

水稻植株与 CH₄ 排放的相关因子及模糊聚类分析

傅志强¹, 黄 璜¹, 何保良¹, 谢 伟¹, 廖晓兰²

(1. 湖南农业大学农学院, 湖南 长沙 410128; 2. 湖南农业大学生物安全科学技术学院, 湖南 长沙 410128)

摘 要:通过对不同水稻品种甲烷排放量与水稻通气组织相关性分析,确定聚类指标,运用离差平方和聚类分析方法对水稻品种进行聚类,初步探讨了水稻植物学特性与甲烷排放的相关性。结果表明,早、晚稻不同水稻品种甲烷排放量与植株显著相关的指标是不同的。早稻品种植株第2节间茎秆维管束总面积、第2节间茎秆壁厚、第2节间叶鞘横切面积/节间横切面积、第2节间叶鞘气腔面积/叶鞘与茎秆横切面积之和4个指标与甲烷排放量呈显著相关关系。晚稻品种植株株高与茎秆长度、第3节间茎壁横切面积/节间横切面积、第3节间茎壁髓腔面积/节间横切面积、第3节间叶鞘横切面积/节间横切面积、第3节间叶鞘维管束面积/节间横切面积、第3节间叶鞘气腔面积/茎壁横切面积、第3节间茎秆维管束面积/茎秆横切面积8个数量指标与甲烷排放量都呈显著相关性。分别以上述相关因子为聚类指标,对早、晚稻品种进行聚类分析,都可分为甲烷排放量高、中、低3类,与实测结果吻合度分别为87.5%和90%。因此,所选指标作为水稻品种甲烷排放量等级聚类指标是可行的,为水稻品种甲烷排放量定性分析提供了实践及理论依据。本研究将为水稻品种甲烷排放量等级区分提供依据,为高产杂交稻、超级稻的育成与推广提供环境学支撑。

关键词:水稻品种; 甲烷; 相关因子; 模糊聚类; 分析

中图分类号:S181 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)01-0050-08

Related Factors of Methane Emission in Rice Plant and Fuzzy Cluster Analysis

FU Zhi-qiang¹, HUANG Huang¹, HE Bao-liang¹, XIE Wei¹, LIAO Xiao-lan²

(1. Agronomy College of Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Bio-Safety Science and Technology College of Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: Different biological characters of rice lead to differences in methane emission of rice cultivars from rice paddy field. The study is to primarily probe the correlation between methane emissions of rice varieties and rice botanical characters, as well as provide the basis for grade distinction of methane emission from cultivars and the environmental basis for breeding and promoting the high-yielding hybrid rice and super hybrid rice. The cluster indexes are determined and the rice cultivars are clustered using fuzzy cluster analysis, based on the correlations between methane emissions from different rice varieties and rice plant aerenchyma tissues. The results show that the significant correlation factors on methane emission between early and late rice plant are different. For early rice varieties, the significant correlation factors are the total area of stem wall vascular, the thickness of stem wall, the ratio of the transverse section area of leaf sheath to the transverse section area of internode, the ratio of the gas chambers area of leaf sheath to the transverse section area of internode, in the second internode. For late rice, plant height, stem length, the ratio of the vascular bundles area of inside culm to the area of stem wall, the ratio of the stem wall area to the transverse section area of internode, the ratio of the cross section area of leaf sheath to the transverse section area of internode, the ratio of vascular bundles area of leaf sheath to the transverse section area of leaf sheath, the ratio of total vascular bundles area to the stem wall area, the ratio of the gas chambers area of leaf sheath to the stem wall area of third internode, all are very significantly related with methane emissions from rice paddy field. Early or late rice cultivars could be divided into three levels, i.e. high, medium and low amount of methane emission by fuzzy cluster indices above mentioned. Compared the fuzzy cluster results with the test results, the consistent degrees for early and late rice cultivars are 87.5% and 90%, separately. The clustering result is basically consistent with the actual methane emissions of all varieties from rice paddy field. However, the correlation between the root aerenchyma system and methane emission is worth researched in the fu-

收稿日期: 2007-01-07

基金项目: “十一五”国家粮食丰产科技工程项目(2006BAD02A01); 国家 863 项目(2004AA115240)

作者简介: 傅志强(1968—), 男, 湖南涟源人, 博士生, 主要从事农业生态及作物生态信息研究。E-mail: fzq8222368@126.com

通讯作者: 黄 璜 E-mail: hh863@126.com

ture since the roots of rice are the main paths of methane emission from paddy field. Therefore, it is feasible to take the indicators as clustering index on methane emissions of rice cultivars.

Keywords: rice cultivar; methane; related factors; fuzzy cluster; analysis

研究证明,水稻植物体在稻田甲烷排放中起着重要作用。水稻植株体是稻田甲烷排放的主要通道,稻田甲烷排放量的 90%是由水稻植株通气组织排放到大气中的^[1-4];同时水稻植株通气组织是大气氧气进入根系的通道,对甲烷氧化起重要作用。不同季节、不同生育期水稻植株对甲烷排放作用是不同的。黄耀研究表明^[5],约 78%的甲烷是在水稻生殖生长期及灌浆成熟期内排放的,水稻生长中、后期物质生产对甲烷排放的贡献大于前期。另外,水稻根系活力、根分泌物影响根际微区域土壤甲烷的产生和氧化。不同水稻品种甲烷排放量存在很大差异^[6-12,18]。在同样的生产环境和管理条件下,品种间甲烷排放量差异主要原因在于水稻植株的生物学特性上的差异。前人重点研究了水稻根系、株高对甲烷排放的影响^[13-16],而对于水稻植株内部通气组织与甲烷排放的相关性研究很少。特别是在水稻高产研究背景下,高产品种层出不穷,高产杂交稻、超级稻品种育成与推广已成为代表我国农业科学研究和生产发展方向的典型。相关研究证实,水稻高产与水稻植株通气组织密切相关,特别是穗颈节间维管束数与穗颖花数显著相关^[19]。因此,对水稻植株通气组织与甲烷排放的相关性研究有助于对高产水稻品种甲烷排放进行定性分析。

模糊聚类分析在农业生产领域及模式识别、数据挖掘、计算机视觉以及模糊控制等计算机领域具有广泛的应用,也是近年来得到迅速发展的一个研究热点。模糊聚类分析广泛应用于农业领域,一方面是农业生产实践活动中存在大量的不确定性、模糊现象;另一方面,模糊聚类分析为解决分类中模糊性现象提供了实用的工具^[7]。不同水稻品种甲烷排放受到植株内部众多不确定性因素的影响。

本文通过研究不同水稻品种甲烷排放量与水稻植株植物学特性间的相关性,筛选出与甲烷排放量关系密切的植物学特性,运用模糊聚类分析方法,可把水稻品种区分为甲烷排放量高、中、低不同等级。再与各品种甲烷排放量实测结果相比较,用以证实所选聚类指标的准确性和模糊聚类分析方法的实用性。本研究的目的在于初步探讨水稻植物学特性与甲烷排放的相关性以及为水稻品种甲烷排放量等级区分提供依据,为高产杂交稻、超级稻的栽培、育种、推广提供

环境学支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

供试水稻品种 36 个,可分为 4 种类型:①常规早稻组合 8 个:广陆矮 4 号,湘早籼 17 号,郴早糯 1 号,89-282,中早 4 号,湘早籼 12 号,铁谷早,湘早籼 31 号;②杂交早稻组合 8 个:株两优 99,八两优 96,金优 706,威优 402,金优 402,1 优 974,金优 160,金优 974;③常规晚稻组合 7 个:湘晚籼 12 号,湘晚籼 13 号,余赤 231-8,湘晚籼 5 号,湘晚籼 6 号,香粳 2 号,辽粳 5 号;④杂交晚稻组合 13 个:威优 46,金优 647,金优 207,金优桂 99,汕优桂 99,威优 644,新香优 80,T 优 259,威优 77,T 优 198,威优 191,威优 288,金优 191。

1.2 方法

1.2.1 试验设计

2005 年早、晚稻试验都在湖南农业大学农学院水稻试验基地同一田块进行,面积 667 m²。早、晚稻品种试验均采用随机区组排列。重点考察了 16 个品种,即早稻 4 个常规品种湘早籼 12 号,89-282,湘早籼 31 号,广陆矮 4 号;4 个杂交稻品种八两优 96,金优 706,1 优 974,金优 160;晚稻 4 个常规稻品种余赤 231-8,湘晚籼 12 号,香粳 2 号,辽粳 5 号;4 个杂交稻品种威优 644,新香优 80,T 优 259,汕优桂 99,设置了 3 次重复。其余品种随机排列。早稻共设小区 32 个小区,晚稻设 36 个小区,每个小区面积 1.8 m×10 m,小区之间留有 50 cm 宽的过道。早稻栽植规格 16.5 cm×16.5 cm,晚稻 19.8 cm×16.5 cm。早稻于 4 月 27 日移栽,7 月 15 日收获;晚稻于 7 月 18 日移栽,10 月 20 日收获。试验田施氮素 120 kg·hm⁻²,施 P₂O₅ 70 kg·hm⁻²,施 K₂O 90 kg·hm⁻²。早稻田保持浅层淹水状态,晚稻田 9 月 28 日到收获田中无水层。早、晚稻在移栽时,在每个小区设置一个甲烷气体采样点,将正方形铝制回型框底座(52 cm×52 cm,10 cm 高)固定于取样点上。

1.2.2 观测指标

CH₄ 取样与测定:CH₄ 采样采用静止箱技术,箱底面积 51 cm×51 cm,高 100 cm。从水稻返青期开始,

每隔 5 d 在同一地点测定各品种甲烷排放通量。甲烷气体取样时,将取样箱轻放在回型框上,回型框水槽内的水保证取样箱扣入时起到箱内外气体隔绝的水封作用。对设置了 3 次重复的 16 个品种进行了全天观测。从上午 8:00 开始,到下午 6:30 结束,每隔 2 h,从取样箱中以 10 min 为时间间隔进行连续 4 次抽样。其余品种,上午 8:00-10:00,下午 6:00-8:00 各取样一次^[8],以两次测定的甲烷排放通量的平均值作为该天的甲烷排放通量。取样方法见参考文献[19-22],甲烷气体样品测定方法见文献[23],排放通量计算方法见文献[19]。

植株通气组织观测:于齐穗期选取生长良好的 5 蔸水稻,从中选取主茎与分蘖各 5 根,共 10 根植株,测定株高、茎秆长度、地上部第 1 至第 5 节间(穗颈节间为第 1 节间)直径、维管束与气腔数量与大小以及茎秆、叶鞘壁厚。维管束指叶鞘及茎秆中的大维管束;茎秆部分指茎壁中除去叶鞘的部分。测定及计算方法见参考文献[16]。

1.2.3 模糊聚类分析

模糊聚类分析是用相似性尺度来衡量事物之间的亲疏程度,并以此实现分类。首先确定分类对象及样本数据标准化,使每一指标值归属于某种共同的数据特性范围;确定聚类指标(变量)间的关系,可以使用距离法和相似系数法。距离法中用距离表示点与点之间的关系,并根据距离进行分类,即将距离较近的点归为一类,而将距离较远的点归为不同的类。确定了指标(变量)间的距离或相似系数后,就可以应用系统聚类法、调优法或图论法进行聚类^[24]。

不同水稻品种甲烷排放量差异很大,设想可以将水稻品种按甲烷排放量高低分为高、中、低 3 个等级,

对水稻品种甲烷排放能力进行定性分析。其中,关键在于聚类指标的选取和聚类方法的运用。通过比较分析,本文采用系统聚类法中的欧氏距离-离差平方和法是比较恰当的。将各品种测得的与 CH₄ 排放显著相关的指标数据构成原始数据矩阵,对原始数据进行标准化变换处理后,利用欧氏距离计算各品种间的距离,根据离差平方和法,按适当的阈值进行聚类。

1.2.4 数据分析与处理

数据计算、分析与处理以及模糊聚类采用 Excel 和 DPS3.01 统计软件进行。

2 结果与分析

2.1 水稻品种 CH₄ 排放量及其与植株节间组织相关性分析

早、晚两季稻田甲烷排放的季节变化见图 1、图 2。由图 1 可知,早稻期间甲烷排放通量随水稻生育期的进程以及气温的升高而表现出递增趋势。3 个水稻品种均在孕穗~抽穗期达到最大值,尔后开始下降,在水稻成熟期又有一个上升的过程。3 个水稻品种在水稻生育前期,甲烷排放通量差异程度不大,八两优 96 为最小,而在生长中、后期相差很大。抽穗到成熟阶段,湘早籼 12 号、广陆矮 4 号以及八两优 96 的 CH₄ 排放通量均值分别为 17.2, 13.61, 12.73 mg·m⁻²·h⁻¹。由图 2 可知晚稻期间,水稻生长前期甲烷排放通量即达到最大值,生长中后期甲烷排放通量一直呈下降态势。特别是黄熟期,甲烷排放通量均在 2~4 mg·m⁻²·h⁻¹ 左右。3 个水稻品种全生育期甲烷排放通量均值比较,余赤 231-8(9.08 mg·m⁻²·h⁻¹)>汕优桂 99(7.39 mg·m⁻²·h⁻¹)>新香优 80(6.59 mg·m⁻²·h⁻¹)。早稻期间甲烷排放变化模式与水稻生长发育、气温变化密切相关。晚

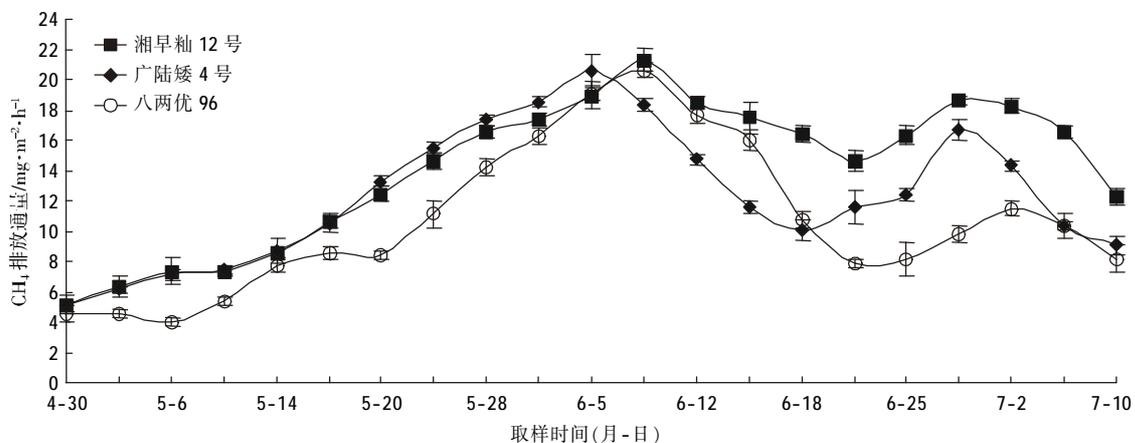


图 1 2005 年早稻 CH₄ 排放季节变化

Figure 1 Seasonal variation pattern of methane emission from early rice paddy in 2005

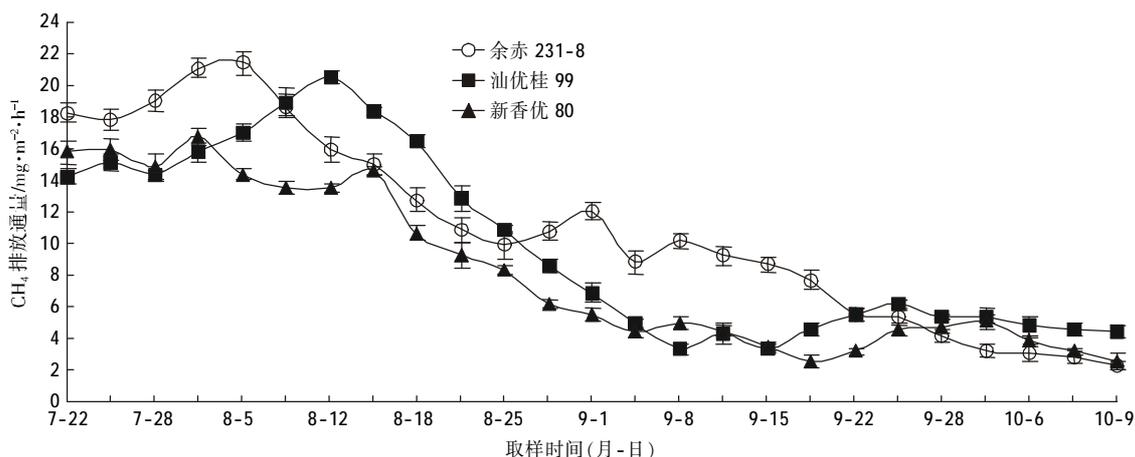


图 2 2005 年晚稻 CH₄ 排放季节变化

Figure 2 Seasonal variation pattern of methane emission from late rice paddy in 2005

稻甲烷排放季节变化模式主要与生长前期气温高、后期低,生长前期稻田土壤中有有机质丰富以及水管理等因素有关。

通过对设置了 3 次重复的早、晚各 8 个品种的甲烷排放量进行差异显著性方差分析,结果表明早、晚稻各品种间甲烷排放量差异极显著(表 1,2)。对早、晚各 8 个品种甲烷排放量进行了多重比较,个别品种间差异不显著,早稻品种中八两优 96 与金优 160,晚稻品种中湘晚粳 12 号与新香优 80,香粳 2 号与威优 644,辽粳 5 号与 T 优 259 之间差异不显著,其余品种间差异显著(表 3)。16 个早稻品种之间、20 个晚稻品种之间甲烷排放量差异很大(表 3)。这种差异不仅存在于同类型品种间以及杂交稻与常规稻之间,也存在于早季与晚季品种间。36 个品种甲烷排放量最大的

是常规早稻湘早粳 12 号,是常规早稻铁谷早的 1.32 倍,是杂交早稻金优 160 的 1.46 倍。晚稻余赤 231-8 是常规晚稻辽粳 5 号的 1.35 倍,是杂交晚稻甲烷排放量最低的品种新香优 80 的 1.38 倍。早、晚稻常规稻平均值分别高出杂交稻 3.66 g·m⁻²、0.68 g·m⁻²;杂交早稻甲烷排放量较常规早稻降低了 18.4%,杂交晚稻比常规晚稻减少了 3.1%。早稻甲烷排放量高于晚稻,其中常规早稻品种比晚稻高 8.01 g·m⁻²,杂交早稻比晚稻高 5.03 g·m⁻²。

早、晚 36 个品种,在齐穗期选取生长良好的水稻植株 5 蔸,在 5 蔸中选取生长正常的植株主茎和分蘖各 5 根,观测地上部各节间的通气组织(穗颈节间为第 1 节间)。观测了 11 个指标以及部分指标比值:株高,茎秆长度,各节间直径,茎秆及叶鞘壁厚,茎秆及叶鞘维管束数与大小,叶鞘气腔数与大小,茎秆维管束面积/茎壁面积,茎壁面积/节间面积,叶鞘横切面积/节间横切面积,叶鞘维管束面积/叶鞘横切面积,气腔面积/茎壁面积,维管束总面积/茎壁面积。重点考察了早、晚 16 个品种(常规早、晚,杂交早、晚各 4 个),分别对早、晚各 8 个品种上述指标与其甲烷排放量进行相关系数计算并对相关程度进行 t 检验。结果发现,早稻品种植株与甲烷排放量关联程度密切的指标有第 2 节间茎秆维管束总面积、第 2 节间茎秆壁厚、第 2 节间叶鞘横切面积/节间横切面积、第 2 节间叶鞘气腔面积/叶鞘与茎秆横切面积之和 4 个指标,4 个指标与甲烷排放量呈显著相关关系(表 4)。从表 5 可知,晚稻植株株高、茎秆长度以及植株第 3 节间 6 个数量指标与 CH₄ 排放量均呈显著相关,其中株高与 CH₄ 排放量相关性达到 0.001 显著性水平,第 3 节间

表 1 早稻品种甲烷排放量方差分析

Table 1 Analysis of variance on methane emission from early rice varieties

变异来源	平方和	自由度	均方	F 值	显著水平
区组间	0.017 5	2	0.008 7	0.38	0.690 8
处理间	279.598 5	7	39.942 6	1 733.943	0
误差	0.322 5	14	0.023		
总变异	279.938 5	23			

表 2 晚稻品种甲烷排放量方差分析

Table 2 Analysis of variance on methane emission from late rice varieties

变异来源	平方和	自由度	均方	F 值	显著水平
区组间	0.09	2	0.045	2.032	0.167 9
处理间	64.966 7	7	9.281	419.139	0
误差	0.31	14	0.022 1		
总变异	65.366 7	23			

表 3 2005 年早、晚各品种甲烷排放量(g·m⁻²)Table 3 The amount of methane emission in different cultivars from rice paddy field during early-late rice seasons in 2005(g·m⁻²)

季别	品种名称	移栽~拔节	拔节~抽穗	抽穗~成熟	甲烷排放总量	品种名称	移栽~拔节	拔节~抽穗	抽穗~成熟	甲烷排放总量
早稻	湘早籼 12 号	5.4bB	11.67aA	11.07aA	28.14aA	八两优 96	4.72dB	8.27cC	6.32dD	19.31gE
	89-282	6.91aA	9.72bB	10.97aA	27.6bA	金优 706	5.31bcB	8.3cC	7.28cC	20.88eD
	湘早籼 31 号	7.42aA	10.95aA	6.95cC	25.33cB	1 优 974	4.73cdB	8.05cC	7.35cC	20.14fDE
	广陆矮 4 号	5.16bcdB	7.97cC	9.18bB	22.31dC	金优 160	5.15bcdB	7.90cC	6.28dD	19.32gE
	郴早糯 1 号	4.11	8.79	6.93	19.83	株两优 99	5.1	8.3	7.25	20.65
	湘早籼 17 号	4.8	9.94	7.39	22.12	威优 402	5.25	6.77	5.9	17.92
	中早 4 号	5.15	9.43	7.62	22.21	金优 402	5.07	8.36	7.26	20.7
	铁谷早	6.96	7.59	6.71	21.26	金优 974	5.58	9.46	5.54	20.58
	均值	5.74	9.51	8.35	23.60	均值	5.11	8.18	6.65	19.94
	极差	3.31	4.08	4.36	8.31	极差	0.86	2.69	1.81	2.96
晚稻	余赤 231-8	6.06bB	9.84aA	2.62dDE	18.53aA	汕优桂 99	5.97bB	5.05eD	4.06aA	15.09cC
	湘晚籼 12 号	5.27cdC	5.89cBC	2.52dE	13.68eE	威优 644	5.41cC	5.73cdBC	3.2bBC	14.34dD
	香粳 2 号	6.10bB	5.71cdBCD	2.76cdCDE	14.57dD	新香优 80	4.99dC	5.32deCD	3.14bcCD	13.45eE
	辽粳 5 号	7.36aA	5.65cdCD	3.76aAB	16.76bB	T 优 259	7.15aA	6.37bB	3.04bcCDE	16.56bB
	湘晚籼 5 号	7.34	5.46	2.91	15.72	威优 191	6.16	6.34	3.03	15.53
	湘晚籼 13 号	6.58	5.65	2.06	14.28	金优桂 99	5.6	6.69	3.26	15.55
	湘晚籼 6 号	4.62	7.69	3.27	15.59	威优 46	5.67	6.96	3.31	15.93
						T 优 198	6.57	5.73	3.23	15.53
						金优 207	4.58	6.74	2.07	13.38
						威优 77	5.19	6.61	2.64	14.44
						威优 288	6.23	6.67	2.01	14.92
						金优 191	5.32	6.63	2.5	14.45
						金优 647	5.02	6.24	3.44	14.7
	均值	6.19	6.56	2.84	15.59	均值	5.68	6.24	2.99	14.91
极差	2.74	4.38	1.7	4.85	极差	2.57	1.91	2.05	3.18	

注:以上数据均为 3 次重复数据的平均值,表中不同小写字母表示差异达 0.05 显著水平,不同大写字母表示差异达 0.01 显著水平。

表 4 以早稻 CH₄ 排放量作为依变量(Y)的回归系数及方差分析Table 4 The regression coefficient for CH₄ emission from early paddy field and variance analysis

自变量	回归方程	回归样本数	离回归平方和	均方比值 F	r 值	T 值	显著水平
第 2 节间茎秆维管束总面积	Y=63.604 7X-1.403 10	8	51.816 4	7.512 7	0.745 6	2.741 0	*
第 2 节间茎秆壁厚	Y=46.148 6X+3.158 0	8	60.105 1	10.901 9	0.803 3	3.303 5	*
第 2 节间叶鞘横切面积/节间横切面积	Y=123.848 7X-7.123 0	8	63.631 8	12.912 4	0.826 3	3.593 4	**
第 2 节间叶鞘气腔面积/叶鞘与茎秆横切面积之和	Y=186.068 6X-11.330 0	8	71.804 3	20.150 6	0.877 8	5.180 2	**

注: $t_{0.05}=2.365$; $t_{0.01}=3.499$; $t_{0.001}=5.408$; *, **, *** 分别表示相关性达到 0.05、0.01、0.001 显著性水平。下表同。

表 5 晚稻 CH₄ 排放量作为依变量(Y)的回归系数及方差分析Table 5 The regression coefficient for CH₄ emission from late rice field and variance analysis

自变量	回归方程	回归样本数	离回归平方和	均方比值 F	r 值	T 值	显著水平
株高	Y=0.386 8X-20.204 7	8	18.663 2	37.421 3	0.928 3	6.117 2	***
茎秆长度	Y=0.349 4X-9.477 6	8	13.649 0	10.228 4	0.793 9	3.198 2	*
第 3 节间茎壁横切面积/节间横切面积	Y=28.977 7X+1.721 5	8	12.728 6	8.555 2	0.766 7	2.925 0	*
第 3 节间茎壁髓腔面积/节间横切面积	Y=-28.977 7X+30.699 2	8	12.728 6	8.555 2	-0.766 7	2.925 0	*
第 3 节间叶鞘横切面积/节间横切面积	Y=28.879 5X+9.595 3	8	15.588 2	15.415 0	0.848 4	3.926 1	**
第 3 节间叶鞘维管束面积/节间横切面积	Y=378.884 8X+8.698 4	8	11.309 3	6.558 5	0.722 7	2.561 0	*
第 3 节间叶鞘气腔面积/茎壁横切面积	Y=20.538 9X+11.025 2	8	12.386 9	8.018 6	0.756 3	2.831 8	*
第 3 节间茎秆维管束面积/茎秆横切面积	Y=66.968 6X+8.378 1	8	13.811 3	10.564 2	0.798 6	3.250 3	*

注: $t_{0.05}=2.365$; $t_{0.01}=3.499$ 。

叶鞘横切面积/节间横切面积与 CH_4 排放量相关性达到 0.01 显著性水平,其他 6 个数量指标与 CH_4 排放量相关性达到 0.05 显著性水平。

2.2 水稻品种甲烷排放模糊聚类分析

2.2.1 聚类指标选择

聚类指标的选取是模糊聚类分析的关键。分析观测得到的 11 个指标及其相关比值与甲烷排放量相关性,经相关程度 t 检验,得到了显著性相关因子见表 4、5。早、晚稻品种植株与甲烷排放显著相关因子是不同的。从表 4、5 中已知,早稻品种植株 4 个指标:第 2 节间茎秆维管束总面积、第 2 节间茎秆壁厚、第 2 节间叶鞘横切面积/节间横切面积、第 2 节间叶鞘气腔面积/叶鞘与茎秆横切面积之和;晚稻品种有 8 个指标:株高、茎秆长度、第 3 节间茎秆维管束面积/茎秆横切面积、第 3 节间茎壁横切面积/节间横切面积、第 3 节间叶鞘横切面积/节间横切面积、第 3 节间茎壁髓腔总面积/节间横切面积、第 3 节间叶鞘维管束面积/节间横切面积、第 3 节间叶鞘气腔面积/茎壁横切面积都与甲烷排放量显著相关,因此在对早、晚品种甲烷排放量进行聚类分析时分别采用上述指标作为聚类指标。按照模糊聚类分析步骤,先对数据进行标准变换,消除由于不同量纲造成的影响;然后根据欧氏距离公式计算距离系数,运用离差平方和法进行聚类分析。

2.2.2 聚类结果分析

以上述 4 个指标对早稻品种进行聚类,可以分成甲烷排放量高、中、低三类(表 6)。第 1 类,即甲烷排放量高的品种:89-282 椰早糯 1 号,中早 4 号,湘早糯 31 号,湘早糯 12 号, I 优 974, 甲烷排放量均值 $23.88 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$;第 2 类,即甲烷排放量中的品种:广陆矮 4 号,湘早糯 17 号,铁谷早,株两优 99, 甲烷排放量均值 $21.76 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$;第 3 类,即甲烷排放量低的品种:金优 706,威优 402, 八两优 96, 金优 402, 金优 160, 金优 974, 甲烷排放量均值 $19.78 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。早稻 16 个品种

中 2 个品种实测值与聚类结果不太相符。第 1 类中椰早糯 1 号甲烷排放量应属第 3 类,而归类为第 1 类;第 1 类中品种 I 优 974 甲烷排放量实测值较高,应归属于第 2 类。因此实测值与聚类结果吻合率为 87.5%。

以 8 个指标对晚稻品种进行聚类分析,可将晚稻品种分为 3 类。第 1 类为甲烷排放量高的品种:T 优 259,香粳 2 号,金优 647,金优桂 99,T 优 198,湘晚糯 13 号,余赤 231-8,湘晚糯 5 号,辽粳 5 号,湘晚糯 6 号,威优 191, 甲烷排放量均值 $15.77 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$;第 2 类为甲烷排放量中的品种:威优 46,威优 288,汕优桂 99,威优 644, 甲烷排放量均值 $15.07 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$;第 3 类为甲烷排放低的品种:新香优 80,金优 191,威优 77,湘晚糯 12 号,金优 207, 甲烷排放量均值 $13.48 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。20 个晚稻品种有 2 个品种实测值与聚类结果不太相符,即香粳 2 号($14.57 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$),应划归第 2 类,湘晚糯 13 号($14.28 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)可归属于第 3 类。因此实测值与聚类结果相吻合度为 90%。

3 结论与讨论

3.1 植株通气组织数量特征与甲烷排放量相关性

通过观测 36 个水稻品种地上部分 5 个节间 11 个数量性状,计算了 11 个数量性状及以节间横切面积为分母,以叶鞘横切面积、叶鞘维管束面积、茎秆维管束面积、茎秆横切面积、茎壁横切面积、维管束总面积为分子的比值。以茎壁面积为分母,以叶鞘横切面积、叶鞘维管束面积、茎秆维管束面积、茎秆横切面积、维管束总面积为分子的比值共计 11 个比值,分析了数量性状及比值与甲烷排放量之间的相关性,并对相关程度进行 t 检验。结果表明,早、晚稻植株与甲烷排放量的相关因子不同。早稻品种植株第 2 节间茎秆维管束总面积、第 2 节间茎秆壁厚、第 2 节间叶鞘横切面积/节间横切面积、第 2 节间叶鞘气腔面积/叶鞘与茎秆横切面积之和 4 个指标与甲烷排放量呈显著

表 6 早、晚稻品种聚类分析

Table 6 Cluster analysis on varieties of early-late rice

季别	类别	品种名称	甲烷排放量均值/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$
早稻	第 1 类	89-282, 椰早糯 1 号,中早 4 号,湘早糯 31 号,湘早糯 12 号,I 优 974	23.88
	第 2 类	广陆矮 4 号, 湘早糯 17 号, 铁谷早,株两优 99	21.76
	第 3 类	金优 706, 威优 402, 八两优 96, 金优 402, 金优 160, 金优 974	19.78
晚稻	第 1 类	T 优 259,香粳 2 号,金优 647,金优桂 99,T 优 198,湘晚糯 13 号, 余赤 231-8, 湘晚糯 5 号,辽粳 5 号, 湘晚糯 6 号,威优 191	15.77
	第 2 类	威优 46,威优 288,汕优桂 99,威优 644	15.07
	第 3 类	新香优 80, 金优 191, 威优 77, 湘晚糯 12 号,金优 207	13.48

相关关系。晚稻品种植株株高与茎秆长度、第 3 节间茎壁横切面积/节间横切面积、第 3 节间茎壁髓腔面积/节间横切面积、第 3 节间叶鞘横切面积/节间横切面积、第 3 节间叶鞘维管束面积/节间横切面积、第 3 节间叶鞘气腔面积/茎壁横切面积、第 3 节间茎秆维管束面积/茎秆横切面积, 8 个数量指标与甲烷排放量都呈显著相关性。

从本试验发现, 一般水稻植株地上部节间有 4~5 个, 而淹水稻田水面以上节间一般有 3 个节间。前人已经证明, 水稻植株内部甲烷浓度存在由下到上下降的规律^[1, 19]。因此下部节间可能对水稻甲烷排放影响更大。在本试验中, 重点考察了水稻植株的第 1 至第 3 节间(由上往下计算), 发现早稻品种第 2 节间中存在 4 个因子与之显著相关, 而第 1、2 节间相关因子少; 晚稻品种植株第 3 节间与其他节间比, 与甲烷排放量显著相关因子多。因此, 水稻植株通气组织与甲烷排放量之间明确存在一定的相关性, 这为培育高产低甲烷排放的水稻品种提供了依据。

3.2 模糊聚类指标的选择

按事物的相似程度或亲疏关系对事物进行分类的数学方法称为聚类分析。由于事物的分类往往具有模糊性, 因此采用模糊聚类方法通常更符合实际。稻

田甲烷排放量受到诸如气候条件、生产管理措施、稻田土壤、水稻品种等众多主客观因素的制约, 稻田甲烷排放存在明显的时空变化差异。在同一生产环境和管理措施条件下, 不同水稻品种甲烷排放量差异主要原因在于水稻植株本身。通过对水稻植株通气组织数量特征与甲烷排放量相关性分析, 从众多因素中筛选出与甲烷排放量呈极显著相关的主要影响因子, 确定为聚类指标。通过采用系统聚类分析方法对早稻品种、晚稻品种进行聚类, 都可以类分成 3 个等级, 即高、中、低。无论是早稻还是晚稻, 根据聚类结果与实测结果相比较, 同一性较高。高甲烷排放品种基本上分在第 1 类, 低甲烷排放量品种分在第 3 类, 个别品种出现了差异, 与聚类结果稍有偏差。早、晚稻品种聚类结果与实测结果吻合度分别为 87.5% 和 90%。因此, 模糊聚类分析方法应用于区分各品种甲烷排放量等级也是可行的。

3.3 为定性分析水稻品种甲烷排放量提供依据

本研究选用的品种包括了 4 种类型, 大部分品种是当前生产上的主栽品种。通过对早、晚共 36 个水稻品种植株通气组织数量特征观测和计算, 从中筛选出了适于类分品种甲烷排放量等级的聚类指标, 均值计算见表 7、8, 为今后估算水稻品种甲烷排放量高低提

表 7 早稻品种甲烷排放量等级区分

Table 7 Grades judgment of methane emission in early rice varieties

判断指标	甲烷排放量等级		
	高	中	低
第 2 节间茎秆维管束总面积/mm ²	0.404±0.085	0.453±0.063	0.361±0.021
第 2 节间茎秆壁厚/mm	0.454±0.047	0.459±0.056	0.368±0.031
第 2 节间叶鞘横切面积/节间横切面积	0.341±0.054	0.332±0.029	0.318±0.051
第 2 节间叶鞘气腔面积/叶鞘与茎秆横切面积之和	0.214±0.039	0.197±0.066	0.447±0.145
甲烷排放量/g·m ²	23.88±3.66	21.58±0.77	19.78±1.15

注: 以上数据均为 10 个数据的平均值±标准偏差。下表同。

表 8 晚稻品种甲烷排放量等级区分

Table 8 Grades judgment of methane emission in late rice varieties

判断指标	甲烷排放量等级		
	高	中	低
株高/cm	97.1±3.6	88.7±2.7	88.1±2.8
茎秆长度/cm	75.1±3.04	65.9±3.8	65.6±0.02
第 3 节间茎壁横切面积/节间横切面积	0.572±0.027	0.569±0.024	0.507±0.023
第 3 节间节间髓腔面积/节间横切面积	0.422±0.025	0.431±0.024	0.493±0.026
第 3 节间叶鞘维管束面积/叶鞘横切面积	0.385±0.030	0.370±0.044	0.308±0.002
第 3 节间叶鞘横切面积/节间横切面积	0.014±0.003	0.014±0.002	0.010±0.045
第 3 节间茎秆维管束面积/茎秆横切面积	0.320±0.064	0.287±0.059	0.274±0.014
第 3 节间叶鞘气腔面积/茎壁横切面积	0.113±0.016	0.113±0.013	0.087±0.527
甲烷排放量/g·m ²	15.77±1.19	15.07±0.66	13.48±0.53

供定性分析的依据。当然,本研究仅初步分析了水稻植株地上部分与甲烷排放的相关性,而未对根系与甲烷排放相关性进行分析,还有待于进一步研究,以形成完整的水稻通气系统与水稻品种甲烷排放相关性体系,为水稻品种甲烷排放量定性分析建立完整的评定指标体系。

参考文献:

- [1] 上官行健,王明星,陈德章,等. 稻田 CH_4 的传输[J]. 地球科学进展, 1993, 8(5): 13-22.
- [2] 贾仲君,蔡祖聪. 水稻植株对稻田甲烷排放的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 2049-2053.
- [3] Reiner Wassmann, Milkha S. Aulakh. The role of rice plants in regulating mechanisms of methane emissions[J]. Biol Fertil Soils, 2000, 31: 20-29.
- [4] Jia Z J, Cai Z C, Xu H, et al. Effect of rice plants on CH_4 production, transport, oxidation and emission in rice paddy soil[J]. Nutr Cycling Agroecosyst, 2002, 64: 87-94.
- [5] 王增远,徐雨昌,李震,等. 水稻品种对稻田甲烷排放的影响[J]. 作物学报, 1999, 25(4): 441-446.
- [6] Aulakh M S, Bodenbender J, Wassmann R, et al. Methane transport capacity of rice plants. II. Variations among different rice cultivars and relationship with morphological characteristics[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2000, 58: 367-375.
- [7] 段彬伍,卢婉芳,陈苇,等. 种植杂交稻对甲烷排放及土壤产甲烷菌的影响[J]. 农业环境保护, 1999, 18(5): 203-208.
- [8] 曹云英,朱庆森,郎有忠,等. 水稻品种及栽培措施对稻田甲烷排放的影响[J]. 江苏农业研究, 2000, 21(3): 22-27.
- [9] 黄耀, Ronald L Sass, Frank M Fisher. 水稻物质生产对稻田甲烷排放的影响[J]. 农业环境保护, 1999, 18(4): 150-15.
- [10] Butterbach-Bahl K, Papen Hand Rennenberg H. Impact of gas transport through rice cultivars on methane emission from rice paddy fields[J]. Plant Cell Environ, 1997, 20: 1175-1183.
- [11] Lindau C W, Bollich P K, DeLaune R D. Effect of rice variety on methane emission from Louisiana rice[J]. Agric Ecosyst Environ, 1995, 54: 109-114.
- [12] Singh S, Kashyap, Singh J S. Methane flux in relation to growth and phenology of a high yielding rice variety as affected by fertilization [J]. Plant Soil, 1998, 201: 157-161.
- [13] Milkha S Aulakh, Reiner Wassmann, Heinz Rennenberg. Methane transport capacity of twenty-two rice cultivars from five major Asian rice-growing countries[J]. Agriculture Environ, 2002, 91: 59-71.
- [14] Orapin Kerdchoechuen. Methane emission in four rice varieties as related to sugars and organic acids of roots and root exudates and biomass yield[J]. Agric Ecosyst Environ, 2005, 108: 155-163.
- [15] Ding A, Willis C R, Sass R L, et al. Methane emissions from rice fields: Effect of plant height among several rice cultivars [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1999, 13(4): 1045-1052.
- [16] 黄璜. 水稻穗颈节间组织与颖花数的关系[J]. 作物学报, 1998, 24(2): 193-200.
- [17] 傅志强,黄璜. 模糊集理论在农作物生产领域中应用进展[J]. 作物研究, 2003, 17(5): 328-331.
- [18] 邵可声,李震. 水稻品种以及施肥措施对稻田甲烷排放的影响[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1996, 32(4): 505-513.
- [19] 王明星. 中国稻田甲烷排放[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 47-49.
- [20] 邓晓,廖晓兰,黄璜. 稻-鸭复合生态系统产甲烷细菌数量[J]. 生态学报, 2004, 24(8): 1695-1699.
- [21] 黄璜,杨志辉,王华,等. 湿地稻-鸭 CH_4 排放规律[J]. 生态学报, 2003, 23(5): 929-934.
- [22] 甘德欣,黄璜,蒋廷杰,等. 免耕稻-鸭复合系统减少甲烷排放及其机理研究[J]. 农村生态环境, 2005, 21(2): 1-6.
- [23] 傅志强,黄璜,陈灿,等. 稻-鸭复合系统中灌水深度对甲烷排放的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学学报), 2006, 32(6): 632-636.
- [24] 贺仲雄. 模糊数学及其应用[M]. 天津: 天津科学出版社, 1985. 152-185.