

田 婷,张 青,蒋华伟,等. 水稻植株对稻田甲烷排放影响的研究进展[J]. 江苏农业科学,2017,45(20):28-31.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.20.006

# 水稻植株对稻田甲烷排放影响的研究进展

田 婷,张 青,蒋华伟,靖 晶,姜红卫,李 欣,江 君,徐 君

(江苏太湖地区农业科学研究所,江苏苏州 215155)

**摘要:**甲烷是大气中主要的温室气体之一,稻田是农业生态系统中甲烷的主要排放源,而水稻植株是影响稻田甲烷排放的重要因素,因此研究水稻植株对稻田甲烷排放的影响对于保护大气环境、缓解温室效应具有非常重要的意义。从植株根系对稻田甲烷排放的影响、植株生长特性对稻田甲烷排放的影响、水稻产量潜力与稻田甲烷排放差异3个方面,对国内外水稻植株对稻田甲烷排放的影响研究做了较为详细的综述,并对稻田甲烷排放研究进行了展望。

**关键词:**甲烷排放;水稻植株;稻田;根系;生长特性;产量潜力;超级稻

**中图分类号:** S181 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)20-0028-04

全球气候变暖问题已得到普遍关注,甲烷(CH<sub>4</sub>)是仅次于CO<sub>2</sub>的主要温室气体之一,对全球温室效应的贡献达到15%<sup>[1]</sup>。据估算,在100年的时间尺度上,CH<sub>4</sub>的全球增温潜势是CO<sub>2</sub>的25倍<sup>[2]</sup>。据相关资料显示,农业生态系统是整个生态系统甲烷气体的重要排放源<sup>[3]</sup>,而稻田在其中占有很大的比重。我国水稻种植面积约0.3亿hm<sup>2</sup>,占世界水稻种植面积的22%,居世界第2位。随着全球人口的不断增长,人类对稻米的需求必定以提高水稻单位面积产量为主要生产任务,需肥量与施肥量亦增大,这将导致全球稻田甲烷排放量存在不断增加的潜势。

稻田产生的甲烷主要有4条排放途径:通过水稻植株排放到大气中、通过水层气泡排放到大气中、溶解在水中、被甲烷氧化菌氧化。研究表明,在水稻生长周期中,大部分的甲烷是通过水稻植株排放到大气中的,因此水稻植株对稻田生态系统甲烷产生的整个过程起着至关重要的作用<sup>[4]</sup>。不同水稻品种随着生育期的变化,植株生理和形态特征都会发生明显的变化,进而影响稻田甲烷的产生与排放。本文重点从植株根系对稻田甲烷排放的影响、植株生长特性对稻田甲烷排放的影响、水稻产量潜力与稻田甲烷排放差异等3个方面对国内外相关研究进行综述。

## 1 水稻根系对稻田甲烷排放的影响

稻田甲烷是土壤中有有机质氧化还原体系的还原端。严格的厌氧环境和易降解的有机物质是稻田土壤甲烷产生的2个基本要素。水稻根系的呼吸作用,消耗了根系附近的大量氧气,使得土壤中氧化还原电位降低,促进了稻田土壤厌氧环境的形成;水稻植株根系产生的分泌物为根际厌氧微生物的活动提供了碳源和能源,促进了土壤中甲烷的产生<sup>[5]</sup>。

### 1.1 根系分泌物

水稻根系分泌物主要是碳水化合物,由有机酸和氨基酸

组成,易被土壤中的发酵细菌分解为二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、氢(H<sub>2</sub>)和醋酸盐等产甲烷基质。不同水稻品种产生根系分泌物的量和组成成分不同,产生甲烷的能力也不尽相同。林敏等认为,水稻根系能分泌多种有机酸、碳水化合物和氨基酸,4种不同水稻品种的根系分泌物组成和含量各不相同<sup>[6]</sup>。王大等在大气CO<sub>2</sub>浓度升高的条件下,采用水培法对水稻根系分泌物进行的研究认为,CH<sub>4</sub>排放量增加的一个可能原因是水稻根系分泌物总量以及甲酸、乙酸含量的增加,为产甲烷菌提供了更多的底物<sup>[7]</sup>。Wang等在温室条件下研究了3个水稻品种的甲烷排放速率,结果显示,传统的水稻品种Dular甲烷排放率最高,其次为品种IR72,品种IR65598甲烷排放率最低;甲烷排放率与土壤中溶解的甲烷有显著的相关性,进一步研究表明,甲烷排放率的差异是由土壤中产甲烷基质强度的不同所导致的,而根系分泌的碳水化合物则是产生甲烷的直接底物,其中水稻品种Dular根系分泌物的量和根系分泌物中有机碳的含量明显高于水稻品种IR72和IR65598<sup>[8]</sup>。Jia等研究认为,水稻在成熟期有较高的甲烷产生速率,清楚地表明,水稻植株根系分泌物是甲烷产生的主要来源<sup>[9]</sup>。

### 1.2 根系氧化能力

水稻植株对甲烷的氧化作用主要是由于水稻根系泌氧造成的植株根系周围的甲烷氧化。水稻根系泌氧是指植株通过通气组织将储存的氧气释放到根际的活动<sup>[10]</sup>。已有研究表明,不同品种水稻对甲烷的氧化能力和排放能力相差1倍以上<sup>[11]</sup>。不同品种水稻植株根系泌氧速率和植株对甲烷的排放能力差异很大,水稻根系泌氧速率不仅与植株内部氧浓度、根系生物量有关,还与植株细胞壁的通透性、通气组织的结构有很大关系<sup>[12]</sup>。刘依依等对8个品种水稻根系泌氧能力进行研究,结果表明,水稻品种间根系泌氧能力和根系通气组织的结构具有显著差异;水稻根系通气组织结构(空腔)的大小和形成通气组织的面积比例均与水稻根系泌氧能力正相关,通气组织越发达,根系泌氧能力越强<sup>[13]</sup>。不同水稻品种由于根系泌氧能力不同进而导致其对稻田土壤中甲烷的氧化能力不同。曹云英等研究不同品种水稻植株的甲烷传输速率认为,根氧化力不同是造成品种间甲烷传输速率不同的主要原因<sup>[14]</sup>。van der Gon等研究了4个水稻品种的根际甲烷氧化

收稿日期:2016-05-23

基金项目:江苏省苏州市科技计划(编号:SYN201528)。

作者简介:田 婷(1988—),女,江苏常州人,硕士,研究实习员,主要从事农业生态研究。E-mail:491016158@qq.com。

反应,结果表明,品种 Pokkali 具有较高的根际甲烷氧化能力,且水稻根际氧化能力的加强可以减少稻田甲烷的排放通量<sup>[15]</sup>。

水稻根系泌氧能够引起根际 pH 值的变化。pH 值是微生物代谢过程中的重要影响因素,其微小变化可以显著改变稻田的甲烷排放通量<sup>[16]</sup>。有研究表明,pH 值为 6.8~7.2 是甲烷产生的最佳阈值,当土壤 pH 值下降至 6.0 时,甲烷的产生将受到抑制<sup>[17]</sup>。Wang 等认为,甲烷产生率在 pH 值为 6.9~7.1 时达到高峰,高于或低于这个范围甲烷的产生率都会降低,而当 pH 值大于 8.75 或者小于 5.75 时,甲烷的产生完全被抑制<sup>[18]</sup>。

水稻根系泌氧还会引起根际氧化还原电位(Eh 值)的变化,根系氧化能力的增强,根际 Eh 值的上升,可抑制产 CH<sub>4</sub> 菌活性,同时增强 CH<sub>4</sub> 氧化菌活性,促进 CH<sub>4</sub> 的氧化,从而导致 CH<sub>4</sub> 排放通量减少。研究表明,只有当 Eh 值低于 -160~-150 mV 时,产甲烷微生物才开始活动并排放出甲烷;Eh 值低于这一数值时,甲烷排放量随着 Eh 值的下降而呈指数增加<sup>[18]</sup>。Fetzer 等研究认为,土壤 Eh 值高于 -150 mV 时,对甲烷产生的抑制作用是由于自由氧的存在引起的<sup>[19]</sup>。

### 1.3 根系生物学特性

目前有关水稻根系生物学特性对甲烷排放量影响的文献报道不一。徐雨昌等对 3 个水稻品种的甲烷排放量进行测定,结果显示,不同水稻品种稻田甲烷排放量明显不同,水稻根系大小是导致这种差异的主要原因,甲烷排放量低的水稻品种具有根系小、经济系数高的特点<sup>[20]</sup>。而王丽丽等研究认为,根系大、活力强的水稻品种有利于在降低稻田甲烷排放量的同时增加水稻产量<sup>[21-22]</sup>。傅志强等研究了不同水稻品种甲烷排放通量与根系特征的相关性,结果显示,早晚稻品种间甲烷排放通量存在显著差异,在早稻分蘖盛期,甲烷排放通量与根系干质量和根伤流量呈显著负相关;而晚稻在分蘖盛期和齐穗期,甲烷排放通量与根伤流量呈极显著负相关,与根系干质量、体积相关性不显著<sup>[23]</sup>。曹云英等对水稻根系的剪根试验表明,甲烷传输速率随着水稻植株根数的增加而增加,随着根长度的减小而减小;根系是传输甲烷的关键器官,而根尖对甲烷传输的作用最大<sup>[24]</sup>。Kludze 等的研究也认为,稻田甲烷传输速率与水稻根系长度呈正相关<sup>[25]</sup>。

总而言之,水稻植株根系对稻田甲烷排放的影响很大,主要通过 2 个方面来实现:一是水稻根系为甲烷的产生提供反应基质;二是水稻根系通气组织是甲烷传输和排放的通道。稻株的根系活力强,对稻田甲烷的产生和排放之间存在着抑制和促进 2 方面的作用:根氧化力、泌氧能力的增强,以及根际氧化还原电位的上升,可抑制甲烷的产生,同时促使甲烷氧化细菌的生长繁殖,促进甲烷的氧化,因此,产生甲烷的量减少,排放量亦随之减少;根系通气组织是甲烷传输的首要通道,稻田系统中未被氧化的甲烷超过 50% 甚至能达到 95% 是通过根系吸收再经过水稻叶片释放到大气中去的,根系活力强,则其主动吸收力强,吸收甲烷能力也强,这将促进甲烷的传输与排放<sup>[26-28]</sup>。

## 2 植株生长特性对稻田甲烷排放的影响

植株的生长特性对稻田甲烷的产生、氧化以及传输都有

很大的影响。水稻品种是决定植株生长特性的重要因素。不同水稻品种在株型、光合能力、叶面积、分蘖数、生物量等生理特性上有很大差异,所以不同品种的稻田甲烷排放量也表现出一定的差异。Aulakh 等研究了 12 个水稻品种(10 个常规稻品种和 2 个杂交稻品种)的甲烷传输能力,结果表明,常规稻品种在生长初期(苗期至穗分化时期),随着根和地上生物量的增加,甲烷的传输能力也逐步增加,一旦通气组织发育完全,植物生物量的进一步增加将不会影响甲烷的传输能力;从开花期到成熟期,甲烷的传输能力表现出轻微的变化或者急剧的下降趋势;而杂交稻品种在整个生育期都表现出持续增长的甲烷传输能力,甲烷传输能力与植株通气组织(根和茎生物量、总生物量)都表现出正相关性;将所有品种进行分析,分蘖数与甲烷传输能力是呈线性相关的,表明甲烷传输通道的数量相比于植株的大小、生物量更能决定甲烷的传输能力<sup>[29]</sup>。Mariko 等报道,水稻植株的分蘖数与甲烷排放量呈正相关<sup>[30]</sup>。Kludze 等也认为,三蘖水稻植株甲烷排放量要远低于九蘖水稻植株的甲烷排放量<sup>[25]</sup>。Das 等在印度水稻季节对 10 个水稻品种的农田生态系统甲烷排放通量进行研究,发现,不同水稻品种的解剖学和形态生理学特征会影响稻田的甲烷排放通量,研究结果表明,甲烷排放通量较高的品种具有较大的髓腔组织、较大的叶面积、较高的蒸腾速率和较大的气孔密度等特征<sup>[31]</sup>。任丽新等研究发现,水稻植株的根、茎、叶的质量差异会直接影响稻田甲烷的排放<sup>[32]</sup>。Gogoi 等分析了不同水稻品种生长参数与稻田甲烷排放通量的关系,研究认为,叶片数、分蘖数和叶面积指数与甲烷排放通量呈显著的正相关关系<sup>[33]</sup>。Sass 等发现,水稻产量和稻田甲烷排放通量呈负相关关系,认为增加的甲烷排放通量相当于损失了的水稻生长可利用能量<sup>[34-35]</sup>。傅志强等通过研究水稻植株通气系统与甲烷排放量的相关性认为,株高、维管束面积、气腔面积是影响水稻植株甲烷排放的重要因子<sup>[36]</sup>。

稻田 80%~90% 的甲烷是以植株传输的方式排放到大气中的<sup>[4,37]</sup>。对于水稻甲烷排放的路径,Wang 等认为,高温天气导致白天气孔关闭,晚上温度下降气孔开放吐出 CH<sub>4</sub> 气体是造成夜间排放出现峰值的原因,因此认为气孔是甲烷排放的主要通道<sup>[38]</sup>。而 Nouchi 的试验却发现,甲烷排放的能力与蒸腾强度相关性较差,认为甲烷主要是通过水稻叶鞘的微孔而不是叶片排向大气的<sup>[39]</sup>。Holzapfel - Pschorn 等研究认为,约 80% 的甲烷通过水稻植株的茎秆进行扩散<sup>[40]</sup>。曹云英等观测到水稻植株在苗期甲烷的传输约有 50% 是由叶片排放的<sup>[41]</sup>。关于稻田通过水稻植株排放甲烷的途径还须进一步研究。

## 3 水稻产量潜力与稻田甲烷排放差异

随着人口的不断增加,进一步提高水稻产量是满足日益增长的人口需求、保证粮食安全的必由之路。而水稻播种面积的增加以及超高产水稻品种的种植将会导致稻田甲烷排放量的增加<sup>[42-43]</sup>。近年来,超级稻在我国推广速度较快,示范推广规模逐渐扩大。与常规水稻相比,超级稻的增产优势主要表现在分蘖能力较强、叶面积指数较大、光合能力强、根系活力强以及产量较高等方面<sup>[44-45]</sup>。因此,超级稻的生产力优势是否将成为稻田甲烷排放优势,已成为研究者们关注的新

焦点。有些研究者认为,高产与低排放并不矛盾,高产品种可直接降低稻田温室气体排放。如傅志强等的研究表明,无论是直播还是移栽,超级稻的  $\text{CH}_4$  排放量均低于常规品种<sup>[46]</sup>。马永跃等对常规稻(和盛10号)和超级稻(Q优6号)2个水稻品种的稻田甲烷排放通量进行研究,发现超级稻比常规稻在水稻整个生长期的甲烷排放通量平均减少约3.6百分点<sup>[47]</sup>。王丽丽等通过比较超级稻宁粳1号和常规稻镇稻11的生物学特性和甲烷排放量差异发现,超级稻宁粳1号不仅具有较高产量,而且单位干物质和籽粒产量的甲烷排放量分别比镇稻11低42.42%和81.38% ( $P < 0.05$ ),他认为产量的提高不一定伴随着甲烷排放通量的增加,选育高产低排放的水稻品种是有可能的<sup>[21]</sup>。

目前,关于超级稻的研究主要集中在与常规稻生产力、生理生态比较以及高产栽培技术等方面,对稻田甲烷排放方面的评价研究较少,对相关机理的研究尚不明确<sup>[48]</sup>。进一步深入研究超级稻与常规稻的甲烷排放差异及其机理,筛选出高产低排放的品种,将为高产低碳稻作的创新提供理论与技术支持。

## 4 讨论

### 4.1 通过水稻品种选育有效减少稻田甲烷排放

稻田甲烷排放研究的最终目的之一是制定科学有效的减排措施,提高品种产出与排放比率,对稻田温室气体的减排具有间接效果。近年来,人们对高产、低甲烷排放量水稻品种的筛选和研究更加重视。生产中选用低甲烷排放量的水稻品种可以减少稻田甲烷的排放量,主要从以下3个方面选育适宜的水稻品种。

**4.1.1 因地制宜,选育高产低甲烷排放品种** 我国水稻种植地域广阔,在不同地区的气候和土壤条件下,同一水稻品种的甲烷排放有很大区别,因此,要加强水稻品种甲烷排放通量的对比研究,坚持因地制宜的原则,选用和培育经济系数高、甲烷排放通量低的水稻品种<sup>[49]</sup>。曹云英等对江苏省不同历史时期的代表性中籼稻品种稻田甲烷排放通量进行研究,结果表明,在品种演进过程中,稻田甲烷排放通量大体随品种的演进而呈减少的趋势<sup>[50]</sup>。孙会峰等对太湖流域推广种植较多的16个品种进行温室气体排放的研究认为,常规粳稻中早玉香粳和秀水134,杂交粳稻中的花优14、秋优金丰和甬优9号,杂交籼稻中的早优113和天优化既能保证一定的水稻产量,又能减少温室气体排放强度<sup>[51]</sup>。

**4.1.2 选育氮高效品种** 大量施用氮肥已成为世界粮食增产的主要手段,但其中仅有17%为作物吸收,大部分残留在土壤中或渗漏到水体、排向大气中<sup>[52]</sup>。邵美红等认为,增产潜力大的品种对稻田肥力的利用率高,有利于防止氮流失,减少氮肥在土壤中的存留时间,降低水稻生长季节和休耕季节甲烷的产生和排放<sup>[22]</sup>。因此选育氮高效品种,提高氮素利用效率,可有效地减少甲烷的排放量。

**4.1.3 选育节水灌溉品种** 在同等产量条件下,选用节水灌溉水稻品种,从而降低温室气体排放总量。研究表明,采用半旱式栽培技术,可大幅度减少甲烷排放通量,并具有显著的增产效果<sup>[53]</sup>。王蕴霏认为,节水灌溉,既可降低水分损耗量,又可降低  $\text{CH}_4$  总排放量<sup>[54]</sup>。在整个水稻生长发育时期,节水灌溉排放的  $\text{CH}_4$  总量比淹水灌溉少79.1%。

### 4.2 研究展望

稻田甲烷排放是个极其复杂的过程,水稻植株对稻田甲烷排放起至关重要的作用。甲烷排放量的差异在水稻品种之间非常显著,但对其机理的研究尚不明确。深入研究稻田甲烷排放与水稻植株基因型、生理学特性、生态学特性之间的定性定量关系,并提出切实可行的减排措施仍是研究的主题。水稻根系对甲烷排放的影响很大,因此对于水稻根系的研究有一定的紧迫性和必要性,水稻根系育种是未来的研究方向之一。近年来,研究者在稻田甲烷排放研究方面取得了较大的成果,充分应用这些成果将对农业生产和环境保护产生积极的作用。稻田甲烷的产生及排放机制有待更加深入的研究,在清楚了解机制之后,减排措施才更加科学。

尽管关于稻田甲烷排放及减排效果有了不少的研究,但大多是基于单项技术应用条件下的结果。因此今后需要开发高产低排水稻品种并研究其在不同管理模式下的减排效果,综合水稻品种与环境条件、耕作方式、水肥管理等多种因素相互影响的结果,找出具有最佳减排效果的技术组合,同时综合考虑经济效益、环境效益和社会效益,从而提出切实可行的减排措施。

### 参考文献:

- [1] Rodhe H. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect[J]. *Science*, 1990, 248(4960): 1217 - 1219.
- [2] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [3] Sass R L, Fisher F M, Lewis S T, et al. Methane emission from rice fields; effect of soil properties[J]. *Global Biogeochemistry Cycles*, 1994, 8(2): 135 - 140.
- [4] Schütz H, Holzapfel - Pschorn A, Rennenberg H, et al. Emission of methane ( $\text{CH}_4$ ) from Italian irrigated rice fields[J]. *International Rice Research Newsletter*, 1990, 15(4): 35 - 36.
- [5] 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.
- [6] 林敏, 尤崇灼. 水稻根分泌物及其与粪产碱菌的相互作用[J]. *中国农业科学*, 1989, 22(6): 6 - 12.
- [7] 王大力, 林伟宏.  $\text{CO}_2$  浓度升高对水稻根系分泌物的影响——总有机碳、甲酸和乙酸含量变化[J]. *生态学报*, 1999, 19(4): 570 - 572.
- [8] Wang B, Neue H U, Samonte H P. Effect of cultivar difference ('IR72', 'IR65598' and 'Dular') on methane emission[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1997, 62(1): 31 - 40.
- [9] Jia Z J, Cai Z C, Xu H, et al. Effect of rice plants on  $\text{CH}_4$  production, transport, oxidation and emission in rice paddy soil[J]. *Plant and Soil*, 2001, 230(2): 211 - 221.
- [10] 孟冬梅. 水稻根系通气组织的泌氧能力的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
- [11] 李玉娥, 林而达. 减缓稻田甲烷排放的技术研究[J]. *农村环境与发展*, 1995, 12(2): 38 - 40.
- [12] Jackson M B, Armstrong W. Formation of aerenchyma and the processes of plant ventilation in relation to soil flooding and submergence[J]. *Plant Biology*, 1999, 1(3): 274 - 287.

- [13] 刘依依,傅志强,龙文飞,等. 水稻根系泌氧能力与根系通气组织大小相关性的研究[J]. 农业现代化研究,2015,36(6): 1105-1111.
- [14] 曹云英,许锦彪,朱庆森. 水稻植株状况对甲烷传输速率的影响及其品种间差异[J]. 华北农学报,2005,20(2):105-109.
- [15] van der Gon H A C D, Neue H U. Oxidation of methane in the rhizosphere of rice plants[J]. Biology and Fertility of Soils,1996,22(4):359-366.
- [16] 孟范平. 湿地甲烷释放研究进展[J]. 重庆环境科学,1997,19(3):22-27.
- [17] Pacey J G, Degier J P. The factors influencing landfill gas production [C]//Energy from landfill gas, Proceeding of a conference jointly sponsored by the United Kingdom Department of Energy and the United States Department of Energy,1986.
- [18] Wang Z P, Delaune R D, Patrick W H, et al. Soil redox and pH effects on methane production in a flooded rice soil[J]. Soil Science Society of America Journal,1993,57(2):382-385.
- [19] Fetzer S, Conrad R. Effect of redox potential on methanogenesis by *Methanosarcina barkeri* [J]. Archives of Microbiology,1993,160(2):108-113.
- [20] 徐雨昌,王增远,李震,等. 不同水稻品种对稻田甲烷排放量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,1999,5(1):93-96.
- [21] 王丽丽,闫晓君,江瑜,等. 超级稻宁粳1号与常规粳稻CH<sub>4</sub>排放特征的分析比较[J]. 中国水稻科学,2013,27(4):413-418.
- [22] 邵美红,孙加焱,阮关海. 稻田温室气体排放与减排研究综述[J]. 浙江农业学报,2011,23(1):181-187.
- [23] 傅志强,朱华武,陈灿,等. 水稻根系生物特性与稻田温室气体排放相关性研究[J]. 农业环境科学学报,2011,30(12):2416-2421.
- [24] 曹云英,许锦彪,朱庆森. 水稻根系对甲烷传输速率的影响[J]. 安徽农业科学,2003,31(1):90-92.
- [25] Kludze H K, Delaune R D, Patrick W H. Aerenchyma formation and methane and oxygen exchange in rice[J]. Soil Science Society of America Journal,1993,57(2):386-391.
- [26] 曹云英,许锦彪,朱庆森. 水稻植株状况对甲烷传输速率的影响及其品种间差异[J]. 华北农学报,2005,20(2):105-109.
- [27] 上官行健,王明星,陈德章,等. 稻田CH<sub>4</sub>的传输[J]. 地球科学进展,1993,8(5):13-22.
- [28] 阎丽娜,李霞. 水稻对稻田甲烷排放的影响[J]. 中国农学通报,2008,24(10):471-476.
- [29] 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(1/3):367-375.
- [30] Mariko S, Harazono Y, Owa N, et al. Methane in flooded soil water and the emission through rice plants to the atmosphere[J]. Environ Experimental Bot,1991,31(3):343-350.
- [31] Das K, Baruah K K. Methane emission associated with anatomical and morphophysiological characteristics of rice (*Oryza sativa*) plant [J]. Physiologia Plantarum,2008,134(2):303-312.
- [32] 任丽新,王庚辰,张仁健,等. 成都平原稻田甲烷排放的实验研究[J]. 大气科学,2002,26(6):731-743.
- [33] Gogoi N, Baruah K K, Gogoi B, et al. Methane emission characteristics and its relations with plant and soil parameters under irrigated rice ecosystem of Northeast India[J]. Chemosphere,2005,59(11):1677-1684.
- [34] Sass R L, Fisher F M, Turner F T, et al. Methane emission from rice fields as influenced by solar radiation, temperature, and straw incorporation [J]. Global Biogeochem Cycle,1991,5(4):335-350.
- [35] 林匡飞,项雅玲,姜达炳,等. 湖北地区稻田甲烷排放量及控制措施的研究[J]. 农业环境保护,2000,19(5):267-270.
- [36] 傅志强,黄璜,何保良,等. 水稻植株通气系统与稻田CH<sub>4</sub>排放相关性研究[J]. 作物学报,2007,33(9):1458-1467.
- [37] Yu K W, Wang Z P, Chen G X. Nitrous oxide and methane transport through rice plants[J]. Biology and Fertility of Soils,1997,24(3):341-343.
- [38] Wang M X, Dai A G, Shen R X, et al. CH<sub>4</sub> emission from a Chinese rice paddy field [J]. Acta Meteorologica Sinica,1990(3):265-275.
- [39] Nouchi I. Mechanisms of methane transport through rice plants [M]//Minami K. CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O: global emission and controls from rice fields and other agricultural and industrial sources. Tokyo, Japan: Yokendo Publishers,1994:87-105.
- [40] Holzapfel-Pschorn A, Conrad R, Seiler W. Effects of vegetation on the emission of methane from submerged paddy soil [J]. Plant and Soil,1986,92(2):223-233.
- [41] 曹云英,许锦彪,朱庆森. 水稻叶片对甲烷传输速率的影响[J]. 山东农业科学,2004(3):34-35.
- [42] Bouwman A F. Agronomic aspects of wetland rice cultivation and associated methane emissions [J]. Biogeochemistry,1991,15(2):65-88.
- [43] 黄耀, Sass R L, Fisher F M. 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):150-154.
- [44] 王熹,陶龙兴,俞美玉,等. 超级杂交稻协优9308生理模型的研究[J]. 中国水稻科学,2002,16(1):38-44.
- [45] 许明,贾德涛,马殿荣,等. 北方超级粳稻根系生理、叶片光合性能特点及其相互关系[J]. 作物学报,2010,36(6):1030-1036.
- [46] 傅志强,黄璜,谢伟,等. 高产水稻品种及种植方式对稻田甲烷排放的影响[J]. 应用生态学报,2009,20(12):3003-3008.
- [47] 马永跃,全川,王维奇. 福州平原两种水稻品种稻田的CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放通量动态[J]. 湿地科学,2013,11(2):246-253.
- [48] 闫晓君,王丽丽,江瑜,等. 长江三角洲主要超级稻CH<sub>4</sub>排放特征及其与植株生长特性的关系[J]. 应用生态学报,2013,24(9):2518-2524.
- [49] 廖松婷,王忠波,张忠学,等. 稻田温室气体排放研究综述[J]. 农机化研究,2014(10):6-11.
- [50] 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.
- [51] 孙会峰,周胜,陈桂发,等. 水稻品种对稻田CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的影响[J]. 农业环境科学学报,2015,34(8):1595-1602.
- [52] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, et al. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions [J]. Science,2008,320(5878):889-892.
- [53] 曹云英. 稻田甲烷排放的研究进展[J]. 安徽农业科学,2002,30(6):872-876.
- [54] 王蕴霏. 稻田耕作制度对CH<sub>4</sub>气体排放影响的研究进展[J]. 中国农学通报,2015,31(29):141-147.