rice root morphological characteristics by box dimension method and its relationship with zinc absorption and accumulation were studied. *Acta Agron Sin*, 2008, 34: 1637–1643 (in Chinese with English abstract).
- [14] 陈绍民, 李明思, 高超, 赵宇龙, 郝忠文. 桶栽棉花根系构型的分形特征分析. 灌溉排水学报, 2015, 34(4): 75–79.
Chen S M, Li S M, Gao C, Zhao Y L, Hao Z W. Analysis of fractal characteristics of root architecture of barrel-cultivated cotton. *J Irrig Drain*, 2015, 34(4): 75–79 (in Chinese with English abstract).
- [15] 杨培岭, 任树梅, 罗远培. 分形曲线度量与根系形态的分形表征. 中国农业科学, 1999, 32: 89–92.
Yang P L, Ren S M, Luo Y P. Fractal curve metrics and fractal characterization of root morphology. *Sci Agric Sin*, 1999, 32: 89–92 (in Chinese with English abstract).
- [16] 陆大克, 段骅, 王维维, 刘明爽, 魏艳秋, 徐国伟. 不同干湿交替灌溉与氮肥形态耦合下水稻根系生长及功能差异. 植物营养与肥料学报, 2019, 25: 1362–1372.
Lu D K, Duan Y, Wang W W, Liu M S, Wei Q Y, Xu G W. Differences in root growth and function of rice under different dry-wet alternate irrigation and nitrogen fertilizer form coupling. *J Plant Nutr Fert*, 2019, 25: 1362–1372 (in Chinese with English abstract).
- [17] 张绍文, 何巧林, 王海月, 蒋明金, 李应洪, 严奉君, 杨志远, 孙永健, 郭翔, 马均. 控制灌溉条件下施氮量对杂交籼稻 F 优 498 氮素利用效率及产量的影响. 植物营养与肥料学报, 2018, 24: 82–94.
Zhang S W, He Q L, Wang H Y, Jiang M J, Li Y H, Yan F J, Yang Z Y, Sun Y J, Guo X, Ma J. Effects of nitrogen application rate on nitrogen use efficiency and yield of hybrid indica rice F you 498 under controlled irrigation conditions. *J Plant Nutr Fert*, 2018, 24: 82–94 (in Chinese with English abstract).
- [18] 陈林, 郭庆人. 膜下滴灌水稻栽培技术的形成与发展. 作物研究, 2012, 26: 587–588.
Chen L, Guo Q R. The formation and development of rice cultivation techniques of drip irrigation under film. *Crop Res*, 2012, 26: 587–588 (in Chinese with English abstract).
- [19] Liu K, Li T, Chen Y, Huang J, Qiu Y, Li S, Wang H, Zhu A, Zhuo X, Yu F, Zhang H, Gu J, Liu L, Yang J. Effects of root morphology and physiology on the formation and regulation of large panicles in rice. *Field Crops Res*, 2020, 258, 107–146.
- [20] 陈吉虎, 余新晓, 有祥亮, 刘苹, 张长达, 谢港. 不同水分条件下银叶槭根系的分形特征. 中国水土保持科学, 2006, 4(2): 71–74.
Chen J H, Yu X Q, You X L, Liu P, Zhang C D, Xie G. Fractal characteristics of *Tilia temenos*'s root system under different water conditions. *Sci Soil Water Conserv*, 2006, 4(2): 71–74 (in Chinese with English abstract).
- [21] Wang H, Siopongco J, Wade L, Yamauchi A. Fractal analysis on root systems of rice plants in response to drought stress. *Environ Exp Bot*, 2009, 65: 338–344.
- [22] 王志军, 叶春秀, 董永梅, 李有忠, 田又升, 陈林, 孙国清, 谢宗铭. 滴灌和淹灌栽培模式下水稻光合生理、荧光参数及产量构成因素分析. 植物生理学报, 2016, 52: 723–735.
Wang Z J, Ye C X, Dong Y M, Li Y Z, Tian Y S, Chen L, Sun G Q, X Z M. Analysis of photosynthetic physiology, fluorescence parameters and yield components in rice under irrigated and flooded cultivation patterns. *Plant Physiol J*, 2016, 52: 723–735 (in Chinese with English abstract).
- [23] 李娜, 杨志远, 代邹, 孙永健, 徐徽, 何艳, 蒋明金, 严田蓉, 郭长春, 马均. 水氮管理对不同氮效率水稻根系性状、氮素吸收利用及产量的影响. 中国水稻科学, 2017, 31: 500–512.
Li N, Yang Z Y, Dai Z, Sun Y J, Xu H, He Y, Jiang M J, Yan T R, Guo C C, Ma J. Effects of water-nitrogen management on root traits, nitrogen accumulation and utilization and grain yield in rice with different nitrogen use efficiency. *Chin J Rice Sci*, 2017, 31: 500–512 (in Chinese with English abstract).
- [24] 刘磊, 宋娜娜, 齐晓丽, 崔克辉. 水稻根系特征与氮吸收利用效率关系的研究进展. 作物杂志, 2022, (1): 11–19.
Liu L, Song N N, Qi X L, Cui K H. Research progress on the relationship between rice root characteristics and nitrogen uptake and utilization efficiency. *J Crops*, 2022, (1): 11–19 (in Chinese with English abstract).
- [25] 王志军, 谢宗铭, 田又升, 陈林, 董永梅, 李有忠, 吕昭智. 膜下滴灌和淹灌两种栽培模式下水稻光合生理特性的研究. 中国水稻科学, 2015, 29(2): 150–158.

- Wang Z J, Xie Z M, Tian Y S, Chen L, Dong Y M, Li Y Z, Lyu Z Z. Study on Photosynthetic Physiological Characteristics of Rice under Drip Irrigation and Submerged Irrigation. *Chin J Rice Sci*, 2015, 29(2): 150–158 (in Chinese with English abstract).
- [26] 崔国贤, 沈其荣, 崔国清, 李良勇. 水稻旱作及对旱作环境的适应性研究进展. *作物研究*, 2001, (3): 70–76.
- Cui G X, Shen Q R, Cui G Q. Research progress on rice dry farming and its adaptability to dry farming environment. *Crop Res*, 2001, (3): 70–76 (in Chinese with English abstract).
- [27] 李丽, 陈林, 张婷婷, 银永安, 朱江艳, 赵双玲. 膜下滴灌对水稻根系形态及生理性状的影响. *排灌机械工程学报*, 2015, 33(6): 536–540.
- Li L, Chen L, Zhang T T, Yin Y A, Zhu J Y, Zhao S L. Effects of drip irrigation under film on root morphology and physiological traits of rice. *J Drain Irrig Machin Engin*, 2015, 33(6): 536–540 (in Chinese with English abstract).
- [28] 李婷婷, 冯钰枫, 朱安, 黄健, 汪浩, 李思宇, 刘昆, 彭如梦, 张宏路, 刘立军. 主要节水灌溉方式对水稻根系形态生理的影响. *中国水稻科学*, 2019, 33(4): 293–302.
- Li T T, Effects of main water-saving irrigation methods on morphological and physiological traits of rice roots. *China J Rice Sci*, 2019, 33(4): 293–302 (in Chinese with English abstract).
- [29] Xu G W, Lu D K, Wang H Z, Li Y J. Morphological and physiological traits of rice roots and their relationships to yield and nitrogen utilization as influenced by irrigation regime and nitrogen rate. *Agric Water Manage*, 2018, 203: 385–394.
- [30] Ranathunge K, Schreiber L, Bi Y M. Ammonium-induced architectural and anatomical changes with altered suberin and lignin levels significantly change water and solute permeabilities of rice (*Oryza sativa* L.) roots. *Planta*, 2016, 243: 231–49.
- [31] Carrijo D R, Lundy M E, Linquist B A. Rice yields and water use under alternate wetting and drying irrigation: A meta-analysis. *Field Crops Res*, 2017, 203: 173–180.
- [32] 王肖娟, 陈林, 王永强, 李丽, 朱江艳, 赵双玲, 刘小武, 李高华. 不同灌溉方式及施氮量对水稻生长和氮素利用效率的影响. *中国稻米*, 2017, 23(3): 88–91.
- Wang X J, Chen L, Wang Y Q, Li L, Zhu J Y, Zhao S L, Liu X W, Li G H. Effects of different irrigation methods and nitrogen application rates on rice growth and nitrogen use efficiency. *China Rice*, 2017, 23(3): 88–91 (in Chinese with English abstract).
- [33] 李明思, 刘洪光, 郑旭荣. 长期膜下滴灌农田土壤盐分时空变化. *农业工程学报*, 2012, 28(22): 82–87.
- Li M S, Liu H G, Zhen X R. Temporal and spatial variation of soil salinity in long-term mulched drip irrigation farmland. *Trans CSAE*, 2012, 28(22): 82–87 (in Chinese with English abstract).
- [34] 孙永健, 孙园园, 刘树金, 杨志远, 程洪彪, 贾现文, 马均. 水分管理和氮肥运筹对水稻养分吸收、转运及分配的影响. *作物学报*, 2011, 37: 2221–2232.
- Sun Y J, Sun Y Y, Liu S J, Yang Z Y, Cheng H B, Jia X W, Ma J. Effects of water management and nitrogen management on nutrient uptake, translocation, and distribution in rice. *Acta Agron Sin*, 2011, 37: 2221–2232 (in Chinese with English abstract).
- [35] 陈信信, 丁启朔, 李毅念, 薛金林, 何瑞银. 南方稻麦轮作系统下小麦根系的三维分形特征. *中国农业科学*, 2017, 50: 451–460.
- Chen X X, Ding Q S, Li Y N, Xue J L, He R Y. The three-dimensional fractal characteristics of wheat roots under rice-wheat rotation system in southern China. *Sci Agric Sin*, 2017, 50: 451–460 (in Chinese with English abstract).
- [36] 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.
- [37] Cabangon R J, Tuong T P, Castillo E G, Bao L X, Lu G A, Wang G H, Cui Y L, Bouman B A, Li Y H, Chen C D. Effect of irrigation method and N-fertilizer management on rice yield, water productivity and nutrient-use efficiencies in typical lowland rice conditions in China. *Paddy Water Environ*, 2004, 2: 195–206.