

《高产低甲烷排放粳稻品种鉴定技术规程》（征求意见稿）

编制说明

一、目的意义

在所有粮食作物中水稻的单位产量温室气体排放是最高的，是小麦和玉米的3倍以上。稻田温室气体排放主要以甲烷排放为主，约占90%。我国作为世界水稻主产国之一，稻田甲烷排放量占全球稻田甲烷排放量的21.9%。甲烷排放的多少主要是由水稻植株和稻田土壤环境决定，因此，在同等栽培条件下，选择高产低甲烷排放水稻品种，能显著减少农业温室气体的排放。

目前我国种植的水稻品种还没有考虑到温室气体排放因素，要筛选高产低甲烷排放的品种就需要通过全生育期监测甲烷的排放，筛选出高产低排放的水稻品种，耗时费力。该项目通过多年的重复试验，通过观测表观性状及简单易操作的检测指标，筛选高产低甲烷排放水稻品种，与传统的全生育期测定甲烷排放的方法相比，既能减轻劳动强度，又能快速筛选出高产甲烷低排放的水稻品种，提高鉴定筛选的效率。

二、任务来源

2022年，本团队承担了国家重点研发计划“稻田碳汇提升和甲烷减排技术研发与集成示范(2022YFD2300300)”的子任务“华东水旱轮作稻区丰产低碳品种筛选及配套栽培技术”，旨在明确华东水旱轮作区主栽粳稻品种间甲烷排放和产量特性的差异及其与植株主要性状和生理特性的关系，筛选出具有推广潜力的高产甲烷低排放粳稻品种，制定高产甲烷低排放粳稻品种筛选标准。

三、编制过程

按时间节点及工作进度简述编制过程。(主要叙述：资料收集、分析调研、试验验证、综述报告、技术经济论证过程，草拟文本，征求意见，技术审查等过程)

1. 成立起草小组

由江苏省农业科学院粮食作物研究所优良食味水稻育种团队提出标准起草的初步方案，组织团队成员王才林、张亚东、魏晓东、陈涛、赵庆勇、朱镇等为小组成员。起草小组成员共同讨论了该团体标准的编制任务、内容及要求，落实了工作分工和进度安排。

2. 起草阶段

起草小组根据团队提供的实验数据，通过充分的讨论进行分析整合，将编制任务按分工落实到人头分别展开起草工作，并在起草工作中互相衔接、互相沟通和查漏补缺，形成征求意见稿。

四、主要技术指标的确立

简述标准主要内容技术指标确定的依据(科研成果、数据来源、实践经验等)，包括实地调研、查阅资料、试验论证等。

(一) 编制原则

1. 标准制定与生产问题相结合原则

目前，我国不同稻区的主要水稻品种甲烷排放量的监测还不完善，为了实现农业温室气体的减排，推广高产低甲烷排放的水稻品种是大势所需。但目前还没有一套关于高产低甲烷排放水稻的鉴定方法，仅从甲烷排放量的监测来筛选，工作量巨大，很难在生产上推广应用。急需出台相关的技术标准指导育种工作者能够在大田中通过观测表观性状等简单易操作的指标步骤筛选出高产低甲烷排放水稻品种，减轻劳动强度，提高筛选效率。因此，编制组制定了该技术标准。

2. 标准制定与科学研究工作相结合原则

标准起草小组依托国家重点研发项目“稻田碳汇提升和甲烷减排技术研发与集成示范”，经过多年的试验和验证筛选出适合华东水旱轮作稻区种植的高产低甲烷排放粳稻品种，并根据筛选方法建立了一套能够快速筛选出高产低甲烷排放的粳稻品种。该标准中涉及的主要技术指标具有科学性和应用性。

3. 遵循可操作性强原则

本标准基于综合考虑水稻生育期和甲烷动态排放的规律，结合关键指标参数与甲烷排放的关系，确定高产低甲烷排放粳稻的筛选流程，提出了高产低甲烷排放粳稻品种筛选技术规范。

(二) 主要内容

《高产低甲烷排放粳稻品种鉴定技术规程》规定了高产低甲烷排放粳稻品种田间表观性状筛选指标、实验室内确定粳稻植株甲烷减排的综合评价指标等。适用于华东地区水旱轮作高产低甲烷排放粳稻品种的鉴定筛选。本标

准中涉及的主要技术指标、筛选条件、筛选技术等内容，在查阅文献资料、结合生产调研、田间试验和田间验证等的基础上，认真讨论和征集相关领域专家意见而确立的，具有严谨性、科学性和实用性。

1. 范围的确定

本标准选用华东地区水旱轮作区大面积推广的粳稻品种为研究对象，通过对粳稻品种甲烷排放量的检测和产量、植株形态性状和生理性状的测定，研明甲烷排放量与植株形态性状和生理性状的关系，在此基础上形成了本标准。因此，本标准适用于华东水旱轮作稻区高产低甲烷排放粳稻品种的鉴定筛选。

2. 规范性引用文件

GB 15618 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）

DB32/T 4715 水稻病虫害全程简约化绿色防控技术规程

3. 术语和定义

本标准对甲烷排放指数和高产低甲烷排放粳稻进行了解释和定义。

4. 标准指标性状的确定

4.1 筛选具体指标的确定

（1）选定不同类型粳稻品种对其全生育期甲烷排放和产量特性进行监测和统计。

实验于 2023、2024 年在江苏省南京市江苏省农业科学院国家水稻产业体系南京综合实验站进行，品种选择甬优 1540、南粳 5718、南粳 9108、常农粳 8 号、南粳 46、南粳 8911。每个品种设置 3 个重复，随机排列，每个小区面积 12.25m²，株行距 17 cm × 25 cm。5 月 9 日播种，水田育秧，6 月 12 日移栽，每穴栽 1 苗。基肥施 N-P₂O₅-K₂O 复合肥 450 t/hm²；分蘖肥施尿素 187.5 t/hm²，分 2 次施用，6 月 19 号施尿素 112.5 t/hm²，6 月 27 号施尿素 75 t/hm²；穗肥施 N-K₂O 复合肥 225 t/hm²，分别于 7 月 25 日(早熟品种南粳 9108、南粳 5718、甬优 1540)、8 月 5 日(晚熟品种常农粳 8 号、南粳 46、南粳 8911)施用。移栽后 12 天开始测定田间甲烷排放量，田间有水层时每 3 天测定一次，烤田期以及成熟期田间无水层时每 7 天测定一次。田间甲烷采集采用静态箱法，采集气体用 7890A(GC, Agilent 公司)气相色谱仪分析甲

烷浓度。

成熟期在每个小区分别收割 5 个单株，每个品种 15 个单株进行产量构成因素考察，收割整个小区进行产量实测，每个品种 3 个小区，将产量校准到标准含水量 14.5%。

分析发现，常农粳 8 号的有效穗最多，南粳 5718、南粳 46、南粳 8911、甬优 1540 有效穗无显著差异(表 1)。甬优 1540 每穗实粒数最多，其次为南粳 8911，常农粳 8 号每穗粒数最少，但结实率最高，为 96.43%。甬优 1540 结实率最低，为 83.25%。就千粒重而言，南粳 5718 千粒重最大，达到 31.71 g，甬优 1540 千粒重最低为 22.26 g，千粒重大小依次为南粳 5718>南粳 46>常农粳 8 号>南粳 9108>南粳 8911>甬优 1540。单株产量不同品种间也存在显著差异，甬优 1540 单株产量最高，为 54.22 g，南粳 9108 单株产量最低，为 40.05 g，单株产量高低依次为甬优 1540>南粳 5718>常农粳 8 号>南粳 8911>南粳 46>南粳 9108。由小区产量折合单产，甬优 1540 产量最高，达到 14.62 kg/hm²，南粳 9108 产量最低，为 10.46 kg/hm²，产量由高到低依次为甬优 1540>南粳 46>常农粳 8 号>南粳 8911>南粳 5718>南粳 9108。但 6 个品种的产量均在 9.75 kg/hm² 以上，均属于高产品种。

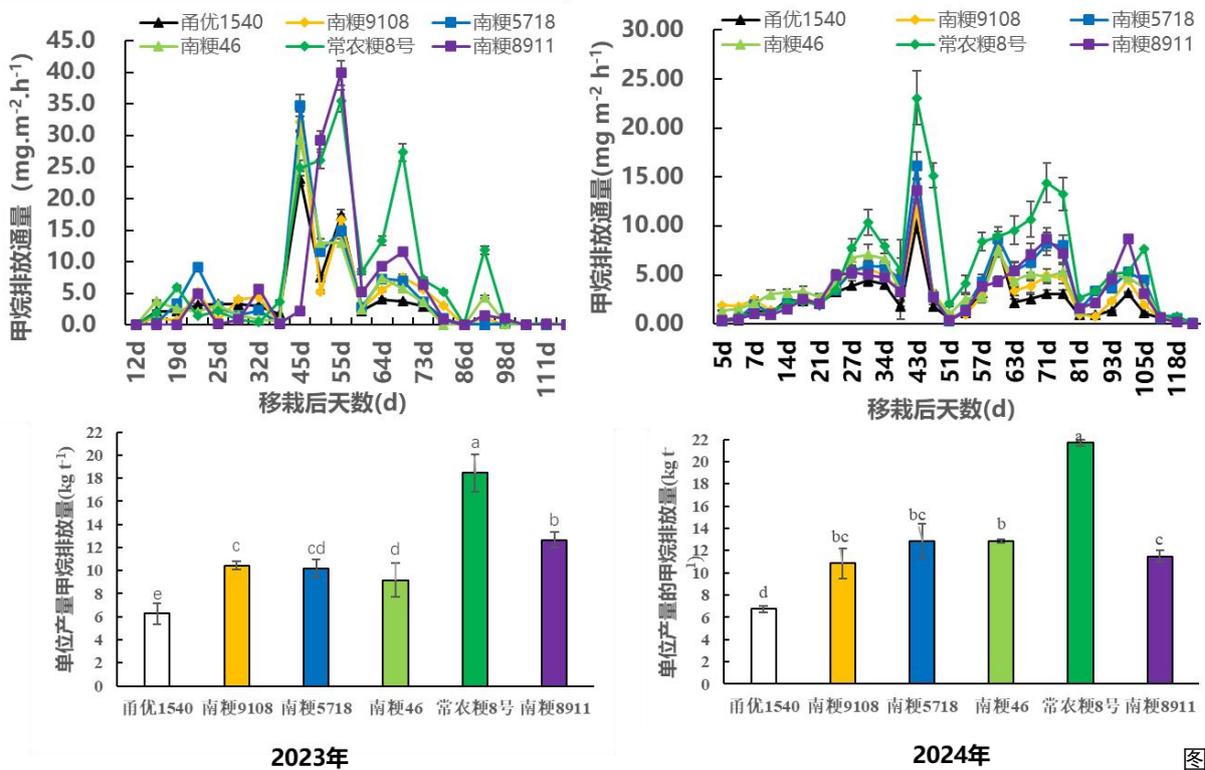
表 1 不同品种产量及其构成因子

为了保证实验的准确性，分别于 2023 年和 2024 年对不同水稻品种进行全生育期甲烷排放的监测。不同品种在整个生育的甲烷排放通量随着生育进程先升高后降低呈现一个单峰的趋势，且品种间具有显著的差异。甬优 1540、南粳 5718、南粳 9108、南粳 46 在移栽后 45 d 出现最大排放通量，常农粳 8 号、南粳 8911 在移栽后 55 d 出现最大排放通量(图 1)。甬优 1540 的最大排放通量为 23.12mg/m²/h,南粳 9108 最大排放通量为 32.12 mg/m²/h,南粳 5718

品种	单株穗数	每穗实粒数	结实率(%)	千粒重(g)	单株产量(g)	小区产量(kg)	折合单产(kg/hm ²)
甬优 1540	9c	264a	83.52 d	22.26 d	54.22 a	17.90 a	14.62 a
南粳 9108	10b	173c	93.36 bc	26.19 c	40.05 c	12.80 c	10.46 c
南粳 5718	9c	157d	93.51 bc	31.71 a	46.52 b	13.57 b	11.09 b
南粳 46	9c	143d	94.92 ab	28.79 b	41.71 c	14.25 b	11.64 b
常农粳 8 号	11c	137e	96.43 a	28.29 b	43.69 b	13.84 b	11.30 b
南粳 8911	9a	186b	92.27 c	25.14 c	41.72 c	13.72 b	11.20 b

最大排放通量为 34.71 mg/m²/h，南粳 46 最大排放通量为 29.37 mg/m²/h，常农粳 8 号的最大排放通量为 35.48 mg/m²/h，南粳 8911 最大排放通量为 39.91 mg/m²/h。

利用各个品种的排放通量计算出全生育期的排放总量，进而获得每个品种单位产量的甲烷排放量(图 1)。统计发现，常农粳 8 号的单位产量甲烷排放量在 2023 和 2024 年均最高，分别达到 18.45 kg/t 和 21.68 kg/t，而两年间甬优 1540 的单位产量甲烷排放量均最低，分别为 6.27 kg/t 和 6.73 kg/t。其他品种的单位产量排放量在二者之间。



1 不同品种的排放通量及单位产量的甲烷排放量

通过综合分析产量及其构成因子以及全生育期的排放总量和最高排放通量，以单位产量甲烷排放量低于常农粳 8 号该值的 40%作为高产低甲烷排放水稻，初步判定甬优 1540、南粳 5718、南粳 46、南粳 9108 为高产低甲烷排放水稻品种。

通过上述全生育期甲烷排放的监测，发现各品种在分蘖末期和孕穗至齐穗期分别有一个排放高峰，且排放高峰的趋势和总排放量趋势一致，因此最大排放通量的高低能够从侧面反应排放总量的高低，后期形态和生理指标的

测定，主要选择分蘖末期、孕穗期、齐穗期。

(2)对不同水稻品种的形态、生理关键指标(包括分蘖盛期的根系直径、根系通气组织面积、根系分泌物含量、根系氧化力、齐穗期茎秆髓腔直径)进行测定，并分析各项指标和甲烷排放以及产量的相关性，得出初步的筛选指标。

相关的形态和生理指标均在 2023、2024 年相同的生育期取样测定，田间水肥管理两年相同。

1. 根系形态

在水稻分蘖末期取样测定，以植株为中心挖取 20×20×20 cm 的带根土块，每个品种每小区 1 株，每株剪取 50 条根，采用根系扫描系统(WinRHIZO 根系分析系统)扫描根系直径，取三个小区的平均值作品种间比较。

从 2 年的结果可看出(图 2)，根直径最大的品种是甬优 1540，最小的品种是常农粳 8 号，南粳 9108、南粳 5718、南粳 46、南粳 8911 根直径处于二者之间，品种间无显著差异，南粳 5718、南粳 46、南粳 8911 根直径显著低于甬优 1540，2 年的结果趋势一致，且重复性较好。

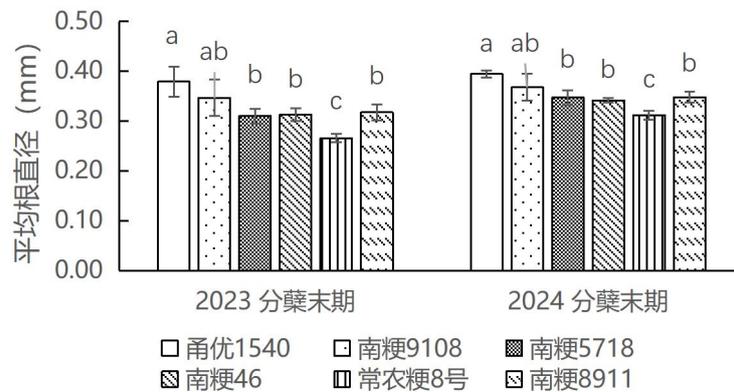


图 2. 2023 年和 2024 年不同品种的根系直径

2. 根系通气组织

在孕穗期分别选择长势一致植株，每小区选择 3 株，每品种 9 株，选择带有完整根尖的根系，距离根尖 2cm 处切取横截面，显微镜拍照，并利用软件(Image-Pro Plus6.0)统计通气组织面积和根横截面积，计算三个小区的平均值。

切片统计结果显示(图 3)，甬优 1540 通气组织面积的占比最大，常农粳 8 号通气组织面积占比最小，2 年的结果有一定差异。2024 年南粳 46、南粳

5718、南粳 8911 根系通气组织占比无显著差异，其中南粳 46、南粳 8911 根系通气组织占比显著高于常农粳 8 号。常农粳 8 号、南粳 9108、南粳 5718 通气组织间占比差异不显著。2023 年各个品种的差异不显著，甬优 1540 显著高于南粳 8911，和其他品种差异不显著。

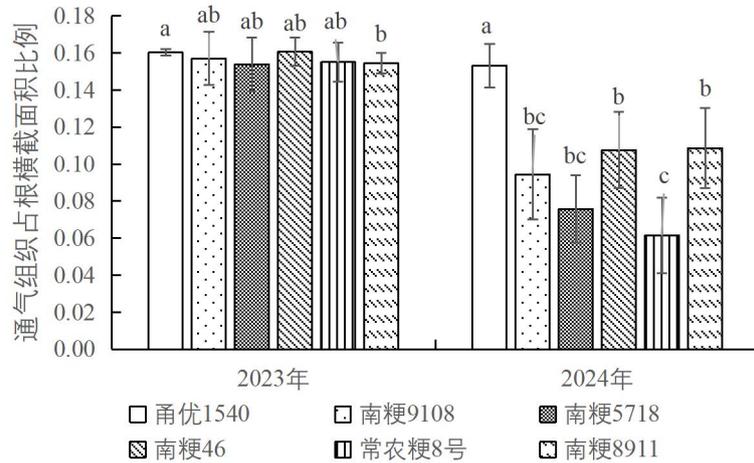


图 3. 不同品种根系通气组织横截面积占比

3. 不同水稻品种茎秆髓腔直径的比较

在齐穗期选择长势一致的植株，每品种 9 株(每小区 3 株)，选取主茎进行测定，每株测定主茎第一、第二、第三节间的髓腔直径，取三个小区的平均值作品种间比较。

节间髓腔的大小不仅是甲烷排放的通道也是氧气进入植株的通道。从 2 年的结果来看(图 4)，甬优 1540 的髓腔直径最大，常农粳 8 号髓腔直径最小，2 年的趋势基本一致。2024 年的结果显示，品种间差异较大，第一节间髓腔直径，甬优 1540、南粳 9108、南粳 5718、南粳 46 间无显著差异，但甬优 1540 髓腔直径最大，常农粳 8 号髓腔直径最小，南粳 8911 髓腔直径高于常农粳 8 号但低于甬优 1540、南粳 9108、南粳 46。第二节间和第三节间髓腔直径趋势一致，甬优 1540 髓腔直径最大，常农粳 8 号最小，其他品种髓腔直径大小在二者之间。

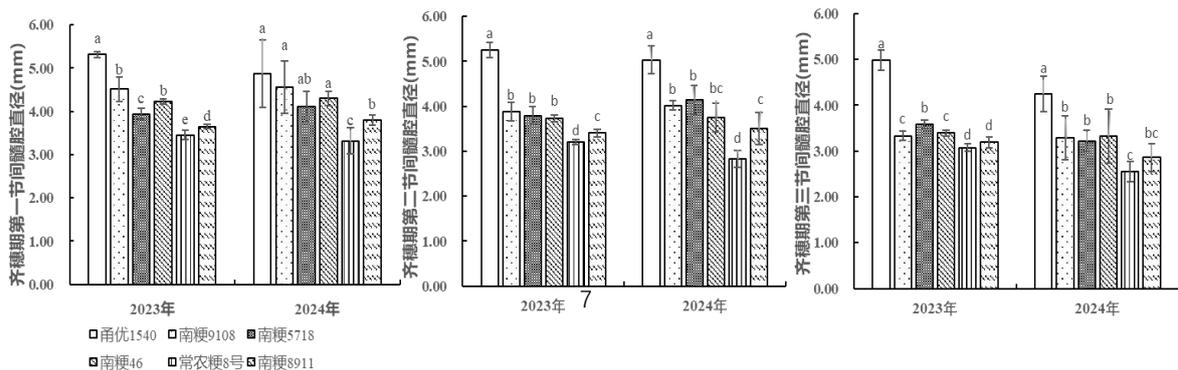


图 4. 不同品种节间髓腔直径

4. 不同水稻品种根系分泌物

在分蘖末期每品种取样 9 株(每小区 3 株)，挖取 20×20×20cm 的带根土块，洗净后将根系放入避光的去离子水中，植株在 3000 LEX 光照下培养 6h，过滤收集根系分泌物，并冷冻干燥成粉末，采用 HPLC 定量测定，上机前去离子水溶解过滤，取每个品种 3 个小区均值比较。

从 2 年的结果可看出甬优 1540 的苹果酸和琥珀酸含量均最低(图 5)，常农粳 8 号的苹果酸和琥珀酸含量均最高。南粳 5718 苹果酸含量介于二者之间，但高于其他南粳品种，2023 年南粳 5718 琥珀酸含量高于其他南粳品种，2024 年南粳 9108 琥珀酸含量高于其他南粳品种。

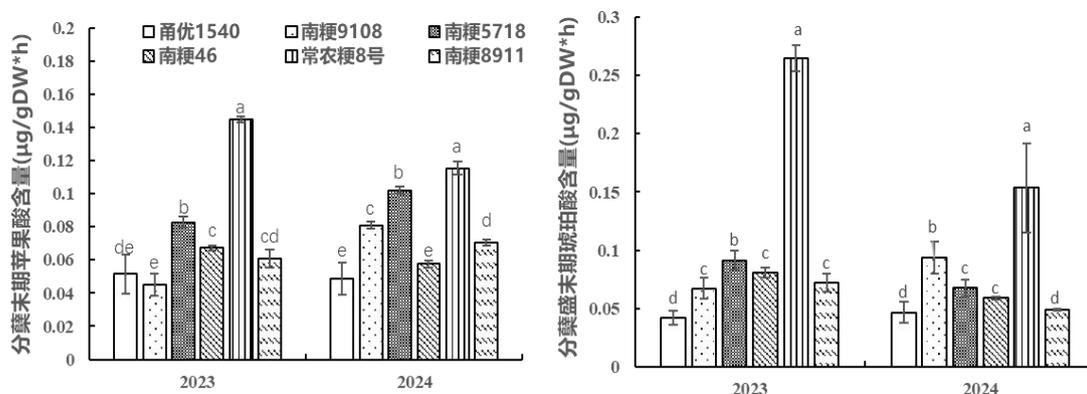


图 5. 不同品种的根系分泌物含量

5. 不同水稻品种根系氧化力

根系氧化力，在一定程度上能够反应植株根系在低氧环境下的氧化能力，氧化力越强的植株，其根际环境越利于减少甲烷的排放。在孕穗期选择长势一致的植株进行根系氧化力的测定，取每个小区植株 3 株，洗净根系后剪取同等重量的根系利用 α -萘胺法测定根系氧化力。

从 2 年的结果可看出(图 6)，根系氧化力最高的为甬优 1540，最低的为常农粳 8 号，其他品种的根系氧化力介于二者之间。其中，南粳 8911 的根

系氧化力低于其他的南粳品种。

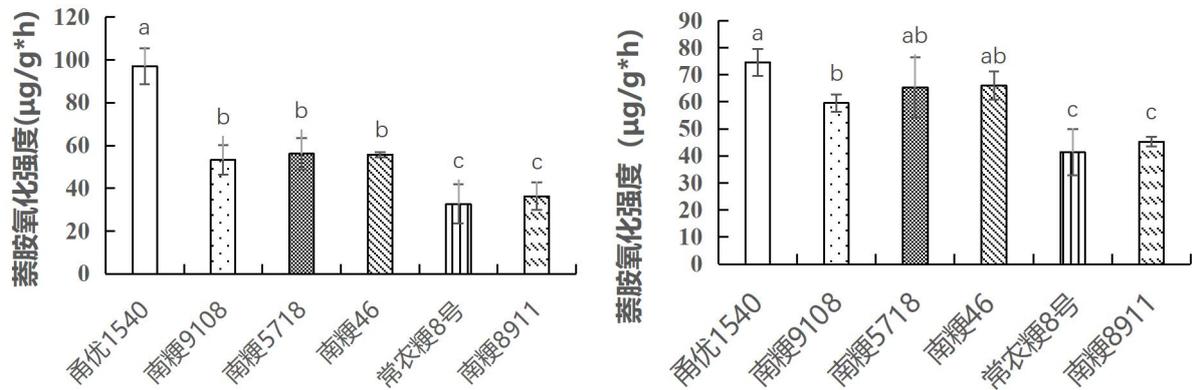


图 6. 不同品种根系氧化力

6. 各项指标与甲烷排放之间的关系

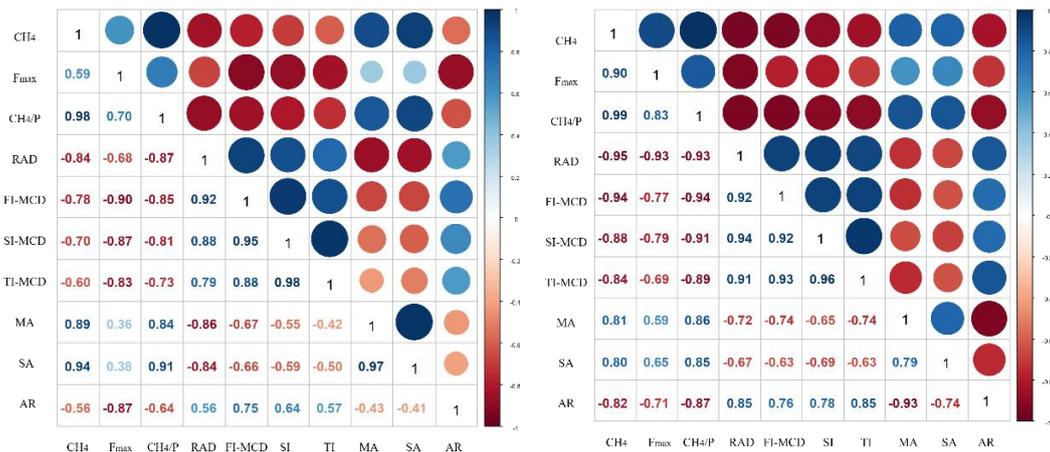


图 7. 2023、2024 年各项指标与甲烷排放的相关性分析

注:CH₄ 甲烷排放总量; F_{max} 最高甲烷排放通量; CH₄/P 单位产量甲烷排放量; RAD 根直径; FI-MCD、SI-MCD、TI-MCD 第一、第二、第三节间髓腔直径; MA 苹果酸; SA 琥珀酸; AR 根横截面通气组织面积占比

将上述性状 2 年测定值分别与甲烷排放总量, 最高甲烷排放通量, 单位产量的甲烷排放量进行相关性分析, 结果发现, 根系直径、第一节间髓腔直径、第二节间髓腔直径、第三节间髓腔直径、根系分泌物中苹果酸、琥珀酸含量和根系通气组织占横截面积的比例与单位产量甲烷排放量的关系最密切(图 7)。其中, 根系直径、根系通气组织占横截面积的比例、第一节间髓腔直径、第二节间髓腔直径、第三节间髓腔直径和甲烷排放呈现显著负相关关系, 根系分泌物中苹果酸、琥珀酸含量和甲烷排放呈现显著正相关关系。

因此，我们选定这些参数作为筛选甲烷低排放水稻的重要性状。

4.2 回归模型的构建

通过对 2 年的数据分析，一共得到 7 个和甲烷排放显著相关的性状，2024 年的数据较 2023 年的数据相关性更高，因此，选择 2024 年数据建立回归模型。由于样本数量只有 6 个，因此，我们首先对 7 个性状进行主成分分析，降低自变量的数量。根据主成分提取结果，以贡献率达到 95% 为主成分选择标准，由表 2 可知，前 3 个主成分(PC₁、PC₂、PC₃)的贡献率分别为 82.971%、9.513%和 4.347%，累计方差贡献率达到 96.83%，这表明主成分 PC₁、PC₂、PC₃ 能够代表所选显著相关性状 96.83% 的参数信息。

表 2 3 个主成分的特征值、贡献率和累计贡献率

主成分	初始特征值	方差贡献率 (%)	累积方差贡献率 (%)
PC ₁	5.808	82.971%	82.971%
PC ₂	0.666	9.513%	92.483%
PC ₃	0.304	4.347%	96.83%

根据所选择的主成分，由 SPSS 软件分析得到 7 个性状的主成分系数，由此计算 PC₁、PC₂、PC₃ 的得分。具体计算公式如下：
主成分得分：

$$PC1 = \sum_{i=1}^7 (a_i * x_i) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, 7);$$

$$PC2 = \sum_{i=1}^7 (a_i * x_i) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, 7);$$

$$PC3 = \sum_{i=1}^7 (a_i * x_i) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, 7);$$

PC₁、PC₂、PC₃ 为主成分得分， a_i 为主成分对应的成分系数（表 3）。 x_i 为 7 个性状标准化值。

$$x_i = (\text{每个性状值} - \text{该性状每品种均值}) / \text{该性状每品种数值的标准差}$$

表 3 3 个主成分的成分系数

性状	主成分 1	主成分 2	主成分 3
RAD	0.163	0.312	-0.024
FI-MCD	0.160	0.381	0.009
SI-MCD	1.161	0.437	-0.542
TI-MCD	0.164	0.349	0.239
MA	-0.150	0.630	-0.718
SA	-0.138	0.659	1.336
AR	0.160	-0.339	0.797

再以单位产量的甲烷排放量为因变量(Y, kg/t), 3 个主成分的得分 PC₁、PC₂、PC₃ 为变量进行线性回归分析, 得到回归方程:

$$Y=12.745-4.702PC_1+0.271PC_2+0.956PC_3, \text{ 决定系数 } R^2=0.976$$

4.3 回归方程的验证和筛选方法的最终确定

(1) 回归方程的验证

利用线性回归方程, 分别计算 2024 和 2023 年的 7 项性状指标的主成分的得分, 得到 3 个主成分 PC₁、PC₂、PC₃ 的值, 代入回归方程, 计算单位产量的排放量模拟值, 核对模拟值和实测值之间的误差范围, 验证回归方程的准确性。

表 4 2024 年模拟值和实测值

品种	PC ₁	PC ₂	PC ₃	模拟值	实测值	误差范围
甬优 1540	1.549	0.442	0.675	6.226	6.73	7.486%
南粳 9108	0.162	0.919	0.232	12.456	10.84	14.905%
南粳 5718	-0.212	0.700	-1.805	12.206	12.85	5.014%
南粳 46	0.203	-0.971	0.287	11.804	12.88	8.356%
常农粳 8 号	-1.572	0.437	1.001	21.210	21.68	2.168%
南粳 8911	-0.130	-1.528	-0.390	12.569	11.49	9.388%

由线性回归方程计算出 2024 年单位产量甲烷排放量的模拟值, 与实际全生育期甲烷排放量的误差在 2.168%~14.905%之间, 这说明, 利用该方法得到的线性回归方程具有较高的准确性。

同时, 对 2023 年测定的 7 个性状值, 利用回归方程计算单位产量的甲烷排放量, 得到实测值和模拟值的误差, 发现最大误差为 36.319%, 这个数值较 2024 年的误差要大, 但预测的单位产量甲烷排放量为 12.501 kg/t, 属于较低水平, 而高排放水稻常农粳 8 号的单位产量甲烷排放量预测值为 20.505 kg/t, 这 and 实际测定的趋势一致, 这表明, 利用回归方程预测单位产量的甲烷排放量的方法较可靠。

表 5 2023 年模拟值和实测值

品种	PC ₁	PC ₂	PC ₃	Y 模拟值 (kg/t)	Y 实测值 (kg/t)	误差范围
----	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	------

甬优 1540	1.5294029	1.3325598	-0.2048	5.7190822	6.27	8.786%
南粳 9108	0.318876	-0.574908	-0.0483	11.043666	10.44	5.782%
南粳 5718	-0.300015	0.0794182	-1.06539	13.15868	10.2	29.007%
南粳 46	0.1672304	-0.980894	0.844825	12.500513	9.17	36.319%
常农粳 8 号	-1.347722	1.1947028	1.150149	20.505295	18.45	11.139%
南粳 8911	-0.367771	-1.050885	-0.67649	13.542743	12.66	6.972%

为了便于应用，将 3 个主成分系数代入回归方程 $Y=12.745-4.702PC_1+0.271PC_2+0.956PC_3$ ，得到以 7 个性状值为变量的回归方程：

$$Y=30.748-25.436x_1-1.152x_2-1.580x_3-0.779x_4+7.385x_5+51.953x_6-2.579x_7$$

x_1 、 x_2 、 x_3 、 $\dots\dots x_7$ 分别为分蘖末期根系直径、齐穗期第一节间髓腔直径、第二节间髓腔直径、第三节间髓腔直径、分蘖末期根系分泌物中苹果酸、琥珀酸含量和孕穗期根系通气组织占横截面积的比例。

(2) 筛选方法的最终确定

在回归方程中，利用 7 个性状指标的 3 个主成分得分作为自变量，这些指标在 2 年的重复实验中均和甲烷排放显著相关，但根系活力作为影响甲烷排放主要的因素，并没有与甲烷的排放形成显著的相关性，而根系活力较高的品种通常甲烷排放量较低。由回归方程计算得到的 Y 值小于 15 的品种有甬优 1540、南粳 46、南粳 5718、南粳 9108、南粳 8911，通过 2 年全生育期筛甬优 1540、南粳 46、南粳 5718、南粳 9108 的单位产量甲烷排放量低于常农粳 8 号单位产量甲烷排放量的 40%，为低排放品种，因此，有必要增加孕穗期的根系活力作为筛选指标。根据 2 年的测定结果，甬优 1540、南粳 46、南粳 5718、南粳 9108 的根系活力均高于 50ug/g/h。于是，我们将根系活力均高于 50ug/g/h 作为高产低甲烷排放水稻品种的筛选指标。

此外，6 个品种的每亩产量都在 9.75 kg/hm² 以上。由此，确定高产低甲烷排放水稻的筛选方法为，在分蘖末期测定根系直径，根系分泌物琥珀酸和苹果酸的排放速率；在孕穗期测定根系通气组织面积，根系氧化力，齐穗期测定第一、第二、第三节间髓腔直径，并利用回归方程 $Y=30.748-25.436x_1-1.152x_2-1.58x_3-0.779x_4+7.385x_5+51.953x_6-2.579x_7$ 计算 Y 值，规定 Y 值小于 15，同时，产量在 9.75 kg/hm² 以上，孕穗期根系氧化力

大于 50ug/g/h 的品种为高产低甲烷排放水稻品种。

五、重大分歧意见的处理经过和依据

在标准编制过程中，征求了部分专业人员的意见，没有发现重大分歧意见。

六、与相关法律法规和国家标准的关系

本标准符合相关法律法规要求，目前国内尚未制定高产低甲烷排放水稻品种筛选标准。

七、实施推广建议

在新标准实施前，应加强宣贯，在相关育种单位和政府管理部门推广应用。

八、团体标准及涉及专利的说明

本标准的部分技术内容涉及专利，研发人员正在申报。