

引文格式: 冯小平, 余磊, 韩自强, 等. 氮素调控对冬小麦—夏玉米一年两熟 N_2O 排放及产量的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2023, 38(1): 9–17. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202205020](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202205020)

氮素调控对冬小麦—夏玉米一年两熟 N_2O 排放及产量的影响*

冯小平¹, 余磊¹, 韩自强¹, 戴馨¹, 董萧², 董召荣¹, 车钊^{1**}
(1. 安徽农业大学农学院, 安徽合肥 230036; 2. 安徽农业大学工学院, 安徽合肥 230036)

摘要:【目的】探究氮素调控对江淮丘陵地区冬小麦—夏玉米一年两熟(麦玉两熟) N_2O 排放及产量的影响, 为该地区小麦和玉米稳产减排提供理论依据。【方法】以江淮丘陵地区麦玉两熟为研究对象, 设置不施氮肥(CK)、常规施氮(CN)、生物炭与氮肥配施(SN)、硝化抑制剂与氮肥配施(XN)和叶面喷肥(PN) 5 个处理, 采用静态箱—气相色谱法, 分析不同氮素调控措施下土壤 N_2O 排放和作物产量变化。【结果】土壤 N_2O 排放呈季节性变化, 主要集中在施肥和降雨后的 15 d 内, 玉米季是排放高峰期。与 CN 处理相比, 小麦季 XN 和 SN 处理的 N_2O 累积排放量分别显著降低 46.07% 和 25.10%, 玉米季 XN、SN 和 PN 处理的 N_2O 累积排放量分别显著降低 70.70%、64.01% 和 9.87%。从周年排放看, XN 和 SN 处理的 N_2O 累积排放量比 CN 处理分别显著降低 59.36% 和 46.21%, PN 与 CN 处理间无显著差异。与 CN 处理相比, XN 和 SN 处理的作物周年产量分别显著增加 13.35% 和 11.27%, N_2O 排放系数分别显著降低 59.50% 和 46.28%。【结论】综合考虑 N_2O 排放和作物产量, 硝化抑制剂与氮肥配施可作为江淮丘陵地区麦玉两熟稳产减排的最佳氮肥调控措施。

关键词: 麦玉两熟; 氮素调控; 生物炭; DMPP; N_2O ; 产量

中图分类号: S512.110.62 文献标志码: A 文章编号: 1004-390X (2023) 01-0009-09

Effects of Nitrogen Regulation on N_2O Emission and Yield of Wheat-maize Double Cropping System

FENG Xiaoping¹, YU Lei¹, HAN Ziqiang¹, DAI Xin¹,
DONG Xiao², DONG Zhaorong¹, CHE Zhao¹

(1. College of Agronomy, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China;
2. College of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: [Purpose] To explore the effects of nitrogen regulation on N_2O emission and yield of wheat-maize double cropping system in Jianghuai hilly region, so as to provide a theoretical basis for stable yield and emission reduction of wheat and maize in this area. [Methods] Taking wheat-maize double cropping system of Jianghuai hilly region as the research object, five treatments including no nitrogen fertilizer (CK), conventional nitrogen application (CN), combined application of biochar with nitrogen (SN), combined application of nitrification inhibitor with nitrogen (XN) and fo-

收稿日期: 2022-05-12

修回日期: 2022-12-30

网络首发日期: 2023-02-27

*基金项目: 安徽省高等学校自然科学研究重点项目(KJ2019A0177); 农田生态保育与污染防治安徽省重点实验室开放基金项目(FECP202002)。

作者简介: 冯小平(1989—), 男, 四川恩阳人, 在读硕士研究生, 主要从事耕作与农业生态系统研究。

E-mail: fxp01233@163.com

**通信作者 Corresponding author: 车钊(1990—), 男, 安徽利辛人, 博士, 实验师, 主要从事耕作与农业生态系统研究。E-mail: cz17@ahau.edu.cn

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20230227.1100.003.html>



liar topdressing (PN) were set. The changes of soil N_2O emissions and crop yield in different nitrogen control measures were analyzed by static box-gas chromatography. [Results] The soil N_2O emissions showed seasonal changes, and N_2O emissions were mainly concentrated within 15 days after fertilization and rainfall, and the maize season was the peak of emissions. Compared with CN treatment, the cumulative N_2O emission of XN and SN treatments in wheat season decreased significantly by 46.07% and 25.10%, respectively, and the cumulative N_2O emissions of XN, SN and PN treatments in maize season decreased significantly by 70.70%, 64.01% and 9.87%, respectively. In terms of annual emissions, the cumulative N_2O emissions of XN and SN treatments were significantly lower than that of CN treatment by 59.36% and 46.21%, respectively, and there was no significant difference between PN and CN treatments. Compared with CN treatment, the annual crop yield of XN and SN treatments increased significantly by 13.35% and 11.27%, respectively, and the N_2O emission coefficient decreased significantly by 59.50% and 46.28%, respectively. [Conclusion] Considering N_2O emission and crop yield, combined application of nitrification inhibitor with nitrogen can be used as the best nitrogen regulation measure for stable yield and emission reduction of wheat-maize double cropping system in Jianghuai hilly region.

Keywords: wheat-maize double cropping system; nitrogen regulation; biochar; DMPP; N_2O ; yield

江淮丘陵地区是安徽省重要的粮食生产基地^[1],在国家粮食安全中有着十分重要的地位。冬小麦—夏玉米一年两熟(以下简称“麦玉两熟”)是该地区的主要种植方式,为确保产量,化肥投入处于较高水平,氮肥用量达 240 kg/hm^2 ^[2]。高氮肥投入在增加粮食产量的同时也增加了 N_2O 等温室气体的排放^[3-4]。 N_2O 是主要的温室气体之一,其增温潜势在 100 年尺度下是 CO_2 的 296 倍^[5]。因此,在江淮丘陵麦玉两熟生产中,寻求合理的田间管理措施、确保粮食产量的同时减少 N_2O 排放,对保障国家粮食安全和推进农业绿色发展意义重大。

一般研究认为,硝化和反硝化过程是土壤 N_2O 排放的主要途径^[6],作为硝化和反硝化微生物的底物, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量直接影响土壤 N_2O 排放^[7]。氮素调控影响土壤氮素转化,进而影响土壤 N_2O 排放。有研究表明:合理的氮素调控措施可提高作物产量并减少温室气体排放^[8-9],但不同氮素调控措施对土壤 N_2O 排放的影响机制并不相同。生物炭是生物质在限氧条件下经高温热裂解产生的非纯净混合物,具有疏松多孔、吸附力强和稳定性高等特点^[10]。施用生物炭可提升土壤透气性和增加土壤 O_2 含量,富氧环境对土壤反硝化作用产生抑制,减少氮素的气态损失,进而降低土壤 N_2O 排放和提高作物产量^[11-12]。

3,4-二甲基吡唑磷酸 (DMPP) 是一种新型的硝化抑制剂,可抑制土壤硝化作用,减少氮素淋溶损失,进而增加作物产量和减少土壤 N_2O 排放^[13]。叶面喷肥是根外追肥的重要方式之一,一方面,叶面喷施氮追肥可通过减少土壤中的氮肥用量降低土壤 N_2O 排放;另一方面,后期叶面喷肥可延缓植株衰老,增加作物产量^[14]。纵观当前研究,大都基于某单一氮素调控措施对土壤 N_2O 排放和作物产量的影响,关于不同氮素调控措施对江淮丘陵地区麦玉两熟 N_2O 排放和产量影响的研究尚未见报道。因此,本研究以江淮丘陵地区麦玉两熟为研究对象,探究不同氮素调控措施对土壤 N_2O 排放和作物产量的影响,为该地区小麦和玉米稳产减排提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于安徽省合肥市大杨镇安徽农业大学试验农场 ($\text{N}31^\circ 94'$, $\text{E}117^\circ 21'$) 进行。该地区属于亚热带季风气候,年均气温 15.3°C ,年降水量 1000 mm ,土壤类型为黄褐土。试验前耕层 $0\sim 20 \text{ cm}$ 土壤理化性质为: pH 值 6.42,有机质含量 19.01 g/kg ,碱解氮含量 80.91 mg/kg ,全氮含量 1.31 g/kg ,有效磷含量 17.12 mg/kg ,速效钾含量 190.29 mg/kg ,容重 1.26 g/cm^3 。

1.2 试验设计

本试验采取随机区组设计, 共设置 5 个处理: 不施氮肥 (CK)、常规施氮 (CN)、生物炭与氮肥配施 (SN)、DMPP 与氮肥配施 (XN) 和叶面喷肥 (PN)。小区面积为 15 m² (3 m×5 m), 每个处理设 3 个重复。

小麦季氮 (N)、磷 (P₂O₅)、钾 (K₂O) 用量分别为 240、150 和 120 kg/hm²。氮肥采用尿素为肥源, 按照 7:3 的比例作基肥 (播种前 1 d) 和追肥 (拔节期) 施用, 磷、钾肥作基肥一次性施用。SN 处理将 15000 kg/hm² 稻壳炭 (含 C 53.71%、N 0.43%、P 0.68%、K 8.71%, pH 10.31) 同基肥一起施用, 其中氮、磷、钾计入基肥用量, 确保施肥量与其他处理保持一致。XN 处理中 DMPP 按照基肥尿素用量的 1% 与尿素混合作基肥一起施用。PN 处理中, 在拔节期撒施氮肥 10.64 kg/hm² 用于追肥, 剩余追肥从小麦灌浆开始分 4 次进行叶面喷施, 每隔 1 周喷施 1 次, 每次喷施将尿素配成 1% 的溶液均匀喷洒在作物叶片上, 其他处理喷洒等体积纯水, 以减少因水分不同造成的影响。小麦品种为皖麦 68, 条播, 行距 25 cm, 基本苗 375 万株/hm², 12 月 1 日播种。

玉米季氮 (N)、磷 (P₂O₅)、钾 (K₂O) 用量分别为 240、107.1 和 112.5 kg/hm²。氮肥基追比为 3:7, 磷、钾肥作基肥一次性施用。SN 处理中生物炭在该季不再施用。XN 处理中 DMPP 按照氮肥基肥尿素用量的 1% 和尿素混合同基肥一起施入。PN 处理中, 在大喇叭口期撒施氮肥 106.64 kg/hm² 用于追肥, 剩余追肥从玉米灌浆开始分 4 次进行叶面喷施, 喷施方式同小麦季。玉米品种为郑单 958, 条播, 行距 60 cm, 基本苗 6 万株/hm², 次年 6 月 18 日播种。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 气体采集与分析

采用静态箱—色谱法。静态箱分底座和采样箱两部分, 不锈钢底座规格为 50 cm×50 cm×10 cm, 亚克力板采样箱规格为 50 cm×50 cm×50 cm。采样时间为 08:00—11:00, 施肥后 15 d 内每 3 d 采样 1 次, 后期 7 d 采样 1 次。采样时, 在底座上扣好采样箱, 先混匀箱体内气体, 再用注射器抽取气体 40 mL, 于 0、7、14 和 21 min 各采样 1 次, 带回实验室用 Agilent 7890A 气相色谱仪分析 N₂O 含量, 同时用 Em50 记录土壤

温、湿度。

N₂O 排放通量、累积排放量和排放系数的计算按照以下公式^[15-16]进行:

$$F = \rho \times h \times (d_e/d_i) \times 273 / (273 + T);$$

$$C = \sum_{i=1}^n (F_{i+1} + F_i) / 2 \times (d_{i+1} - d_i) \times 24 \times 0.01;$$

$$E = (C_N - C_0) / N \times 100\%。$$

式中: F 为 N₂O 排放通量, mg/(m²·h) 或 μg/(m²·h); ρ 为标准状态下气体的密度, kg/m³; h 为采样箱的净高度, m; d_e/d_i 为每小时箱内 N₂O 体积分数的变化率; 273 为气态方程常数; T 为箱内平均温度, °C; C 为累积 N₂O 排放量, kg/hm²; i 为第 i 次采样, $d_{i+1}-d_i$ 为相邻 2 次采样间隔天数; n 为采样次数; 0.01 为转换系数; E 为 N₂O 排放系数; C_N 和 C_0 分别为施氮处理和不施氮处理 N₂O 累积排放量, kg/hm²; N 为施氮量, kg/hm²。

1.3.2 土壤无机氮测定

每次采气时采集 0~10 cm 土层土样, 磨细过筛后取鲜土 5 g, 用 1 mol/L KCl 溶液浸提, 过滤后取清液用全自动流动分析仪 (AA3 型, 德国) 测定铵态氮和硝态氮的含量。

1.3.3 田间测产

小麦成熟后, 每小区测定 3 个 1 m² 小麦籽粒干质量, 并换算为单位面积产量; 玉米成熟后, 每小区随机取 20 株测定籽粒干质量, 并换算为单位面积产量。

1.4 数据处理

采用 SPSS 22 和 Microsoft Excel 2016 进行数据统计和分析, 采用 Origin 2017 绘图。不同处理之间多重比较采用 LSD, 显著性水平设为 $P < 0.05$; 数据均采用“平均值±标准误”表示。

2 结果与分析

2.1 土壤温、湿度

试验期间土壤温、湿度均出现季节性波动 (图 1)。小麦季平均土壤温度为 18.36 °C, 玉米季平均土壤温度为 38.46 °C, 玉米季平均土壤温度是小麦季的 2.10 倍。从周年来看, 土壤最低温度出现在 1 月 (3.21 °C), 最高温度出现在 8 月 (41.17 °C), 均值为 26.71 °C; 土壤湿度 (容积含水率) 波动范围在 3.00%~28.50% 之间, 均值为 19.00%。

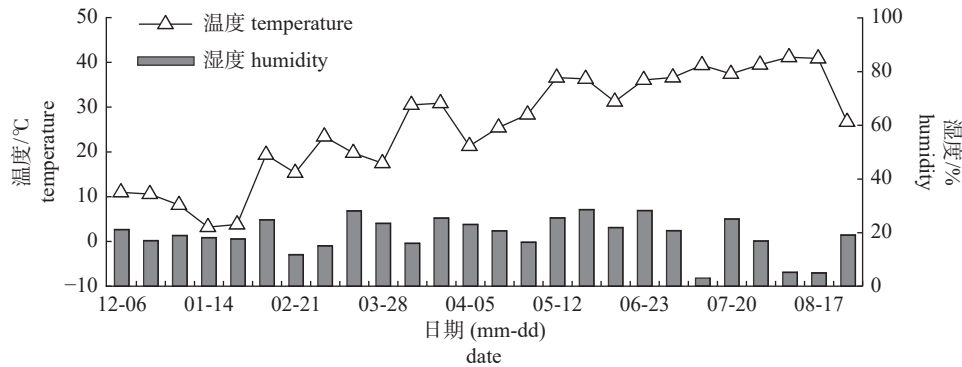


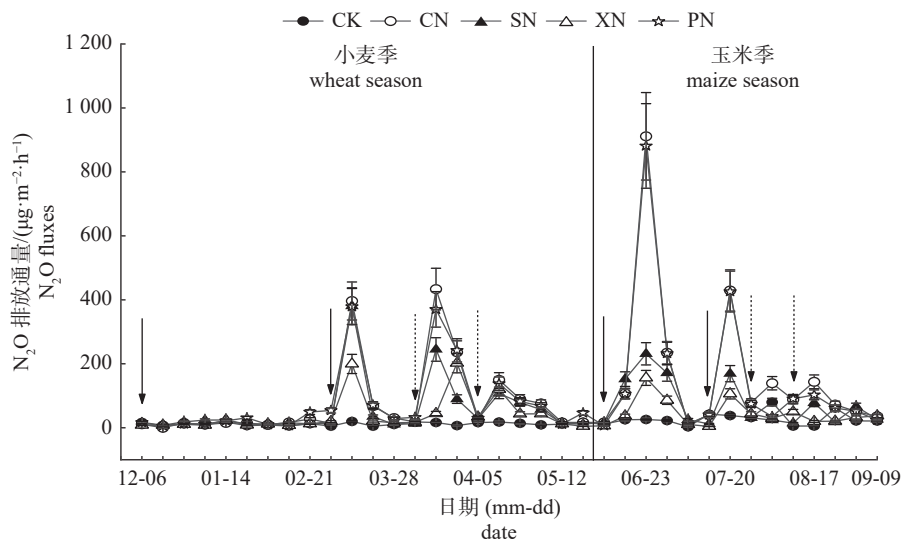
图 1 试验期间土壤温、湿度变化

Fig. 1 Changes of soil temperature and humidity during the experiment

2.2 不同氮素调控措施下的 N_2O 排放通量

由图 2 可知：在麦玉轮作整个生育期内，除 CK 外各处理的 N_2O 排放通量变化趋势一致， N_2O 排放峰值均出现在施肥或降雨后的 15 d 内，峰值出现 1 周后迅速降低。小麦季，CN、SN、PN、XN 和 CK 处理的 N_2O 排放通量最大峰值分别为 433.68、380.22、378.74、208.12 和 25.10 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。施基肥后并未监测到 N_2O 排放峰值，这可能与较低的土壤温度有关。玉米季，CN、PN、SN、

XN 和 CK 处理的 N_2O 排放通量最大峰值分别为 911.45、879.26、233.04、156.03 和 80.23 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。相比于小麦季，玉米季 CN 和 PN 处理的 N_2O 排放通量最大峰值分别增加 110.17% 和 132.15%，SN 和 XN 处理分别降低 38.71% 和 25.03%。周年来看，与 CN 处理相比，SN 和 XN 处理的 N_2O 排放通量最大峰值分别降低 74.42% 和 82.88%，PN 与 CN 处理间无明显差异。



注：CK. 不施氮肥，CN. 常规施氮，SN. 生物碳与氮肥配施，XN. 硝化抑制剂与氮肥配施，PN. 叶面喷肥；实线箭头代表施肥，虚线箭头代表降雨；下同。

Note: CK. no nitrogen fertilizer, CN. conventional nitrogen application, SN. combined application of biochar with nitrogen, XN. combined application of nitrification inhibitor with nitrogen, PN. foliar fertilization; the solid line arrow indicates fertilization, and the dotted line arrow indicates rainfall; the same as below.

图 2 不同处理 N_2O 排放通量Fig. 2 N_2O emission fluxes in different treatments

2.3 不同氮素调控措施下的 N_2O 累积排放量

由表 1 可知：小麦季 N_2O 平均排放通量在不

同氮素调控措施下为 12.06~75.00 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ；与 CN 处理相比，XN 和 SN 处理均显著降低，且

XN 处理显著低于 SN 处理, PN 处理与 CN 处理间无显著差异。玉米季 N₂O 平均排放通量为 29.65~180.21 $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$; 与 CN 处理相比, XN、SN 和 PN 处理均显著降低, 且三者间差异显著。

玉米季 N₂O 平均排放通量均高于小麦季, 其中 CN 和 PN 处理分别高 143.17% 和 119.28%; 周年来看, 与 CN 处理相比, XN、SN 和 PN 处理的 N₂O 平均排放通量均显著降低, 且三者间差异显著。

表 1 不同处理 N₂O 平均排放通量及累积排放量

Tab. 1 Average N₂O emission flux and cumulative emission in different treatments

处理 treatments	小麦季 wheat season		玉米季 maize season		周年 annual	
	平均排放通量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)	累积排放量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	平均排放通量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)	累积排放量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	平均排放通量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)	累积排放量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)
	average emission flux	cumulative emission	average emission flux	cumulative emission	average emission flux	cumulative emission
CK	12.06±0.98 d	0.54±0.04 d	29.65±0.94 e	0.60±0.01 e	18.41±0.57 e	1.14±0.05 d
CN	74.11±3.07 a	2.67±0.14 a	180.21±4.25 a	3.14±0.03 a	112.42±2.69 a	5.81±0.14 a
SN	53.65±2.14 b	2.00±0.12 b	78.39±1.58 c	1.13±0.02 c	62.59±1.02 c	3.13±0.13 b
XN	38.43±2.11 c	1.44±0.10 c	48.69±1.06 d	0.92±0.02 d	42.13±1.13 d	2.36±0.11 c
PN	75.00±3.12 a	2.71±0.21 a	164.46±2.87 b	2.83±0.02 b	107.31±1.78 b	5.54±0.23 a

注: CK. 不施氮肥, CN. 常规施氮, SN. 生物碳与氮肥配施, XN. 硝化抑制剂与氮肥配施, PN. 叶面喷肥; 同列不同字母表示不同氮素调控措施下各指标在 $P<0.05$ 水平下差异显著; 下同。

Note: CK. no nitrogen fertilizer, CN. conventional nitrogen application, SN. combined application of biochar with nitrogen, XN. combined application of nitrification inhibitor with nitrogen, PN. foliar fertilization; different letters in the same column indicate the indexes have significant differences at the level of $P<0.05$ in different nitrogen control measures; the same as below.

由表 1 还可知: 与 CN 处理相比, 小麦季 SN 和 XN 处理的 N₂O 累积排放量分别显著降低 25.10% 和 46.07%, PN 处理与 CN 处理间无显著差异; 与 CN 处理相比, 玉米季 SN、XN 和 PN 处理 N₂O 累积排放量分别显著降低 64.01%、70.70% 和 9.87%。CN 处理下, 玉米季 N₂O 累积排放量是小麦季的 1.18 倍, 但 XN 和 SN 处理玉米季降低幅度分别是小麦季的 1.53 倍和 1.84 倍; 周年来看, SN 和 XN 处理 N₂O 累积排放量比 CN 处理分别显著降低 46.21% 和 59.36%, PN 和 CN 处理间无显著差异。

2.4 不同氮素调控措施下的土壤无机氮含量

除 CK 处理外, 各处理土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量的季节性变化幅度较大, 施肥后均出现峰值, 然后下降至较低的水平 (图 3)。由图 3a 可知: 小麦季 SN、XN、CN、PN 和 CK 处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量最大峰值分别为 51.72、33.29、30.86、26.19 和 8.03 mg/kg ; 与 CN 处理相比, SN 和 XN 处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量明显增加, PN 与 CN 处理间无明显差异。玉米季 SN、CN、PN、XN 和 CK 处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量最大峰值分别为 78.42、57.85、49.49、45.14 和 5.53 mg/kg ; SN 处理明显高于 CN 处理, XN 和 PN 与 CN 处理间无明显差异。周年来看, SN 和 XN 处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量明显高于 CN 处理, PN 与 CN 处理间差异不明显。

由图 3b 可知: 小麦季 SN、CN、PN、XN 和 CK 处理的土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量最大峰值分别为 42.80、39.24、38.50、17.07 和 4.49 mg/kg ; 与 CN 处理相比, SN 和 XN 处理的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量明显降低, PN 与 CN 处理间差异不明显。玉米季 SN、CN、PN、XN 和 CK 处理的土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量最大峰值分别为 33.67、27.78、23.52、12.69 和 5.85 mg/kg ; 与 CN 处理相比, SN 处理的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量明显增加, XN 处理明显降低, PN 与 CN 处理间差异不明显。周年来看, 与 CN 处理相比, SN 处理的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量明显增加, XN 处理明显降低, PN 和 CN 处理间差异不明显。

2.5 不同氮素调控措施下 N₂O 排放与关键因子的相关性分析

由表 2 可知: 小麦季除了 CK 处理的 N₂O 排放与土壤温度呈显著正相关外, 其他处理的 N₂O 排放与土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量及土壤湿度均无显著相关性; 玉米季, SN 处理的 N₂O 排放与土壤温度呈显著负相关、与土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量呈极显著正相关, CN、XN 和 PN 处理的 N₂O 排放与土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量呈极显著正相关。

2.6 不同氮素调控措施下的作物产量和 N₂O 排放系数

由表 3 可知: 小麦季各处理间作物产量无显著差异 (CK 除外); 玉米季 SN 和 XN 处理的作物

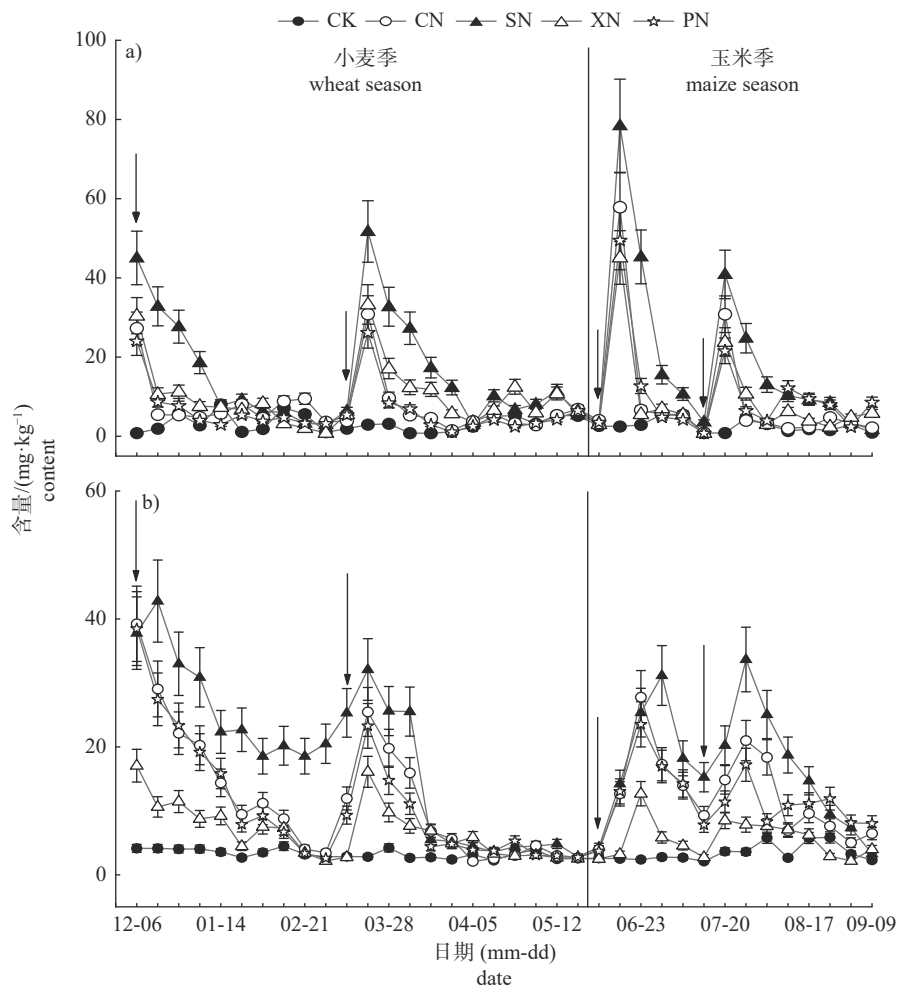


图 3 不同处理下 0~10 cm 土壤的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (a) 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (b) 的含量

Fig. 3 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (a) and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (b) content in 0-10 cm soil in different treatments

表 2 不同处理 N_2O 排放与关键因子相关性分析

Tab. 2 Correlation analysis between N_2O emission and key factors of different treatments

时期 period	处理 treatments	铵态氮含量 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content	硝态氮含量 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content	温度 temperature	湿度 humidity
小麦季 wheat season	CK	0.109	-0.205	0.437*	0.122
	CN	-0.182	-0.201	0.239	0.102
	SN	-0.155	-0.163	0.227	0.096
	XN	-0.176	-0.295	0.264	0.030
	PN	-0.170	-0.260	0.233	0.105
玉米季 maize season	CK	-0.178	0.505	0.312	-0.122
	CN	0.116	0.719**	-0.451	0.279
	SN	0.689**	0.330	-0.622*	0.251
	XN	0.163	0.789**	-0.430	0.297
	PN	0.177	0.728**	-0.497	0.274

注：“*”表示在0.05水平下显著相关，“**”表示在0.01水平下显著相关。

Note: “*” indicates a significant correlation at the level of 0.05, “**” indicates a significant correlation at the 0.01 level.

产量显著高于 CN 处理，分别增产 11.80% 和 15.17%，PN 与 CN 处理间无显著差异；周年来

看，与 CN 处理相比，SN 和 XN 处理都能显著提高作物产量，分别增产 11.27% 和 13.35%。此

外, 各处理的 N₂O 排放系数存在差异。与 CN 处理相比, 小麦季和玉米季 SN 和 XN 处理的 N₂O 排放系数均显著降低, 而 PN 处理仅在玉米季显著降低; 周年来看, SN 和 XN 处理的 N₂O 排放系数比 CN 处理分别显著降低 46.28% 和 59.50%, PN 与 CN 处理间无显著差异。

表 3 不同处理作物产量和 N₂O 排放系数
Tab. 3 Crop yield and N₂O emission coefficient in different treatments

处理 treatments	小麦季 wheat season		玉米季 maize season		周年 annual	
	籽粒产量/(kg·hm ⁻²)	N ₂ O 排放系数/%	籽粒产量/(kg·hm ⁻²)	N ₂ O 排放系数/%	籽粒产量/(kg·hm ⁻²)	N ₂ O 排放系数/%
	grain yield	N ₂ O emission coefficient	grain yield	N ₂ O emission coefficient	grain yield	N ₂ O emission coefficient
CK	2 994.83±3.11 b	0.23±0.05 d	8 598.18±130.09 c	0.25±0.01 e	11 593.01±120.07 c	0.24±0.04 d
CN	3 675.17±25.86 a	1.11±0.13 a	9 778.04±108.08 b	1.31±0.04 a	13 453.21±106.05 b	1.21±0.12 a
SN	4 037.02±29.62 a	0.83±0.12 b	10 932.28±129.36 a	0.47±0.03 c	14 969.29±119.17 a	0.65±0.08 b
XN	3 988.66±5.24 a	0.60±0.09 c	11 261.07±164.30 a	0.38±0.02 d	15 249.73±144.33 a	0.49±0.02 c
PN	4 132.07±10.04 a	1.13±0.11 a	9 651.82±106.96 b	1.18±0.03 b	13 783.89±106.28 b	1.15±0.13 a

3 讨论

3.1 不同氮素调控措施对土壤 N₂O 排放的影响

本研究发现: 相比常规施氮, 配施生物炭可显著降低土壤 N₂O 排放量, 显著增加土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量, 而 N₂O 排放量与 NH₄⁺-N 显著正相关, 与 NO₃⁻-N 无显著相关性, 说明生物炭处理 N₂O 主要来自土壤硝化过程而不是反硝化过程。施用生物炭可增加土壤透气性, 产生的有氧环境可促进土壤硝化作用、抑制厌氧条件下的反硝化作用, 从而减少土壤反硝化过程的 N₂O 排放^[17-18]。同时, 生物炭呈碱性, 可提高土壤 pH 值, 进而提高酸性土壤中含 *nosZ* 基因微生物的丰度^[19-20], *nosZ* 基因是反硝化过程的关键基因之一, 其编码的氧化亚氮还原酶可将 N₂O 还原为 N₂^[21], 进一步减少反硝化过程的 N₂O 排放。此外, 本研究所用的生物炭含碳量达 53.71%, 施入后可大幅提高土壤 C/N, 加剧土壤微生物活动和种间竞争, 加之生物炭对土壤无机氮的吸附持留, 土壤硝化和反硝化作用的氮素供应会受到一定程度的限制^[22-23], 进而降低土壤 N₂O 排放总量。本研究结果表明: 相比常规施氮, 配施 DMPP 也能显著降低土壤 N₂O 排放量。DMPP 可通过抑制以氨氧化微生物为主的自养硝化细菌的活性从而抑制土壤的硝化过程, 同时减少土壤反硝化作用的底物, 进而减少 N₂O 排放^[24]。本研究也发现: 与常规施氮处理相比, 配施 DMPP 处理的 NH₄⁺-N 含量增加 52.93% 而 NO₃⁻-N 含量降低 19.30%, 且玉米季配施 DMPP 处理的 N₂O 排放与 NO₃⁻-N 含量呈极显著正相关。一般研究认为: 土壤 N₂O

排放和施入土壤中的氮肥用量呈显著正相关^[25]。本研究中, 相比常规施氮, 叶面喷肥未降低小麦季 N₂O 排放, 但显著降低了玉米季 N₂O 排放, 说明叶面喷肥对不同作物减排效果并不一致, 其原因可能是不同的土壤养分、植株生长状况和气候条件, 使得土壤 N₂O 排放对施氮量的响应存在一定程度的不确定性^[26]。从季节排放看, 常规施氮条件下, 玉米季 N₂O 排放量是小麦季的 1.18 倍, 说明玉米季是该地区 N₂O 高排季, 这可能是由于玉米季较高的土壤温度促进了硝化和反硝化微生物的生长繁殖, 从而增加土壤 N₂O 排放^[27]。此外, 与常规施氮相比, 玉米季配施 DMPP 和生物炭处理的 N₂O 排放量降低幅度分别是小麦季的 1.53 倍和 1.84 倍, 说明生物炭和 DMPP 对玉米季减排效果更好。从周年排放看, 相比常规施氮, 配施生物炭和 DMPP 都能显著降低土壤 N₂O 累积排放量, 而配施 DMPP 处理的 N₂O 排放量显著低于配施生物炭处理, 说明在该区域配施 DMPP 的 N₂O 减排效果最佳。

3.2 不同氮素调控措施对作物产量的影响

本研究发现: 相比常规施氮, 配施生物炭能显著提高作物产量, 与多数研究结果^[28-29]一致。生物炭多孔、比表面积大, 能够吸附持留土壤氮素, 降低氨挥发和氮素淋溶损失, 从而提高土壤氮素有效性^[30-31]。本研究结果也显示: 配施生物炭处理的无机氮含量均高于其他处理。此外, 有研究表明: 生物炭可改良土壤理化性质, 改善微生物生长环境, 促进有机质矿化, 进而提高作物产量^[32]。本研究还发现: 相比常规施氮, 配施

DMPP 也能显著增加作物产量,这主要与 DMPP 可抑制土壤硝化作用有关。施用 DMPP 延长了土壤氮素以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 形态存留的时间,减少土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的淋溶损失,可提高氮素利用率,从而增加作物产量^[33]。此外,丁济娜等^[34]研究发现:DMPP 能促进作物对其他营养元素的吸收、改善土壤理化性质及肥力,从而提高作物产量。研究表明叶面喷施复合肥和微肥可增加作物产量^[35-36],然而本研究中,相比常规施氮,叶面喷肥并未显著增加作物周年产量。一方面,相比常规施氮,叶面喷肥处理并未增加氮肥总量和添加微量元素;另一方面,叶面喷肥的增产效果受土壤肥力的影响^[37]。从本研究结果来看,叶面喷肥和常规施氮处理间的土壤无机氮含量并无显著差异。

4 结论

不同氮素调控措施对麦玉两熟 N_2O 排放和作物产量产生了不同程度的影响。相比常规施氮,DMPP 配施和生物炭配施处理均能显著降低小麦季和玉米季 N_2O 排放,显著增加玉米季作物产量;叶面喷施处理仅能显著降低玉米季 N_2O 排放量,作物产量无显著差异。周年来看,相比常规施氮,DMPP 配施处理的 N_2O 排放量最低、作物产量最高。综合考虑 N_2O 排放和作物产量,DMPP 和氮肥配施可作为江淮丘陵地区麦玉两熟的最佳氮肥调控措施。

[参考文献]

- [1] 曹秀清, 蒋尚明, 金菊良, 等. 江淮丘陵区塘坝灌溉能力估算及其演变特征[J]. 人民长江, 2020, 51(4): 128. DOI: [10.16232/j.cnki.1001-4179.2020.04.021](https://doi.org/10.16232/j.cnki.1001-4179.2020.04.021).
- [2] SONG H, WANG J, ZHANG K, et al. A 4-year field measurement of N_2O emissions from a maize-wheat rotation system as influenced by partial organic substitution for synthetic fertilizer[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 263(1): 110384. DOI: [10.1016/j.jenvman.2020.110384](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110384).
- [3] BRUCE L, VAN G K J, ADVIENTO B, et al. An agro-economic assessment of greenhouse gas emissions from major cereal crops[J]. Global Change Biology, 2012, 18(1): 194. DOI: [10.1111/j.1365-2486.2011.02502.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02502.x).
- [4] TIAN H Q, YANG J, XU R T, et al. Global soil nitrous oxide emissions since the pre-industrial era estimated by an ensemble of terrestrial biosphere models: magnitude, attribution and uncertainty[J]. Global Change Biology, 2019, 25(2): 640. DOI: [10.1111/gcb.14514](https://doi.org/10.1111/gcb.14514).
- [5] STOCKER T F, QIN D, PLATTNER G K. Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [6] 曹文超, 宋贺, 王娅静, 等. 农田土壤 N_2O 排放的关键过程及影响因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(10): 1781. DOI: [10.11674/zwylf.18441](https://doi.org/10.11674/zwylf.18441).
- [7] 王敬, 程谊, 蔡祖聪, 等. 长期施肥对农田土壤氮素关键转化过程的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(2): 292. DOI: [10.11766/trxb201507130273](https://doi.org/10.11766/trxb201507130273).
- [8] 曹明, 潘凤娥, 伍延正, 等. 施用生物炭对分次施氮砖红壤 N_2O 排放的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2021, 36(2): 338. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).201912057](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).201912057).
- [9] 李博, 李巧玲, 范长华, 等. 施用生物炭与硝化抑制剂对菜地综合温室效应的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(9): 2651. DOI: [10.13287/j.1001-9332.20140618.001](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.20140618.001).
- [10] XIE T, REDDY K R, WANG C W, et al. Characteristics and applications of biochar for environmental remediation: a review[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2015, 45(9): 939. DOI: [10.1080/10643389.2014.924180](https://doi.org/10.1080/10643389.2014.924180).
- [11] ZHANG A F, CHENG G, HUSSAIN Q, et al. Contrasting effects of straw and straw-derived biochar application on net global warming potential in the Loess Plateau of China[J]. Field Crops Research, 2017, 205: 45. DOI: [10.1016/j.fcr.2017.02.006](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.02.006).
- [12] 陈晨, 许欣, 毕智超, 等. 生物炭和有机肥对菜地土壤 N_2O 排放及硝化、反硝化微生物功能基因丰度的影响[J]. 环境科学学报, 2017, 37(5): 1912. DOI: [10.13671/j.hjkxb.2016.0361](https://doi.org/10.13671/j.hjkxb.2016.0361).
- [13] CAYUELA M L, VAN ZWIETEN L, SINGH B P, et al. Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: a review and meta-analysis[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2014, 191: 5. DOI: [10.1016/j.agee.2013.10.009](https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.009).
- [14] 屈磊, 程敦公, 赵楠, 等. 灌浆期喷施叶面肥对优质强筋小麦产量和品质的调控[J]. 山东农业科学, 2022, 54(1): 68. DOI: [10.14083/j.issn.1001-4942.2022.01.011](https://doi.org/10.14083/j.issn.1001-4942.2022.01.011).
- [15] 吕金岭, 高燕喃, 李太魁, 等. 施氮量对砂姜黑土小麦-玉米轮作体系 N_2O 排放的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(11): 1846. DOI: [10.12357/cjea.20210444](https://doi.org/10.12357/cjea.20210444).
- [16] 彭毅, 李惠通, 张少维, 等. 秸秆还田、地膜覆盖及施氮对冬小麦田 N_2O 和 N_2 排放的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(3): 1668. DOI: [10.13227/jhjkx.202105100](https://doi.org/10.13227/jhjkx.202105100).
- [17] 杨世梅, 何腾兵, 杨丽, 等. 秸秆与生物炭覆盖对土壤养分及温室气体排放的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2022, 48(1): 75. DOI: [10.13331/j.cnki.jhau.2022.01.012](https://doi.org/10.13331/j.cnki.jhau.2022.01.012).
- [18] CLOUGH T J, BERTRAM J E, RAY J L, et al. Unweathered wood biochar impact on nitrous oxide emissions from a bovine urine amended pasture soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(3): 852. DOI: [10.2136/sssaj2009.0185](https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0185).
- [19] 董成, 陈智勇, 谢迎新, 等. 生物炭连续施用对农田土壤

- 氮转化微生物及 N_2O 排放的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(19): 4024. DOI: [10.3864/j.issn.0578-1752.2020.19.015](https://doi.org/10.3864/j.issn.0578-1752.2020.19.015).
- [20] OBIA A, CORNELISSEN G, MULDER J, et al. Effect of soil pH increase by biochar on NO , N_2O and N_2 production during denitrification in acid soils[J]. PLoS One, 2015, 10(9): e0138781. DOI: [10.1371/journal.pone.0138781](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138781).
- [21] HARTER J, WEIGOLD P, EL-HADIDI M, et al. Soil biochar amendment shapes the composition of N_2O -reducing microbial communities[J]. Science of the Total Environment, 2016, 562: 379. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2016.03.220](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.220).
- [22] SOPER F M, SULLIVAN B W, NASTO M K, et al. Remotely-sensed canopy nitrogen correlates with nitrous oxide emissions in a lowland tropical rainforest[J]. Ecology, 2018, 99(9): 2080. DOI: [10.1002/ecs2.1440](https://doi.org/10.1002/ecs2.1440).
- [23] XIAO R, RAN W, HU S J, et al. The response of ammonia oxidizing archaea and bacteria in relation to heterotrophs under different carbon and nitrogen amendments in two agricultural soils[J]. Applied Soil Ecology, 2021, 158(11): 103812. DOI: [10.1016/j.apsoil.2020.103812](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103812).
- [24] 疏晴, 王香琪, 齐永波, 等. 尿素与缓释尿素配施施用DMPP对砂姜黑土氮素转化的影响[J]. 土壤, 2021, 53(5): 945. DOI: [10.13758/j.cnki.tr.2021.05.008](https://doi.org/10.13758/j.cnki.tr.2021.05.008).
- [25] 李玥, 巨晓棠. 农田氧化亚氮减排的关键是合理施氮[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 842. DOI: [10.11654/jaes.2020-0245](https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0245).
- [26] 陈峰, 刘娟, 郑梅群, 等. 生物质炭和腐殖质对稻田土壤 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(1): 368. DOI: [10.13870/j.cnki.stbxb.2022.01.047](https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbxb.2022.01.047).
- [27] KRAFT B, TIETMEYER H E, SHARMA R, et al. The environmental controls that govern the end product of bacterial nitrate respiration[J]. Science, 2014, 345(6197): 676. DOI: [10.1126/science.1254070](https://doi.org/10.1126/science.1254070).
- [28] 山楠, 赵同科, 毕晓庆, 等. 适宜施氮量降低京郊小麦-玉米农田 N_2O 排放系数增加产量[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 163. DOI: [10.11975/j.issn.1002-6819.2016.22.022](https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2016.22.022).
- [29] 邱丽丽, 李增强, 徐基胜, 等. 生物质炭和秸秆施用对黄褐土生化性质及小麦产量的影响[J]. 土壤, 2021, 53(3): 475. DOI: [10.13758/j.cnki.tr.2021.03.005](https://doi.org/10.13758/j.cnki.tr.2021.03.005).
- [30] SPOKAS K A, NOVAK J M, VENTER E A R T. Biochar's role as an alternative N-fertilizer: ammonia capture[J]. Plant and Soil, 2012, 350(1/2): 35. DOI: [10.1007/s11104-011-0930-8](https://doi.org/10.1007/s11104-011-0930-8).
- [31] KAMEYAMA K, MIYAMOTO T, SHIONO T, et al. Influence of sugar-cane bagasse-derived biochar application on nitrate leaching in calcareous dark red soil[J]. Journal of Environmental Quality, 2012, 41(4): 1131. DOI: [10.2134/jeq2010.0453](https://doi.org/10.2134/jeq2010.0453).
- [32] 刘敏, 纪立东, 王锐, 等. 施用生物质炭条件下减施氮肥对玉米生长和土壤的影响[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(19): 216. DOI: [10.15889/j.issn.1002-1302.2021.19.039](https://doi.org/10.15889/j.issn.1002-1302.2021.19.039).
- [33] 孙海军, 闵炬, 施卫明, 等. 硝化抑制剂施用对水稻产量与氨挥发的影响[J]. 土壤, 2015, 47(6): 1027. DOI: [10.13758/j.cnki.tr.2015](https://doi.org/10.13758/j.cnki.tr.2015).
- [34] 丁济娜, 李东坡, 武志杰, 等. 土壤理化性质与生物活性对持续施用缓/控释尿素肥料的响应[J]. 生态学杂志, 2014, 33(7): 1769. DOI: [10.13292/j.1000-4890.20140422.030](https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.20140422.030).
- [35] 程红玉, 肖占文, 宗盈晓, 等. ALA叶面肥对春小麦光合特性和灌浆速率的影响[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(5): 572. DOI: [10.7606/j.issn.1009-1041.2018.05.10](https://doi.org/10.7606/j.issn.1009-1041.2018.05.10).
- [36] 王君婵, 王慧, 李曼, 等. 不同品质类型小麦籽粒产量与品质对氮肥运筹和叶面肥的响应[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2021, 42(6): 23. DOI: [10.16872/j.cnki.1671-4652.2021.06.004](https://doi.org/10.16872/j.cnki.1671-4652.2021.06.004).
- [37] 赵广才, 常旭虹, 杨玉双, 等. 叶面喷施不同营养元素对冬小麦产量和品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(4): 689. DOI: [10.7606/j.issn.1009-1041.2011.04.019](https://doi.org/10.7606/j.issn.1009-1041.2011.04.019).

责任编辑: 何馨成