施肥对稻田生态系统气体调节功能及其价值的影响

肖 玉^{1,2} 谢高地¹ 鲁春霞¹ 丁贤忠¹ 吕 耀¹

(1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101) (2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要 该文以 2002 年在上海市奉贤县五四农场进行的稻田生态系统田间实验为基础, 对尿素施用对稻田生态系统气体调节功能(释放 O₂ 和温室气体调节)的影响进行研究。研究表明: 1) 在水稻 (*Oryza sativa*) 生长期, 施加尿素能显著增加稻田日 O₂ 释放量及其价值量; 2) 在水稻生长期, 施加尿素稻田综合 CO₂ 的通量及其价值并不比未施肥稻田存在显著优势, 尿素施用能明显增强稻田 N₂O 排放通量, 降低稻田 CH₄ 排放通量。尿素施用对温室气体调节具有正效应, 促进稻田对温室气体吸收。

关键词 气体调节 稻田生态系统 生态系统服务功能 价值评估 施肥

THE IMPACT OF UREA AMENDMENTS ON ATMOSPHERIC GAS REGULATION SERVICES IN RICE PADDY ECOSYSTEMS AND THEIR VALUATION

XIAO Yu^{1,2} XIE Gao-Di¹ LU Chun-Xia¹ DING Xian-Zhong¹ and LÜ Yao¹

(1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

(2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract The services provided by croplands have been underestimated. Besides providing food and fiber, croplands provide many other functions and services, such as nutrient transformation, pollination, biological control, beautiful scenery, recreation, and so on. In this study, gas regulation services provided by fertilized and unfertilized rice (*Oryza sativa*) paddy ecosystems and their values were investigated based on field experiments conducted on the Wusi Farm in Fengxian County, Shanghai in 2002. Paddy fields regulated two types of gases: O₂ emissions and greenhouse gases (GHGs), including CO₂ uptake and CH₄ and N₂O emissions.

At elongation stage, booting stage, panicle initiation stage and maturation stage, the biomass of fertilized and unfertilized paddy fields were determined and O₂ emissions calculated using the photosynthesis formula based on plant biomass. The maximum O₂ emissions from fertilized and unfertilized paddy fields were 770.15 and 506.62 kg·hm⁻²·d⁻¹, respectively. Compared to the price of industrial O₂ and the cost of afforestation in China, their values were calculated as 190.72 and 289.93 yuan·hm⁻²·d⁻¹.

On August 15, 18, 21 and 25, and September 2, 8, 14 and 22, the gases from paddy fields were sampled and their fluxes determined. The results showed that the fluxes of CH₄ from fertilized and unfertilized paddy fields ranged from 4.86 mg·m⁻²·h⁻¹ to 14.96 mg·m⁻²·h⁻¹ and from 3.34 mg·m⁻²·h⁻¹ to 50.67 mg·m⁻²·h⁻¹, respectively. For N₂O, they ranged from 0.008 6 mg·m⁻²·h⁻¹ to 0.056 6 mg·m⁻²·h⁻¹ and from 0.000 6 mg·m⁻²·h⁻¹ to 0.014 9 mg·m⁻²·h⁻¹, and for CO₂ from 347.63 mg·m⁻²·h⁻¹ to 730.20 mg·m⁻²·h⁻¹ and from 205.06 mg·m⁻²·h⁻¹ to 679.51 mg·m⁻²·h⁻¹, in fertilized and unfertilized paddy fields, respectively. Using a CO₂ equivalent, the integrated GHGs fluxes were computed as -1.42 - 39.71 kg·hm⁻²·d⁻¹ CO₂-C (fertilized) and -50.56 - 25.60 kg·hm⁻²·d⁻¹ CO₂-C (unfertilized). Based on the average cost of the Sweden carbon tax and afforestation in China, the economic value of GHGs regulation was calculated. The results indicated that the valuation of CO₂ absorption by fertilized paddy fields was not much more than that by unfertilized ones. Second, urea amendment aggravated the negative values of N₂O emissions from paddy fields. Third, the negative values of CH₄ emission from paddy fields were mitigated by urea amendment. And fourth, the valuation of GHGs regulation by fertilized fields was promoted by urea amendments. In this study, we were trying to provide a fair method to evaluate the values of croplands to support an effective way to recognize the benefits derived from croplands, especially by paddy fields, and to promote the sustainability of crop-

land ecosystems.

Key words Gas regulation, Paddy fields, Ecosystem services, Value assessment, Urea amendment

在农田生态系统为人类提供的众多服务与功能中(Paoletti *et al.*, 1992; Björklund *et al.*, 1999), 气体调节就是其中之一。气体调节功能包括生态系统调节大气和调节气候的功能, 主要指生态系统调节大气化学成分以及调节全球气温、降水和其它全球或区域范围内的气候过程等(Costanza *et al.*, 1997)。由于有人类活动的参与, 具有高光合作用效率的农田生态系统每年固定大量的 CO_2 并释放大量的 O_2 。全球植被年固定的 $5.3 \times 10^8 \text{ Mg C}$ 碳中, 作物吸收碳量占 47%, 草原吸收 10%, 森林固碳量占 43%(王修兰, 1996)。当然作物在生长过程中还通过土壤和作物呼吸作用向大气排放大量 CO_2 , 此外农田特别是稻田生态系统还是 CH_4 和 N_2O 等温室气体的排放源。Björklund 等(1999)研究表明, 由于生产效率的提高, 从 20 世纪 40 年代到 90 年代瑞典农业景观排放温室气体量从 $3\,210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \text{ CO}_2$ 减少到 $2\,500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \text{ CO}_2$ 。Robertson 等(2000)研究了美国农业系统 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 气体排放, 并认为考虑到农业投入生产过程中排放的温室气体、作物收获导致的碳损失以及土壤和作物本身排放的温室气体, 每年耕作的农业系统没有净吸收大气中温室气体。邹建文等(2003)研究江苏省南京市稻田发现, 由植物固定 CO_2 吸收的碳量减去土壤释放 CO_2 和 CH_4 产生的碳量后得到的结果显示, 稻田生态系统表现为对大气中碳的净吸收。生态系统服务功能的价值评估虽然存在很多争议, 但仍然有很多学者做着有益的尝试(Costanza *et al.*, 1997; Daily, 1997), 关于农田生态系统气体调节功能的价值评价也是如此(欧阳志云等, 1999; 谢高地等, 2003)。本研究根据稻田生态系统田间实验, 对在水稻(*Oryza sativa*)生长期间施肥和未施肥稻田气体调节功能(包括固定 CO_2 , 释放 O_2 , 排放 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 等功能)变化过程及其影响因素进行了研究。

1 实验和方法

1.1 研究区概况

上海五四农场位于上海市南郊奉贤县境内, 具有明显的北亚热带季风气候特征。土壤以中性壤土为主, 少数为重质壤土, $0 \sim 20 \text{ cm}$ 耕作层含盐量为 0.8‰ , 有机质为 $12 \sim 14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 水解氮(N)为 $60.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效磷(P)为 $23.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾(K)为

$230 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 值为 $7.9 \sim 8.0$, 地下矿化度为年均 $5.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。供试水稻品种为‘9734’, 直播, 播量为 $127.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。除施氮水平之外, 小区其它投入及管理措施与大田常规管理相同。实验设计分为未施氮和施氮(尿素 $375 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$, 在分蘖期和抽穗期分 4 次施用)两个处理, 每个处理设 3 次重复, 小区随机分布。

1.2 主要研究方法

1.2.1 稻田温室气体排放实验监测及其排放量和价值计算

本试验测定稻田主要生育期温室气体(CO_2 、 CH_4 和 N_2O)的排放通量, 采用静态箱法于 2002 年 8 月 15、18、21 和 25 日; 9 月 2、8、14 和 22 日上午 9:00 ~ 11:00 人工采集气体样品, 每次采样取 3 次重复。 CH_4 和 N_2O 利用惠普 5890 II 型气相色谱仪分析, CO_2 浓度利用 LI-COR6252 型 CO_2 红外分析仪测定。由于在一定的时间段内, 稻田温室气体排放浓度的变化成线性增长(减少), 所以可以根据箱内气体浓度随时间变化来计算稻田气体排放通量:

$$F = \frac{dm}{A \cdot dt} = \frac{dc \cdot V\rho}{A \cdot dt} = \frac{MPh}{RT} \cdot \frac{dc}{dt}$$

式中, F 为气体排放通量($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), ρ 为气体密度, R 为气体常数, dm 和 dc 分别为 dt 时间内采集箱内气体质量和浓度的变化, h 、 A 、 V 分别为气箱高度(m)、底面积(m^2)和体积(m^3), M 为气体分子量, T 为气箱内温度, P 为气箱内气压。

参照 IPCC(1992)推荐的稻田甲烷排放量估算的方法, 估算不同生育期稻田温室气体排放量。稻田温室气体主要包括 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 等, 运用增温潜势(Global warming potentials, GWP ; 以 CO_2 的 GWP 为 1)将 CH_4 和 N_2O 换算为 CO_2 , 计算其气体调节的价值。对于 100 年时间尺度的气候变化, CH_4 和 N_2O 的 GWP 分别为 24.5 和 320(Björklund *et al.*, 1999)。稻田生态系统气体调节价值运用造林成本法($0.2609 \text{ yuan} \cdot \text{kg}^{-1}$; 欧阳志云等, 1999)和碳税法($1.245 \text{ yuan} \cdot \text{kg}^{-1}$; 国家环境保护局, 1997)计算。稻田生态系统排放温室气体造成了全球气温的增高, 其价值为负。

1.2.2 稻田干物质生产量的测定和释放 O_2 物理量和价值量的估算

利用样方收获法在水稻关键生育期测定水稻地

上和地下干物质生产量,然后通过光合作用方程计算稻田生态系统释放的 O₂(欧阳志云等, 1999)。

据上式,植物体每积累 1 g 干物质,释放 1.19 g O₂。根据各生育期水稻干物质生产量可反推出稻田生态系统在这期间的光合作用过程中释放 O₂ 的量,将其在生育期内平均,可得到该生育期内的日变化量。在计算稻田生态系统释放 O₂ 的价值时,采用造林成本法(0.352 9 yuan•kg⁻¹; 欧阳志云等, 1999)和工业制氧法(0.4 yuan•kg⁻¹; 欧阳志云等, 1999)计算。

1.2.3 统计分析

本研究运用 SPSS11.5 软件对研究结果进行统计分析,并对不同处理数据之间的显著性差异进行了检验。

2 结果与分析

2.1 稻田生态系统生物量

水稻总生物量从生长季初期开始增长,在播种后 75、86 和 98 d(拔节期和抽穗期)迅速增加,在灌浆期达到最大值。这主要是由于 7 月中旬至 8 月下旬是该地区高温较为集中的时段,充足的热量和光照促进了植物的光合作用(表 1)。其后由于光合作用强度的不断减弱,总生物量缓慢下降。这与 Singh 等(1999)在印度观测到的移栽稻生长发育情况一致。周卫军等(2003)也得出分蘖至齐穗期是水稻生物生产量增加最为迅速的时期。施氮肥对水稻生物

量生产有明显影响:由于氮素代谢直接影响植物生物量的形成,在整个水稻生育期内,施肥稻田水稻总生物量均显著高于未施肥稻田(表 1)。

2.2 稻田生态系统 O₂ 释放量及其价值

由光合作用方程可知,稻田生态系统 O₂ 释放量与稻田干物质生产量成线性关系,因此 O₂ 日释放量季节变化趋势与稻田生态系统干物质日增加量季节变化趋势一致。在未施肥和施肥的稻田生态系统中,O₂ 日释放量在拔节期以前因为光合作用较弱,所以增长缓慢;而水稻拔节期和齐穗期正值 7 月下旬至 8 月下旬持续的高温天气,水稻光合作用强度大,O₂ 日释放量迅速增加,在齐穗期达到最大值,分别为 506.62(未施肥)和 770.15 kg•hm⁻²•d⁻¹(施肥);之后随着水稻逐渐成熟,光合作用强度减弱,O₂ 日释放量将下降(表 2)。是否施用氮肥对水稻 O₂ 日释放季节变化也有明显影响:在播种后 0~75 d 和播种后 86~98 d 施肥和不施肥处理的 O₂ 日释放量存在显著差异(*p* < 0.05);而播种后 75~86 d 施肥和不施肥处理的 O₂ 日释放量的差异并不显著(表 2)。在水稻生育期内稻田日释放 O₂ 的价值量与物理量有着相同的趋势:在物理量达到极值的齐穗期,价值量也达到最大值,分别为 190.72 和 289.93 yuan•hm⁻²•d⁻¹。施用氮肥能提高稻田植物光合作用的强度,其 O₂ 日释放的价值量最大值高于未施肥稻田。

2.3 稻田生态系统温室气体调节及其价值

2.3.1 稻田生态系统温室气体调节

表 1 不同生育期水稻生物生产量(平均值 ± 标准差)
Table 1 The biomass of paddy during the different stages (Mean ± SD)

处理 Treatment	播种后 75 d 75 days after seeding	播种后 86 d 86 days after seeding	播种后 98 d 98 days after seeding	播种后 120 d 120 days after seeding
未施肥 Unfertilized	5 817 ± 355 **	10 500 ± 1 067 *	16 170 ± 1 313 *	13 881 ± 1 193 **
施肥 Fertilized	10 038 ± 477 **	17 157 ± 2 590 *	26 460 ± 3 377 *	23 982 ± 1 530 **

* : *p* < 0.05 ** : *p* < 0.01

表 2 稻田生态系统释放 O₂ 的物理量和价值量变化(平均值 ± 标准差)
Table 2 The variation of O₂ emissions from paddy fields and their values (Mean ± SD)

播种后天数(d) Days after seeding	处理 Treatment	日释放 O ₂ 量 O ₂ emission per day (kg•hm ⁻² •d ⁻¹)	经济价值 Economic value (yuan•hm ⁻² •d ⁻¹)
0~75	不施肥 Unfertilized	92.30 ± 5.63 *	34.75 ± 2.12 *
	施肥 Fertilized	159.27 ± 7.57 *	59.96 ± 2.85 *
75~86	不施肥 Unfertilized	506.62 ± 77.02	190.72 ± 29.00
	施肥 Fertilized	770.15 ± 127.14	289.93 ± 47.86
86~98	不施肥 Unfertilized	306.70 ± 13.30 *	115.46 ± 5.01 *
	施肥 Fertilized	503.21 ± 33.95 *	189.44 ± 12.78 *

* : *p* < 0.05

2.3.1.1 稻田排放 CH₄

本研究中稻田采用间歇性灌溉管理方式,分别于水稻播种后 38 d、42~48 d 和 50~56 d 烤田,该措施被证明能显著减少稻田 CH₄ 排放(Yang & Chang, 1999)。本研究结果显示,稻田 CH₄ 排放通量从播种后 70~90 d(拔节后期至抽穗期前)有轻微波动,至抽穗扬花期达到峰值(图 1a),这与 Singh 等(1999)的研究结果相同。这主要是由于一方面水稻植株在该段时间生长旺盛,根脱落物和分泌物为产 CH₄ 细菌提供了充足的前体;另一方面在生殖生长期水稻植株根系周围形成的强还原环境促进了 CH₄ 的产生(Adhya *et al.*, 1994);同时 8 月下旬至 9 月初持续的高温天气增加土壤温度,促进了土壤有机质降解,刺激了产 CH₄ 细菌的活性,CH₄ 排放通量不断增加(Yang & Chang, 1999)。此后,由于气温逐渐降低,同时水稻植株根系表皮逐渐老化导致 CH₄ 传输能力减弱,稻田 CH₄ 的排放通量逐渐降低(Nouchi *et al.*, 1994)。

施肥对稻田 CH₄ 排放通量的影响非常复杂,研究结果也存在很大分歧(Lindau *et al.*, 1991;

Whalenm *et al.*, 1991; 上官行健和王明星, 1993)。本研究结果显示,在 8 次观测结果中,有 5 次施肥和不施肥稻田 CH₄ 排放通量之间存在显著差异,且不施肥稻田高于施肥稻田,因此施用尿素可能抑制了稻田 CH₄ 的排放(表 3)。在整个生育期内,施肥和未施肥稻田 CH₄ 排放通量波动范围分别为 4.86~14.96 和 3.34~50.67 mg·m⁻²·h⁻¹。施肥不仅缩小了稻田 CH₄ 排放通量变化幅度,而且使稻田 CH₄ 季节排放量从 476 减少到 212 kg·hm⁻²。这主要是因为大多数产 CH₄ 细菌存在的 pH 值范围为 6.5~7.5(Mah & Smith, 1981),pH 值过高或过低将导致 CH₄ 产生量的降低(Wang *et al.*, 1993)。本实验小区土壤 pH 值为 7.9~8.0,属碱性土壤,施用尿素将进一步增加土壤 pH 值(Yang & Chang, 1998),导致 CH₄ 排放量的减少。

2.3.1.2 稻田排放 N₂O

稻田生态系统 N₂O 排放来自两个过程:硝化作用和反硝化作用(蒋静艳和黄耀, 2001)。本实验的研究结果显示:在实验进行的 8 次观测中,有 6 次结果表明施尿素稻田 N₂O 排放通量显著高于不施尿

图 1 稻田生态系统温室气体调节物理量
Fig.1 The seasonal fluctuation of several GHGs regulation from paddy ecosystems

表 3 施肥和不施肥稻田生态系统 CH₄、N₂O 和 CO₂ 通量显著性差异检验
Table 3 The test of significant difference of the fluxes of CH₄, N₂O and CO₂ from fertilized and unfertilized paddy ecosystems

播种后天数(d) Days after seeding	CH ₄ 通量的 F 值 F value of CH ₄ fluxes	N ₂ O 通量的 F 值 F value of N ₂ O fluxes	CO ₂ 通量的 F 值 F value of CO ₂ fluxes
69	12.15 *	0.72	0.43
72	10.99 *	21.30 *	110.28 **
75	0.31	27.40 **	14.02 *
79	6.86	11.65 *	28.88 **
87	0.58	163.71 **	8.18 *
93	9.29 *	0.47	25.96 **
99	58.86 **	78.07 **	0.08
107	29.71 **	9.15 *	19.66 *

* : $p < 0.05$ ** : $p < 0.01$

素稻田(表 3)。未施肥的稻田生态系统在整个生育期内保持较低 N₂O 排放且波动很小,只在播种后 70、74 和 93 d 排放量有轻微上升。而施氮的稻田在播种后 70~80 d N₂O 排放通量有显著增加,主要原因是施加第一次穗肥(播种后 63 d)导致土壤中的 N 素增加,持续的高温少雨天气使稻田水量下降,土壤通气和厌氧状态同时存在,N₂O 排放通量较高。播种后 74 d 施加第二次穗肥,进一步为 N₂O 的产生补充了氮源,加速了 N₂O 的排放,导致 N₂O 排放通量峰值在播种后 79 d 出现。其后两次大量降雨(播种后 81 d 为 51 mm 和 83 d 为 36 mm)使稻田土壤水量得到补充,N₂O 排放通量逐渐下降,至成熟期田间水量再次下降,N₂O 排放通量又有所上升(曹金留等,1999)。整个生育期施肥和未施肥稻田 N₂O 排放通量范围分别为:0.008 6~0.056 6 mg·m⁻²·h⁻¹和 0.000 6~0.014 9 mg·m⁻²·h⁻¹。季节排放量分别为 0.32(未施肥)和 0.54 kg·hm⁻²(施肥)(图 1b)。

2.3.1.3 稻田吸收 CO₂

实验中测定 CO₂ 的通量是包括水稻光合固定、水稻呼吸和土壤呼吸在内的一个综合通量,该指标能够全面的反映稻田生态系统对大气组分的调节功能。研究中根据实验测定的 CO₂ 气体浓度变化,计算不同日期稻田 CO₂ 排放通量(因所有的测定值全为负值,所以将其取正,并称之为 CO₂ 吸收通量)。

实验研究结果显示,稻田 CO₂ 吸收通量在抽穗扬花期较高,然后逐渐减少,至成熟期有所回升(图 1c)。水稻播种后 70 d 是水稻生物量增加最快的抽穗扬花期,其 CO₂ 吸收通量达最大值,然后光合作用强度减弱,同时由于持续高温导致水稻植株呼吸和土壤呼吸作用增强,稻田 CO₂ 吸收通量逐渐下降。至成熟期,虽然植株光合作用进一步减弱,但稻田(特别是未施肥处理)CH₄ 的急速增加,大量的 CO₂ 被还原成 CH₄,CO₂ 排放量减少,所以稻田 CO₂ 吸收

通量有所回升。施肥和未施肥稻田 CO₂ 吸收通量变化范围为 347.63~730.20 mg·m⁻²·h⁻¹和 205.06~679.51 mg·m⁻²·h⁻¹。施肥和未施肥稻田 CO₂ 的生长季节吸收量分别为 19 020 和 15 927 kg·hm⁻²。

2.3.1.4 稻田温室气体调节

本研究通过不同温室气体的 GWP 值计算得到的稻田生态系统对大气温室气体浓度的综合调节作用,正值表示吸收大气中温室气体,负值表示排放温室气体。研究结果显示,在整个生育期内稻田生态系统对大气温室气体综合调节功能总体趋势是在抽穗扬花期最大,然后逐渐下降,至成熟期略有回升(图 1d)。施肥对稻田生态系统调节大气温室气体有着明显影响。施肥的稻田生态系统抑制 CH₄ 排放,同时少量的 N₂O 排放对温室气体调节只产生轻微影响,因此稻田对大气 CO₂ 调节的变化趋势决定着对温室气体综合调节的变化趋势。未施肥稻田在抽穗扬花期对温室气体调节起着积极作用,其后由于 CH₄ 的大量排放和 CO₂ 吸收通量的降低,稻田对大气温室气体调节起着消极作用,并在播种后 99 d 达到最低(图 1d)。施肥和未施肥的稻田温室气体调节日变化范围分别为 -1.42~39.71 kg·hm⁻²·d⁻¹(CO₂-C 当量)和 -50.56~25.60 kg·hm⁻²·d⁻¹(CO₂-C 当量)。施肥和未施肥的稻田温室气体季节调节物理量分别为 3 774 和 1 135 kg·hm⁻²(均为 CO₂-C 当量)。而 Robertson 等(2000)的研究结果表明,一年生作物系统对大气温室气体没有净吸收作用。该结果与本研究存在差异的主要原因是 Robertson 等(2000)考虑了作物系统中人为投入(化肥、石灰、燃料)生产过程中排放的温室气体,同时认为作物收获也导致农田碳素的损失(CO₂ 排放);而在本研究中,没有计算人为投入温室气体排放,并且将作物固定的碳也计作农田生态系统吸收大气中

CO₂。

2.3.2 稻田生态系统温室气体调节价值量

研究结果显示,在水稻生长发育期间,未施肥稻田 CO₂ 吸收和 N₂O 排放日价值保持相对稳定,而 CH₄ 排放和温室气体调节日价值变化幅度较大,且温室气体调节日价值变化趋势很大程度上受 CH₄ 排放日价值变化趋势影响(图 2)。各气体调节日价值变化范围分别为 10.11 ~ 33.51 yuan·hm⁻²·d⁻¹(CO₂)、- 0.24 ~ - 0.01 yuan·hm⁻²·d⁻¹(N₂O)、- 61.22 ~ - 4.04 yuan·hm⁻²·d⁻¹(CH₄)和 - 38.07 ~ 19.28 yuan·hm⁻²·d⁻¹(GHGs)。

图 2 稻田生态系统温室气体调节价值量

Fig.2 The seasonal fluctuation of values by GHGs regulation from paddy fields

施肥稻田气体调节日价值在水稻生育期内呈现不同的变化趋势:CO₂ 吸收、CH₄ 排放和温室气体调节日价值变化幅度相对较小,而 N₂O 排放日价值出现较大波动,特别是播种后 75 d 施加尿素导致 N₂O 排放的负价值在播种后 79 d 出现极小值(图 2)。由于稻田 N₂O 排放日价值的绝对值相对较小,其在生育期内的大幅波动对温室气体调节综合日价值的影响非常微弱;而 CO₂ 吸收和 CH₄ 排放的价值决定了温室气体调节日价值的变化趋势。在水稻生育期内,各气体调节日价值变化范围分别为 17.14 ~ 36.01 yuan·hm⁻²·d⁻¹(CO₂)、- 0.89 ~ - 0.14 yuan·hm⁻²·d⁻¹(N₂O)、- 18.08 ~ - 5.87 yuan·hm⁻²·d⁻¹(CH₄)和 - 1.07 ~ 29.90 yuan·hm⁻²·d⁻¹(GHGs)。

施肥与否对稻田各温室气体调节日价值有着不同的影响:对稻田 CO₂ 吸收日价值而言,施肥并不比未施肥稻田有显著优势;施肥能明显加剧稻田 N₂O 的排放,增强了稻田 N₂O 排放产生负效应;施肥能有效抑制 CH₄ 排放,缓解了稻田 CH₄ 排放产生的负价值;施加适量肥料可促进稻田对大气温室气体的吸收,发挥稻田对温室气体的积极调节作用。

3 结 论

施肥稻田生物生产量在整个生长季内都大于未施肥稻田,施氮肥的稻田 O₂ 日释放量极值为未施肥稻田极值的 1.5 倍。施肥和未施肥稻田 O₂ 释放的日价值量最大值分别为 190.72 和 289.93 yuan·hm⁻²·d⁻¹。

在整个生育期内,施肥和未施肥稻田 CH₄ 排放通量波动范围分别为 4.86 ~ 14.96 mg·m⁻²·h⁻¹和 3.34 ~ 50.67 mg·m⁻²·h⁻¹;N₂O 排放通量范围分别为: 0.008 6 ~ 0.056 6 mg·m⁻²·h⁻¹和 0.000 6 ~ 0.014 9 mg·m⁻²·h⁻¹;CO₂ 吸收通量变化范围为 347.63 ~ 730.20 mg·m⁻²·h⁻¹和 205.06 ~ 679.51 mg·m⁻²·h⁻¹。以 CO₂ 当量纯 C 计算的施肥和未施肥的稻田温室气体调节通量变化范围分别为 - 1.42 ~ 39.71 kg·hm⁻²·d⁻¹和 - 50.56 ~ 25.60 kg·hm⁻²·d⁻¹。

施肥与未施肥稻田 CO₂ 吸收日价值无显著差异;施肥能明显增加稻田 N₂O 排放产生的负效应,并能有效抑制 CH₄ 排放,缓解了稻田 CH₄ 排放产生的负价值。

参 考 文 献

Adhya TK, Rath AK, Gupta PK, Rao VR, Das SN, Parida KM, Parashar DC, Sethunathan N (1994). Methane emission from flooded rice fields under irrigated conditions. *Biology and Fertility of Soils*, 18, 245 - 248.

Björklund J, Karin EL, Torbjörn R (1999). Impact of production intensity on the ability of the agricultural landscape to generate ecosystem services: an example from Sweden. *Ecological Economics*, 29, 269 - 291.

Cao JL (曹金留), Xu H (徐华), Zhang HK (张宏康), Xing GX (邢光熹), Ren LT (任立涛), Yang BL (杨保林) (1999). Characteristics of N₂O emission from rice fields in the hilly area of southern Jiangsu Province. *Chinese Journal of Ecology* (生态学报), 18(3), 6 - 9. (in Chinese with English abstract)

Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, Paruelo J, O'Neill RV, Paruelo J,

- Raskin RG, Sutton P, van den Belt M (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387, 253 – 260.
- Daily GC (1997). *Nature's Service: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Island Press, Washington DC.
- China Environment Protection Administration (国家环境保护局) (1997). *The National Report of Biodiversity in China* (中国生物多样性国家报告). China Environmental Science Press, Beijing. (in Chinese)
- IPCC (1992). *Climate Change 1992: the Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Jiang JY (蒋静艳), Huang Y (黄耀) (2001). Advance in research of N_2O emission from agricultural soils. *Agro-Environmental Protection* (农业环境保护), 20, 51 – 54. (in Chinese with English abstract)
- Lindau CW, Bollich BK, Delaune RD, Patrick WH, Law VJ (1991). Effect of the urea fertilizer and environment factors on CH_4 emissions from a Louisiana rice field. *Plant and Soil*, 136, 195 – 203.
- Mah RA, Smith MR (1981). The methanogenic bacteria. In: Starr MP, Stolp H, Trüper HG, Balows A, Schlegel HG eds. *The Prokaryotes*. Springer, Berlin, 948 – 977.
- Nouchi I, Hosono T, Aoki K, Minami K (1994). Seasonal variation in methane flux from rice paddies associated with methane concentration in soil water, rice biomass and temperature, and its modeling. *Plant and Soil*, 161, 195 – 208.
- Ouyang ZY (欧阳志云), Wang XK (王效科), Miao H (苗鸿) (1999). A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 19, 607 – 613. (in Chinese with English abstract)
- Paoletti M, Pimentel D, Stinner B, Stinner D (1992). Agroecosystem biodiversity: matching production and conservation biology. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 40, 3 – 23.
- Robertson GP, Paul EA, Harwood RR (2000). Greenhouse gases in intensive agriculture: contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere. *Science*, 289, 1922 – 1925.
- Shangguan XJ (上官行健), Wang MX (王明星) (1993). Measures to control CH_4 emission from paddy fields. *Advance in Earth Sciences* (地球科学进展), 8(5), 55 – 62. (in Chinese with English abstract)
- Singh S, Singh JS, Kashyap AK (1999). Methane flux from irrigated rice fields in relation to crop growth and N-fertilization. *Soil Biology and Biochemistry*, 31, 1219 – 1228.
- Wang XL (王修兰) (1996). The estimation on crop absorbing CO_2 under current and double CO_2 condition in the world. *Acta Meteorologica Sinica* (气象学报), 54, 466 – 473. (in Chinese with English abstract)
- Wang ZP, DeLaune RD, Masscheleyn PH, Patrick JWH (1993). Soil redox and pH effects on methane production in a flooded rice soil. *Soil Science Society of America Journal*, 57, 382 – 385.
- Whalenm SC, Reebergh WS, Kizer KS (1991). Methane consumption and emission by taiga. *Global Biochemical Cycles*, 5, 261 – 273.
- Xie GD (谢高地), Lu CX (鲁春霞), Leng YF (冷允法), Zheng D (郑度), Li SC (李双成) (2003). Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 18, 189 – 196. (in Chinese with English abstract)
- Yang SS, Chang HL (1998). Effect of environmental conditions on methane production and emission from paddy soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 69, 69 – 80.
- Yang SS, Chang HL (1999). Diurnal variation of methane emission from paddy fields at different growth stages of rice cultivation in Taiwan. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 76, 75 – 84.
- Zhou WJ (周卫军), Kai R (凯荣), Zhang GY (张光远) (2003). Some effects of inorganic fertilizer and recycled crop nutrients on soil nitrogen supply and paddy rice production in the red earth region of China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 23, 914 – 921. (in Chinese with English abstract)
- Zou JW (邹建文), Huang Y (黄耀), Zong LG (宗良纲), Zheng XH (郑循华), Wang YS (王跃思) (2003). A field study on CO_2 , CH_4 and N_2O emissions from rice paddy and impact factors. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 23, 758 – 764. (in Chinese with English abstract)

责任编辑: 李凤民 责任编辑: 刘丽娟