

稻田气体调节功能形成机制及其累积过程

肖 玉, 谢高地, 鲁春霞, 吕 耀

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 生态系统服务功能在维持人类生存和发展的环境过程中发挥着重要的作用, 研究生态系统服务功能形成机制以及人类活动的干扰如何影响生态系统功能和服务的实现是今后生态系统服务功能研究的一个重点。选取上海市奉贤县五四农场的一块农田生态系统, 研究其气体调节功能形成和累积过程, 同时研究人类干扰(施氮肥)对农田气体调节功能的影响。研究结果显示, 施肥量对稻田气体调节功能形成和累积过程以及价值累积过程产生较大影响。在所有施肥处理中, 施肥量最高的 N4 处理提供最高的气体调节功能价值, 为 1.98×10^4 yuan · hm⁻²。因此通过微观实验可以研究生态系统服务功能形成机制和累积过程, 并可研究人类干扰造成生态系统服务功能物质量和价值量的变化。

关键词: 稻田生态系统; 生态系统服务功能; 温室气体; 气体调节

文章编号: 1000-0933(2005)12-3282-07 **中图分类号:** Q 149 **文献标识码:** A

Forming mechanism s and accumulat ing processes of gas regulation by rice paddy ecosystem s

XIAO Yu, XIE Gao-Di, LU Chun-Xia, LU Yao (1. Institute of Geographical Science and Natural Resource Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China). Acta Ecologica Sinica, 2005, 25 (12): 3282~ 3288

Abstract Natural ecosystem s provide great benefits to human societies. However, maintaining ecosystem services will require a considerably better understanding of the natural patterns and processes that sustain them. Therefore, the study of the mechanism s of ecosystem services and the effects of human activities on these mechanism s will be one of the most important areas in ecosystem services research. At present, most of the studies on the monetary values of ecosystem services are carried out on the farm, region or country scales. In this study, in order to measure the forming mechanism s and processes of ecosystem services, the authors conducted a detailed valuation study of ecosystem services in a rice paddy field.

This study was based on the results of field experiments in Wusi Farm of Shanghai. The authors examined the fluxes of CH₄ and N₂O and rice biomass. According to a photosynthesis equation, the authors calculated the quantity of net O₂ emission by subtracting O₂ consumption by plant respiration from the total O₂ emission and the net CO₂ fixation by subtracting CO₂ emission by plant respiration from the total CO₂ fixation in the paddy fields. The CO₂ exchange between the atmosphere and the paddy fields was calculated with the net CO₂ fixation subtracted by CO₂ emission by organisms in the paddy soil. Afterwards, monetary values of gas regulation by the paddy fields were estimated with the average of the cost of afforestation and the price of industrial O₂. Due to Global Warming Potentials (GWP) of the different Greenhouse Gases (GHGs), the authors transformed CH₄ and N₂O into CO₂ equivalents. Thus, the monetary values of CH₄ and N₂O emission can be evaluated with the average of the cost of afforestation and the Sweden Carbon Tax.

With respect to physical values, the results indicated that: the daily emission of CH₄ is positively related to biomass production; the daily emission of N₂O is largely related to N fertilization; and the daily O₂ emission and CO₂ absorption change

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30370258 和 30230090); 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KZCX3-SW-333)

收稿日期: 2004-06-16; **修订日期:** 2004-12-10

作者简介: 肖 玉(1976~), 女, 四川省双流县人, 博士, 主要从事生态系统服务功能研究. E-mail: xiaoy@igsnr.ac.cn

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 30370258 and No. 30230090) and the Key Research Program in Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX3-SW-333)

Received date: 2004-06-16; **Accepted date:** 2004-12-10

Biography: XIAO Yu, Ph. D., mainly engaged in ecosystem services. E-mail: xiaoy@igsnr.ac.cn

linearly with biomass production. During the growing season, the total quantity of gas regulation cumulated with time. The accumulation of CO₂ fixation, N₂O emission and O₂ emission all increased with N fertilization, whereas CH₄ emission decreased with N addition. For monetary values, this study showed that the accumulative monetary values of O₂ emission and CO₂ absorption increased throughout the growing season. But the accumulation of negative monetary values of CH₄ and N₂O emission also intensified meanwhile. Of all fertilization experiments, the paddy fields fertilized with 525 kg · hm⁻² urea were estimated to have the highest monetary values of GHGs regulation.

Field experiments such as those used in this study can provide one of the most convenient ways for examining the forming mechanisms and accumulating processes of ecosystem gas regulation, as well as the effects of human activities on these ecosystem services. Improving our understanding of the changing mechanisms of ecosystem services can help mitigate the degradation of ecosystem services, and sustain the human welfare supplied by ecosystem services.

Key words: rice paddy ecosystem s; ecosystem services; greenhouse gases; gas regulation

随着生态系统服务功能概念、评估理论和方法技术的研究不断扩展,生态系统服务功能的影响日益扩大,对其内涵的认识也日益深入^[1-3]。同时作为生态系统服务功能服务的对象以及生态系统服务功能价值评估的主体,人类对生态系统服务功能形成产生重要影响。在自然过程中,人类活动显著的干扰着生态系统服务功能形成以及变化过程。因此,研究生态系统服务功能形成机制以及人类活动干扰如何影响生态系统服务和功能的实现是今后生态系统服务功能研究的一个重点。目前生态系统服务功能价值评估一般在较大尺度上进行(如农场、城市、流域、国家等)^[3,4],但在这些尺度上难以研究生态系统服务功能形成机制及其变化过程,主要是在研究中评价指标的选取和实验的可行性受到限制,而微观的研究能弥补这些不足。因此本文选取上海市奉贤县五四农场的一块农田生态系统,研究其气体调节功能形成和累积过程,同时研究人类干扰(施氮肥)对农田生态系统气体调节服务功能的影响,揭示人类活动干扰下,生态系统服务功能的形成机制以及变化过程。

1 实验和方法

1.1 研究区概况

上海五四农场现代化农业园区位于上海市南郊,奉贤县东南,杭州湾北缘。五四农场地处北温带,具有明显的北亚热带季风气候特征,冬冷夏热,四季分明,日照较多,降水充沛。五四农场土地由20世纪60年代与70年代2次在滩涂上围垦而成,地势平坦开阔。实验共设计5个施氮水平处理,分别为:N0 0 kg · hm⁻²、N1 225 kg · hm⁻²、N2 300 kg · hm⁻²、N3 375 kg · hm⁻²和N4 525 kg · hm⁻²,每个处理设3次重复,小区随机分布。除施氮水平之外,小区其他投入及管理措施与大田常规管理相同。

1.2 主要研究方法

稻田生态系统气体调节功能包括:释放O₂、吸收CO₂、排放CH₄和N₂O。运用不同的方法测定稻田气体调节的物质质量,然后运用经济学方法估算稻田生态系统气体调节价值。

1.2.1 稻田气体排放实验监测及其排放量和价值计算

(1) 气体排放的监测 本试验测定稻田主要生育期气体(CH₄和N₂O)的排放通量,采用静态箱法进行人工采集气体样品。箱体由50cm × 50cm × 95cm (L × W × H)的透明有机玻璃板制成,下配带有水封槽的不锈钢支架以使气箱固定在水田中并密封气箱。箱顶固定一个小电风扇(12V),用于混合采样气箱中空气和平衡温度,另有一个温度计从顶部深入气箱1/2深处用于测量气箱内空气温度。采样管以同样深度深入气箱内,气箱外的一端连接塑料三通阀,用于注射器抽取气体,然后转存入气袋中进行分析。CH₄和N₂O利用惠普5890 II型气相色谱仪分析。

(2) 不同生育期气体排放通量计算方法 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:

$$F = \frac{dm}{A \cdot dt} = \frac{dc \cdot V \rho}{A \cdot dt} = \frac{dc \cdot hA \rho}{A \cdot dt} = \frac{dc}{dt} \cdot h \rho = \frac{MPh}{RT} \cdot \frac{dc}{dt} \quad (1)$$

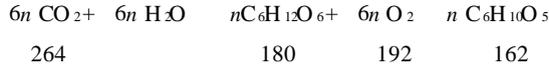
式中, F 为气体排放通量(mg · m⁻² · h⁻¹), ρ 为气体密度, R 为气体常数, dm 、和 dc 分别为 dt 时间内采集箱内气体质量和浓度的变化, h 、 A 、 V 分别为气箱高度(m)、底面积(m²)和体积(m³), M 为气体分子量, T 为气箱内温度(°C), P 为气箱内气压(Pa)。

(3) 稻田气体排放量计算 参照IPCC^[5]推荐方法估算稻田甲CH₄和N₂O排放量,即日排放量等于该日排放通量乘以24h,而该段时间内气体排放量等于该段时间的平均排放通量乘以该段时间长度。

(4) 稻田气体排放的价值计算 稻田生态系统CH₄和N₂O气体排放对目前全球变暖有着重要影响。研究中通过增温势^[5](GW P-Global Warming Potentials,以CO₂的GW P为1)将相同质量的不同温室气体换算为等温室效应的CO₂。对于100a时间尺度的气候变化,CH₄和N₂O的GW P分别为24.5和320^[4]。据此可以将CH₄和N₂O换算为CO₂,运用造林成本法

(0.2609 yuan · kg⁻¹)和碳税法(1.245 yuan · kg⁻¹)计算其气体调节的价值^[3]。因为稻田生态系统CH₄和N₂O的排放会造成了全球气温的增高,导致了許多全球环境问题,其生态服务功能的价值将是一个负值。

1.2.2 稻田干物质生产量的测定和释放O₂、吸收CO₂物质和价值量的估算 同时利用样方收获法在水稻关键生育期(包括:拔节期、孕穗期、齐穗期和成熟期)测定水稻干物质生产量,然后通过光合作用方程计算稻田生态系统释放O₂和吸收CO₂物质质量:



植物体每积累 1 g 干物质,释放 1.19 g O₂,吸收 1.63g CO₂。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在光合作用过程中释放O₂和净吸收CO₂量(总吸收量减去植物呼吸),将其在生育期内平均,可得到该生育期内的日变化量。而稻田CO₂的通量除了植株净吸收的CO₂,土壤呼吸也将释放CO₂。研究表明,南京稻田无植株土壤的CO₂排放通量在整个生育期变化不大,平均为 47.60kg · hm⁻² · d⁻¹^[6]。因此,稻田生态系统CO₂综合通量为植株净吸收通量减去土壤呼吸通量。在计算稻田生态系统释放O₂的价值时,取造林成本法(0.3529 yuan · kg⁻¹)和工业制氧法(0.4 yuan · kg⁻¹)所计算的价值均^[3]。稻田生态系统CO₂吸收的价值运用造林成本法(0.2609 yuan · kg⁻¹)和碳税法(1.245 yuan · kg⁻¹)的均值计算其价值^[3]。

2 结果与分析

2.1 稻田生态系统干物质日产生量和累积量形成过程

实验地水稻以直播方式于 6 月 7 日播种,当年 10 月 15 日收获,生长期为 130d。重要生育期包括:拔节期(6 月 7 日~ 8 月 21 日)、孕穗期(8 月 22 日~ 9 月 1 日)、齐穗期(9 月 2 日~ 9 月 13 日)和成熟期(9 月 14 日~ 10 月 15 日)。分别于各生育期结束时用样方法测定其生物生产量,研究其干物质日产生量和累积量。在不同施肥处理下,稻田生态系统干物质日产生量在孕穗期显著增加,N₄处理日干物质产生量达到最大值;其他 3 种施肥处理在齐穗期也达到最大值。拔节期以后的孕穗期和齐穗期由于水稻叶面积达到最大,同时稻穗开始分化,是稻株生长量迅速增加的时期。成熟期,水稻植株光合作用减弱,而呼吸作用却增强,稻田生态系统净生物量日产生量不断下降,在收获前出现负值(图 1a)。

稻田干物质累积量最大值出现在齐穗期,其后水稻呼吸作用强度超过光合作用,干物质累积量呈下降趋势。实验区不同施肥处理水稻在收获时的干物质质量均值为:20.75 × 10³ kg · hm⁻²,接近徐琪等^[7]在太湖地区稻田生态系统中测定的单季稻干物质质量 16.27 × 10³ kg · hm⁻²。从实验结果来看,施氮量对干物质累积量有显著影响。这主要是由于在水稻返青分蘖期,水稻对氮素营养的要求很高,充分的氮素供应能促进水稻有效分蘖,形成合理的叶面积,培养强大根群,为以后生育期的干物质的增加提供重要的物质基础。因此单位面积施氮量高的N₃和N₄水稻干物质累积量明显高于N₀和N₁(图 1b)。

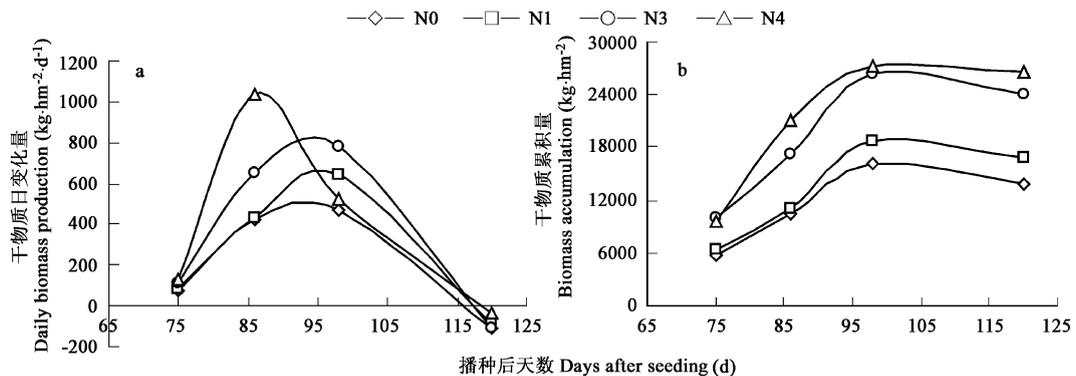


图 1 稻田生态系统干物质日产生量变化(a)及其累积过程(b)

Fig. 1 Daily production (a) and cumulation process (b) of biomass by rice paddy ecosystems

由于数据不全,未采用N₂的实验结果,下同 without N₂ for data lacking, the same below

2.2 稻田生态系统气体调节功能实物量形成过程

2.2.1 稻田生态系统生育期内释放O₂过程 稻田生态系统中水稻植株通过光合作用合成有机质,并释放O₂,对调节大气组分平衡起着非常重要的作用。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日释放量和累积释放量的变化趋势与稻田生态系统干物质生产量日变化和干物质累积量变化趋势一致(图 2a)。稻田生态系统O₂日释放量在拔节期以前由于光合作用较弱,所以增长缓慢,孕穗期光合作用强度增大,O₂日释放量迅速增加,在齐穗期达到最大

值, 然后随着光合作用的减弱, O₂ 日释放量急剧下降, 至收获前减少到零(图 2a)。稻田生态系统 O₂ 释放量累积过程与水稻干物质累积过程非常相似。拔节期以前, O₂ 释放累积量增加缓慢, 在孕穗期明显增加, 至齐穗期达到最大, 其后由于稻田光合作用几乎停止, O₂ 释放累积量几乎不再变化(图 2b)。

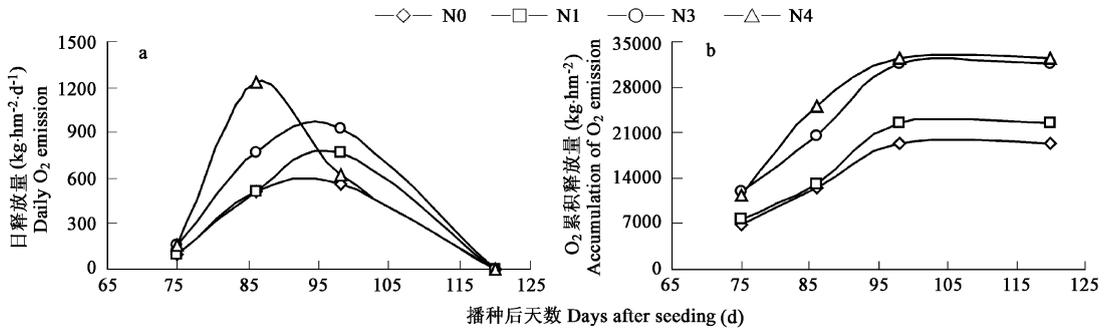


图 2 稻田生态系统 O₂ 日释放量变化(a)和释放量累积过程(b)

Fig 2 Change of the daily emission (a) and the accumulation emission (b) of O₂ of rice paddy ecosystems

2 2 2 稻田生态系统生育期内吸收 CO₂ 过程 稻田生态系统 CO₂ 总吸收通量与生物量和 O₂ 排放量变化趋势相似。生长最旺盛的齐穗期光合作用强度最大, 植株 CO₂ 日吸收量迅速增加, 总吸收量达到最大值; 成熟期植株光合作用的减弱乃至停止, 致使稻田 CO₂ 总日吸收量不断下降, 在收获期前, 由于土壤和植株排放 CO₂ 的增加, 稻田生态系统综合 CO₂ 通量为负值(图 3a)。从稻田生态系统 CO₂ 吸收量累积过程来看, 施用氮肥促进了 CO₂ 的吸收(图 3b)。

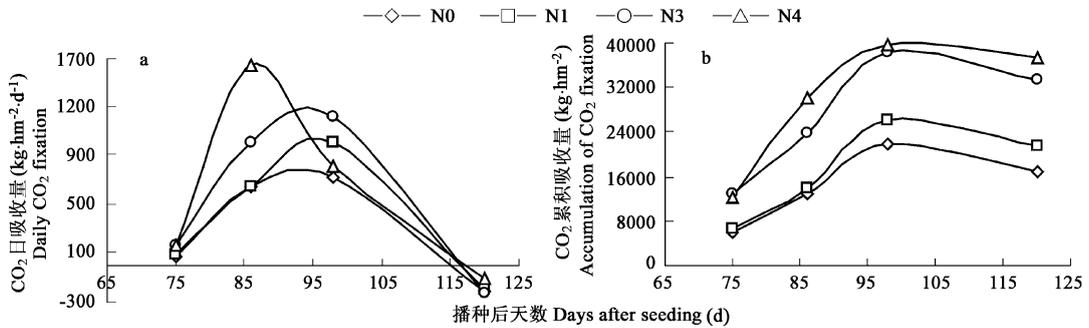
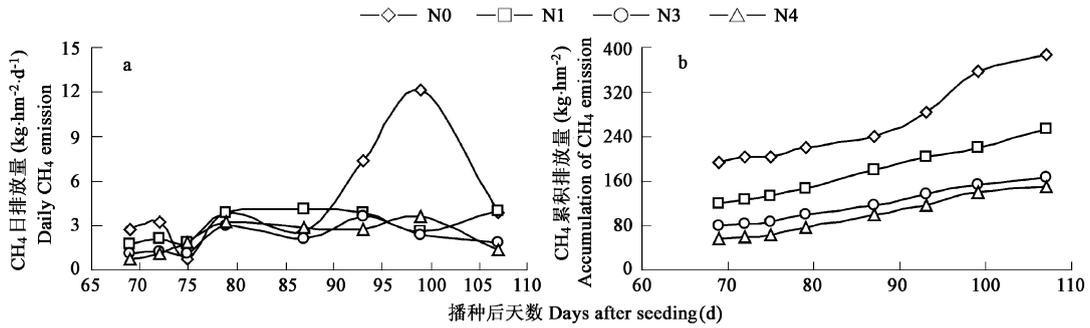


图 3 稻田生态系统 CO₂ 日吸收量变化(a)和吸收量累积过程(b)

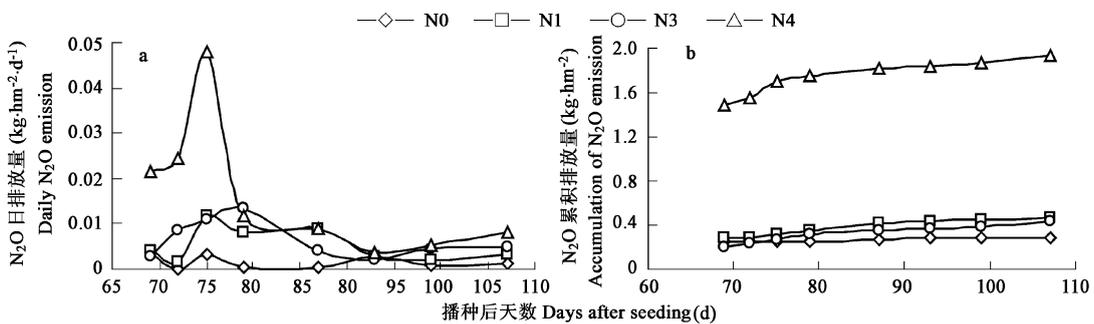
Fig 3 Change of the daily assimilation (a) and the cumulation assimilation (b) of CO₂ of rice paddy ecosystems

2 2 3 稻田生态系统生育期内 CH₄ 排放过程 稻田 CH₄ 日排放量呈现两种不同的变化趋势: 未施氮肥处理在前期保持了较低的 CH₄ 排放, 但在成熟期出现了一个非常高的峰值; 3 个施氮肥处理 CH₄ 排放保持了相对一致的日排放量变化趋势。有研究表明, 稻田 CH₄ 日排放通量与水稻干物质积累成正相关关系^[8], 且在拔节盛期至抽穗期之间的 CH₄ 排放量占全生长期 CH₄ 排放总量的一半^[9]。本研究中, 3 个施氮处理的稻田生态系统几乎都在水稻干物质质量日产生量最显著的拔节期和齐穗期之间达到峰值。这一时期上茬作物残茬或有机肥提供了大量产 CH₄ 的有机质, 同时高温促进了细菌对土壤中有有机质的发酵分解, 还形成利于 CH₄ 菌生长的还原环境, 增强了 CH₄ 菌的微生物活性^[10]。而对于未施氮肥的 N0 处理的稻田土壤 CH₄ 菌在成熟期保持了良好的活性, 土壤中衰老的水稻根系腐烂分解又为 CH₄ 提供了部分的前体, 其 CH₄ 日排放量在收获前才出现峰值, 且远高于其他几种施肥处理(图 4a)。研究区不同施肥处理 CH₄ 平均排放通量范围为 2.21~ 4.59kg · hm⁻² · d⁻¹, 接近戴爱国等^[11]在杭州测定结果 9.3 kg · hm⁻² · d⁻¹。结果偏低的主要原因是杭州稻田土壤有机质含量 2.5%, 研究中土壤有机质含量为 1.2%~ 1.4%。施肥对稻田 CH₄ 累积排放量也有明显影响。在施用氮肥的稻田土壤中, 大量 NH₄⁺ 促进了 CH₄ 的氧化或抑制了 CH₄ 菌的活性, 从而导致 CH₄ 累积排放量的减少^[8]。因此, 至生育期结束, 随着施氮量的增加, 稻田 CH₄ 累积排放量逐渐减少(图 4b)。

2 2 4 稻田生态系统生育期内 N₂O 排放过程 稻田土壤通过硝化作用将 NH₄⁺ 氧化为 NO₂⁻ 和 NO₃⁻; 在缺乏 O₂ 的条件下, 通过反硝化作用将 NO₂⁻ 和 NO₃⁻ 还原为气态氮(N₂ 和氮的氧化物, 包括 N₂O)。稻田 N₂O 日排放量变化趋势与很多因素有关: 土

图4 稻田生态系统CH₄日排放量变化(a)和排放量累积过程(b)Fig. 4 The change of the daily emission (a) and the accumulation emission (b) of CH₄ of rice paddy ecosystem s

壤通气状况、土壤水分含量、施肥状况、土壤有机质、土壤pH值、土壤温度等。实验结果显示,未施氮肥(N1)的稻田在整个生育期内N₂O的日排放量保持较低的水平;而施氮量超过一定水平(N4),稻田N₂O日排放量急剧增加,并在孕穗期达到最大值(图5a)。本实验中,在孕穗期前后出现N₂O日排放量高峰的一个主要原因是在8月20日对除了N0以外的小区施用了不同量的尿素,为N₂O的产生提供了足够的氮源,促进了N₂O的形成。本研究中不同施肥处理稻田N₂O排放通量均值范围为0.0015~0.165 kg·hm⁻²·d⁻¹,与南京江宁区稻田N₂O排放通量0.0556 kg·hm⁻²·d⁻¹(施氮量为333 kgN·hm⁻²)较为接近^[6]。施氮肥显著促进了稻田N₂O累积排放量的增加,生育期结束时,过量施肥的N4处理N₂O累积排放量是N0处理的6倍多(图5b)。

图5 稻田生态系统N₂O日排放量变化(a)和排放量累积过程(b)Fig. 5 Change of the daily emission (a) and the cumulation emission (b) of N₂O by rice paddy ecosystem s

2.3 稻田生态系统气体调节功能价值量累积过程

伴随着水稻生物量形成过程,稻田气体调节功能的价值逐渐形成,并不断累积。稻田生态系统气体调节功能价值量累积过程体现了稻田生态系统在生育期内所排放或吸收的各种气体对调节大气组分的累积贡献。在稻田气体调节功能中,释放O₂和吸收CO₂属于对人类福利有积极贡献的功能,其累积过程是正效应不断增强的过程。在不同的施肥处理下,生育期结束时N4施肥处理稻田释放O₂的累积价值(图6a)和CO₂吸收累积价值都最高(图6b)。至生育期结束,不同施肥处理稻田释放O₂的累积价值量为6.74×10³~13.01×10³yuan·hm⁻²,而CO₂吸收的累积价值量为3.48×10³~7.70×10³yuan·hm⁻²。

CH₄和N₂O的排放导致了全球效应的增强,而且稻田目前也作为一个主要的温室气体排放源被广泛研究。因此,稻田生态系统排放CH₄和N₂O的价值累积过程是稻田气体调节负效应不断增加的过程。至生育期结束,不同施氮处理的稻田生态系统排放CH₄的累积价值为-754~-1954 yuan·hm⁻²;排放N₂O的累积价值为-19~-127 yuan·hm⁻²(图7a和7b)。综合稻田生态系统各项气体调节功能累积价值,4种施肥处理稻田气体调节功能价值分别为0.82×10⁴、1.08×10⁴、1.65×10⁴和1.98×10⁴yuan·hm⁻²,施氮量最大的N4处理提供了最高的气体调节累积价值。这主要是因为,O₂释放和CO₂固定在气体调节功能价值占绝对优势,而这两个气体调节功能与稻田生物量生产存在线性关系,因此生物生产量最高的N4处理提供了最高的气体调节功能价值。

3 结论和讨论

生态系统服务功能在维持人类生存环境的过程中发挥着重要的作用,但是随着人口数量的急剧增加,人类对资源的需求日益加剧,自然资源与环境面临巨大的压力。人类对生态系统服务功能形成及其变化产生越来越显著的影响。农田生态系统是历

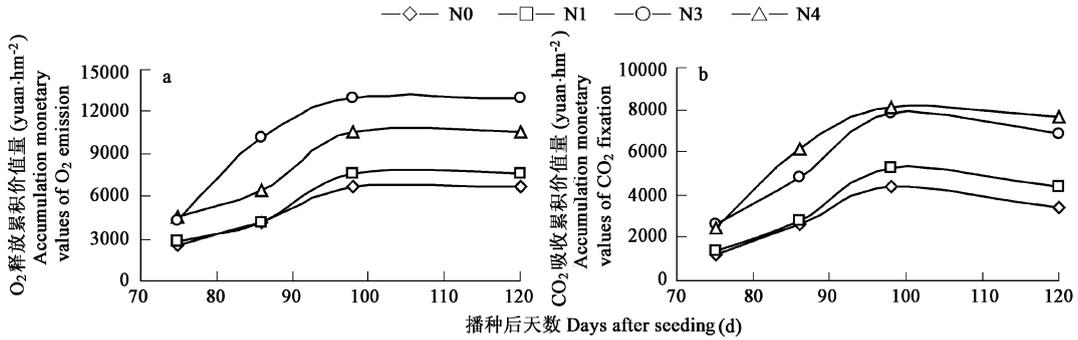


图 6 稻田生态系统O₂释放(a)和CO₂吸收(b)价值量累积过程

Fig. 6 Accumulation process of the values of O₂ emission (a) and CO₂ fixation (b) of rice paddy ecosystem s

史最为悠久的人工生态系统,是研究人类活动如何作用于生态系统服务功能的形成以及累积过程最为理想的场所。对人类干扰下农田生态系统服务功能进行研究,深入认识农田生态系统服务功能形成和变化的机制,从而通过控制人类活动对生态系统服务功能的影响,最大程度发挥生态系统服务功能维护人类福利的作用。

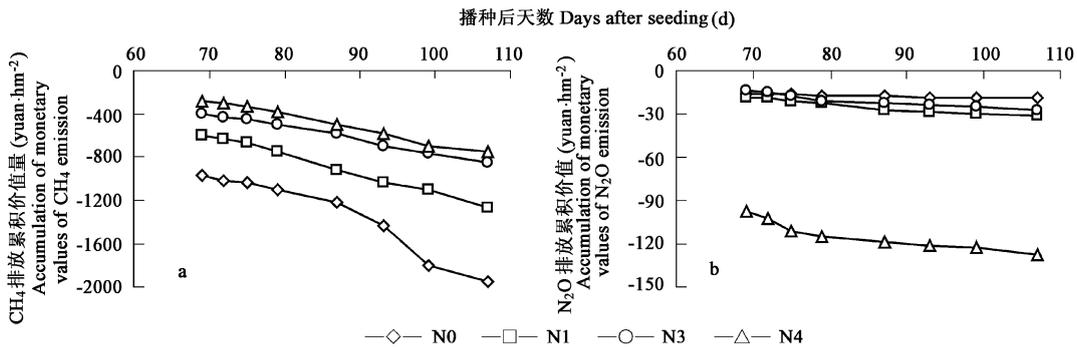


图 7 不同施肥处理稻田生态系统排放CH₄(a)和N₂O(b)价值量累积过程

Fig. 7 Accumulation process of the values of CH₄(a) and N₂O (b) emission of rice paddy ecosystem s

通过以上的研究表明,施肥可以显著影响稻田生态系统气体调节的物质质量和价值量的形成及其累积过程。由此可见,通过微观实验可以研究生态系统服务功能形成和累积过程,并可研究人类干扰造成生态系统服务功能物质质量和价值量的变化。而如何通过尺度转换,将如此微观的研究结果用于较为宏观生态系统服务功能价值评估以及国家的决策过程还是目前研究的一个难点问题。目前某些专家使用了“效益转换”的方法将一个地方同种生态系统服务功能价值评估结果用于另一个地方^[12],当然这没有涉及尺度推移的问题,但可以参考效益转换的思路,来进行尺度推移。同时景观生态学中尺度推移的方法:如直接外推法、显式积分法、期望值外推法等等^[13]可以进行借鉴。但是,“理论上可行的”到“实践中可用的”还存在很大距离,需要在以后研究中不断探索。

References

[1] Daily G C ed *Nature's Service: Societal Dependence on Natural Ecosystems*, Washington D C, Island Press, 1997.

[2] Costanza R d'Arge R, de Groot R *et al* The value of the world's ecosystem services and nature *Nature*, 1997, **387**: 253~ 260

[3] Ouyang Z Y, Wang X K, Miao H. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values *Acta Ecologica Sinica*, 1999, **19**(5): 607~ 613

[4] Bj rklund J, Limburg E, Rydberg T. Impact of production intensity on the ability of the agricultural landscape to generate ecosystem services: an example from Sweden, *Ecological Economics*, 1999, **29**: 269~ 291.

[5] IPCC. Climate Change The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment *Intergovernmental Panel on Climate Change* Cambridge (UK): Cambridge University Press, 1992

[6] Zou J W, Huang Y, Zong L G, *et al* A field study on CO₂, CH₄ and N₂O emissions from rice paddy and impact factors *Acta Scientiae*

- Circum stantiae*, 2003, **23**(6): 758~ 764
- [7] Xu Q, Yang L Z, Dong Y H, *et al*. *Rice field ecosystem in China*. Beijing: Chinese Agricultural Press 1998
- [8] Huang Y, Sass R L and Fisher F M. The impact of rice production on methane emission in rice paddy. *Agro-environmental Protection*, 1999, **18**(4): 150~ 154
- [9] Tao Z, Tian S X, Zhou Y, *et al*. Study on the methane emission from one season rice fields with different fertilization. *Agro-environmental Protection*, 1993, **12**(3): 193~ 197.
- [10] Wang M X. *CH₄ emission of paddy rice in China*. Beijing: Science Press 2001.
- [11] Dai A G, Wang M X, Shen R X, *et al*. CH₄ emission in Autumn by paddy fields of Hangzhou, China. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1991, **15**(1): 102~ 110
- [12] Ruijgrok E C M. Transferring economic values on the basis of an ecological classification of nature. *Ecological Economics*, 2001, **39**: 399~ 408
- [13] Wu J G. *Landscape Ecology: Pattern, Process, Scale and Hierarchy*. Beijing: Higher Education Press, 2001.

参考文献:

- [3] 欧阳志云, 王效科, 等. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究. *生态学报*, 1999, **19**(5): 607~ 613
- [6] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 稻田 CO₂, CH₄ 和 N₂O 排放及其影响因素. *环境科学学报*, 2003, **23**(6): 758~ 764
- [7] 徐琪, 杨林章, 董元华, 等. *中国稻田生态系统*. 北京: 中国农业出版社, 1998
- [8] 黄耀, Ronald L Sass 和 Frank M Fisher. 水稻物质生产对稻田甲烷排放的影响. *农业环境保护*, 1999, **18**(4): 150~ 154
- [9] 陶战, 田淑贤, 周毅, 等. 不同施肥处理的一季稻甲烷排放量研究. *农业环境保护*, 1992, **12**(5): 193~ 195
- [10] 王明星. *中国稻田甲烷排放*. 北京: 科学出版社, 2001.
- [11] 戴爱国, 王明星, 沈壬兴, 等. 我国杭州地区秋季稻田的甲烷排放. *大气科学*, 1991, **15**(1): 102~ 110
- [13] 邬建国. *景观生态学——格局、过程、尺度与等级*. 北京: 高等教育出版社, 2001.