

菜地氮肥用量与 N_2O 排放的关系及硝化抑制剂效果*熊 舞^{1,2} 夏永秋¹ 周 伟³ 颜晓元^{1,3†}

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 中国科学院常熟农业生态实验站, 江苏常熟 215500)

摘 要 通过连续种植四季蔬菜近一年的大田试验, 探究高施氮水平和低氮肥利用率的蔬菜生产系统中, N_2O 排放量与氮肥施用量之间的定量关系及其机理, 并研究硝化抑制剂减少菜地 N_2O 排放的效果。结果表明, 在氮肥施用水平为 $N\ 0\sim 1\ 733\ kg\ hm^{-2}\ a^{-1}$ 间, 无论氮肥中是否添加硝化抑制剂, N_2O 总排放量与氮肥施用量均呈指数函数关系, 即氮肥施用量高时, N_2O 排放率也高。在各氮肥水平处理下, 硝化抑制剂均能降低 N_2O 排放, 抑制率为 8.75% ~ 25.28%, 且这种减排效果随着施氮量增加而增加。在氮肥施用量为 $N\ 300$ 或 $400\ kg\ hm^{-2}\ 季^{-1}$ 时, 施用硝化抑制剂减少 N_2O 排放所带来的效益略高于其成本, 因此, 即使不考虑氮肥利用率的提高等因素, 施用硝化抑制剂仍是一种有利的选择。

关键词 N_2O 排放; 硝化抑制剂; 蔬菜地; 氮肥用量

中图分类号 X511 **文献标识码** A

农业生产是人类活动引起的 N_2O 排放的主要源头^[1], 与农业生产相关的管理措施, 尤其是氮肥的施用, 是影响 N_2O 排放的重要因子^[2-3]。而菜地具有灌溉频繁、复种指数高、尤其是施肥量大^[4-5]等特点, 其 N_2O 排放不可小觑。有研究表明, 菜地 N_2O 排放高于一般粮食系统^[6-7]; Zheng^[8] 和 Wang^[9] 等的研究表明, 菜地因氮肥损失的 N_2O 排放量占中国农田总排放量的 20% 和 21.4%。但菜地 N_2O 排放率与氮肥施用量之间的具体关系, 现有研究结论还不一致。目前 IPCC 推荐的农田 N_2O 排放估算方法仅在 N_2O 排放量占施入氮肥的比例固定时才成立。而已有研究表明, 随着氮肥用量越大, 作物的氮肥利用率呈降低趋势^[10-11], 氮肥损失的比例增大^[12]; 则以 N_2O 形式损失的氮肥损失率也可能增大, 或者呈现类似米氏方程的关系(土壤中大部分 N_2O 产生于微生物主导的硝化和反硝化反应^[13])。因此, 有必要进一步揭示菜地氮肥用量与 N_2O 排放的定量关系, 为准确估算农田 N_2O 排放提供参考。

菜地单位面积施氮量已远高于蔬菜作物本身

的氮素需求, 如果通过相关措施减少菜地 N_2O 排放, 在单位面积上获得明显的减排效果而又不影响作物经济效益, 则这种措施既容易被决策者认同, 也容易被菜地实际经营者在生产中采纳。目前世界上施用的全部氮肥中, 铵态氮肥和酰胺态氮肥数量占 90% 以上^[14]; 在微观机理上, 硝化和反硝化过程是 N_2O 产生的主要途径, 而硝化抑制剂可通过抑制铵态氮转化为硝态氮, 使得施入土壤中的氮素更多的以铵态氮形态存在, 从而减少 N_2O 的排放。近年来在牧草^[15]、水稻等粮食作物^[16-17] 的研究结果表明, 施用硝化抑制剂可以显著降低土壤 N_2O 排放。但在菜地上, 关于硝化抑制剂减少菜地 N_2O 排放的研究则较少, 其效果还不明确。

为此, 本研究在江苏常熟菜地连续种植四季蔬菜, 分析不同氮肥水平处理下 N_2O 排放情况, 以及常规尿素和添加有硝化抑制剂的尿素处理下的 N_2O 排放差异, 试图探讨高施氮下蔬菜地 N_2O 排放与氮肥用量的定量关系, 以及蔬菜地上施用硝化抑制剂对 N_2O 的减排效果。

* 中国科学院战略性先导科技专项—应对气候变化的碳收支认证及相关问题(XDA05020200)资助

† 通讯作者: E-mail: yanxy@issas.ac.cn

作者简介: 熊 舞(1986—), 女, 湖南益阳人, 硕士研究生。E-mail: manguiqu@sina.com

收稿日期: 2012-08-22; 收到修改稿日期: 2012-11-13

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验地点位于江苏省苏州市常熟辛庄镇华欣村, 所选用菜地之前由一蔬菜种植大户经营, 前茬作物为马铃薯。试验前测得的菜地土壤 pH5.6, 有机质 17.4 g kg⁻¹, 全氮 2.2 g kg⁻¹, 碱解氮 169.5 mg kg⁻¹, 有效磷 38.0 mg kg⁻¹, 速效钾 175.2 mg kg⁻¹。

1.2 试验方法

试验于 2011 年 6 月开始进行, 连续种植四季, 于 2011 年 6 月 16 日至 7 月 22 日、2011 年 7 月 26 日至 8 月 31 日、2011 年 9 月 10 日至 12 月 15 日、2012 年 2 月 18 日至 5 月 29 日, 依次种植上海青、毛白菜(四季毛白菜)、黄芽菜(黄芽 14)、马铃薯(费乌瑞它-Ⅱ)。试验共设 7 个处理, 详见表 1。所施用的常规尿素, 为当地农资公司购得; 所施用的含有硝化抑制剂的尿素(以下简称 CP 氮肥), 由浙江奥复托化工有限公司生产, 内含硝化抑制剂氯甲基吡啶(Nitrapyrin), 对分解铵态氮的单细胞硝化杆菌具有抑制作用。每处理 3 次重复, 随机区组排列, 每个小区面积为 2.5 m × 4.0 m。氮肥施用中仅黄芽菜有一次追肥, 其他菜季全部作基肥在蔬菜种植前施入。蔬菜播种前翻耕平整土壤, 其余田间操作与管理措施, 如施肥方式、浇水灌溉、病虫害防治等与当地农户习惯一致。前三季蔬菜钾肥(KCl, 60% K₂O)和磷肥(钙镁磷肥, 12% P₂O₅)施用量均为 194.9 kg hm⁻², 第四季蔬菜钾肥(KCl, 60% K₂O)和磷肥(钙镁磷肥, 12% P₂O₅)均为 270.0 kg hm⁻²; 磷钾肥均作基肥一次性施入。

表 1 四季蔬菜各处理氮肥施用量

Table 1 N application rates of the four crops of vegetable(N, kg hm⁻²)

| 处理 Treatment | 上海青 Pakchoi | 毛白菜 Chinese cabbage | 黄芽菜 Peking cabbage | | 马铃薯 Potato | 总氮量 Total nitrogen |
|-----------------|----------------|---------------------------|-----------------------|-------------------|---------------|--------------------------|
| | | | 基肥 Base | 追肥 Topdressing | | |
| | | | fertilizer | | | |
| CK | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| U200 | 200 | 200 | 200 | 67 | 200 | 867 |
| U300 | 300 | 300 | 300 | 100 | 300 | 1 300 |
| U400 | 400 | 400 | 400 | 133 | 400 | 1 733 |
| CP200 | 200 | 200 | 200 | 67 | 200 | 867 |
| CP300 | 300 | 300 | 300 | 100 | 300 | 1 300 |
| CP400 | 400 | 400 | 400 | 133 | 400 | 1 733 |

1.3 样品采集与分析

气体样品采集采用静态箱法。静态箱用 5 mm 厚的 PVC 板制成, 分为两部分。上部为箱部分, 大小为 0.50 m × 0.50 m × 0.50 m; 箱上设计有一抽气孔, 箱顶设计有一温度计; 底部为与箱部分配套的框部分, 在每季蔬菜种植前埋入土壤中, 内径为 0.50 m × 0.50 m, 外径为 0.54 m × 0.54 m, 槽深 4.2 cm。采样时往槽中加入适量水分, 把箱部分放置于底框上, 使之密封, 然后通过抽气孔用 10 ml 注射器抽取箱内气样, 每 10 min 抽一次, 连续四次, 同时准确记录箱内温度。每次采样基本保持在上午 8:00 ~ 10:00 内进行, 采样后 2 d 内完成样品浓度测定。测定仪器为安捷伦气相色谱 7890 A, 检测器为 FED, 检测器温度 300℃, 色谱柱为 80 ~ 100 目 poropackQ, 用 N₂ 作载气, 载气流量保持 40 ml min⁻¹。施肥后的第二天开始每天采样, 持续一周, 其后每 2 ~ 3 d 采样 1 次, 二周后 3 ~ 14 d 采样 1 次。计算时以相邻两次采样的时间间隔为权重, 将各次 N₂O 排放通量加权平均得到 N₂O 平均排放通量; 用平均排放通量乘以观测时间, 得到 N₂O 累积排放量。土样采集深度约为 0 ~ 20 cm, 约 7 ~ 15 d 采集一次。分析时用 2 mol L⁻¹ 的 KCl 浸提, 滤液中的 NH₄⁺ - N 浓度采用靛酚蓝比色法测定, NO₃⁻ - N 浓度采用紫外分光光度法测定。

1.4 数据处理

试验所得数据用 Excel 整理计算后, 对数据结果采用 SPSS(16.0 版本)中的 LSD 进行多重比较, 利用 Originpro(8.6 版本)制图。

2 结 果

2.1 不同观测期 N₂O 排放通量

不同菜季 N₂O 排放规律不同。上海青菜季和马铃薯菜季在施肥后均没有立即出现明显的排放峰(图 1, 箭头表示施肥时间点); 毛白菜菜季 N₂O 排放峰值出现在施肥后约 5 d 内, 最大值高达 N 9.84 mg m⁻² h⁻¹(U400 处理), 此后呈降低趋势, 但最低值仍有 N 0.014 mg m⁻² h⁻¹(CK 处理); 黄芽菜自施肥后变化不很明显, 在 10 月 10 日追肥后的 3 d 内出现相对较小的峰值, 此后呈减少趋势。不同菜季 N₂O 平均排放通量具有明显的差异性。相同氮肥处理下, 毛白菜菜季各处理 N₂O 平均排放通量均为最高, 各处理的平均 N₂O 排放通量在 0.41 ~ 2.65 mg m⁻² h⁻¹间(表 2); 上海青菜季平均 N₂O 排

放通量变化范围在 N 0.41 ~ 1.24 mg m⁻² h⁻¹ 间波动;黄芽菜菜季平均 N₂O 排放通量范围在 N 0.10 ~ 0.53 mg m⁻² h⁻¹ 间,相较于前三季,马铃薯季整体排放通量教小,各处理均为最低,其平均 N₂O 排放通量范围在 N 0.02 ~ 0.28 mg m⁻² h⁻¹ 间。从整

个观测期的平均 N₂O 排放通量来看,常规尿素和 CP 氮肥处理的平均 N₂O 排放通量分别在 0.29 ~ 0.68 mg m⁻² h⁻¹、0.26 ~ 0.50 mg m⁻² h⁻¹ 间;且施用等量氮肥时,常规尿素处理的平均 N₂O 排放量要高于施用 CP 氮肥的处理。

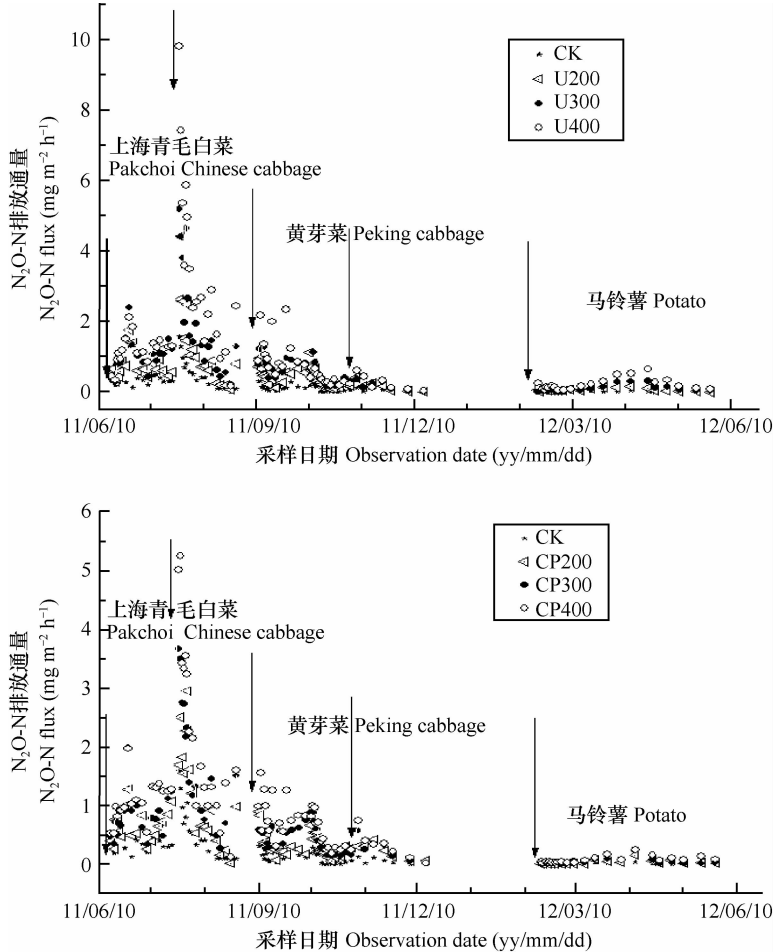


图 1 不同氮肥处理下四季蔬菜地 N₂O 排放通量

Fig. 1 N₂O emission fluxes from plots different in N fertilization rate in the four vegetable seasons

表 2 四季蔬菜和总观测期 N₂O-N 平均排放通量

Table 2 Seasonal and annual average of N₂O fluxes from vegetable fields (N, mg m⁻² h⁻¹)

| 处理 Treatment | 上海青 Pakchoi | 毛白菜 Chinese cabbage | 黄芽菜 Peking cabbage | 马铃薯 Potato | 总观测期 ¹⁾ Total period |
|-----------------|----------------------------|------------------------|-----------------------|---------------|------------------------------------|
| CK | 0.41 ± 0.05d ²⁾ | 0.41 ± 0.13e | 0.10 ± 0.02d | 0.02 ± 0.00b | 0.12 ± 0.02e |
| U200 | 0.70 ± 0.13bcd | 0.95 ± 0.21d | 0.30 ± 0.086c | 0.08 ± 0.02b | 0.29 ± 0.05d |
| U300 | 1.08 ± 0.20ab | 1.53 ± 0.13bc | 0.41 ± 0.13abc | 0.14 ± 0.01b | 0.45 ± 0.07bc |
| U400 | 1.24 ± 0.36a | 2.65 ± 0.27a | 0.53 ± 0.09a | 0.28 ± 0.12a | 0.68 ± 0.10a |
| CP200 | 0.65 ± 0.029cd | 0.88 ± 0.03d | 0.26 ± 0.04d | 0.05 ± 0.00b | 0.26 ± 0.02d |
| CP300 | 0.82 ± 0.20bc | 1.23 ± 0.10cd | 0.35 ± 0.06cd | 0.07 ± 0.01b | 0.35 ± 0.04cd |
| CP400 | 1.09 ± 0.17ab | 1.70 ± 0.18b | 0.49 ± 0.08ab | 0.11 ± 0.04b | 0.50 ± 0.07b |

1) 总观测期除蔬菜种植期间的采样外,还包括休闲期间的采样 Observation was done throughout the whole experiment period, including sampling during the vegetable growing periods and fallow period. 2) 平均值 ± 标准误差,同一列中不同字母表示不同处理间差异显著 ($p < 0.05$),下同。Values in the table are means ± SE). Different letters in the same column indicate significant difference between treatments ($p < 0.05$). The same below

2.2 不同观测期 N₂O 排放率

每季蔬菜收获后计算其生育期内各处理的 N₂O 排放率(扣除对照 CK),常规尿素各处理的排放率在 0.69%~4.57% 之间,除了毛白菜菜季的 U400 处理与 U300 和 U200 处理,总观测期的 U400 处理与 U200 处理差异显著外,其他菜季的 3 个氮水平处理间 N₂O 排放率差异均不显著;CP 氮肥处理的排放率在 0.35%~2.63% 之间,各处理的排放率均没有显著差异(表 3)。无论是常规尿素处理还是 CP 氮肥处理,总观测期的 N₂O 排放率均随施氮量的增加而增加,变化范围分别在 1.61%~2.62%、1.36%~1.80% 间。表 3 还表明,种植不同蔬菜时,即使施氮量相同,土壤 N₂O 排放率存在差异,与胡晓霞等^[18]的研究结果相同,可能是蔬菜种类和季节差异导致的结果。

2.3 N₂O 排放量与氮肥施用量的定量关系

由上已知,蔬菜地总观测期内 N₂O 排放率随施

固定的比例关系。对近一年蔬菜地总观测期内的 N₂O 排放量具体分析,在氮肥总施用量为 N 0、867、1 300、1 733 kg hm⁻² 四个水平下,用 SPSS 进行曲线拟合,得到常规尿素处理与 CP 氮肥处理的 N₂O 排放量与氮肥用量呈指数关系,指数方程分别为 $y = 10.44e^{0.001x}$, $y = 10.60e^{0.0008x}$ (y 表示 N₂O 排放量, x 表示氮肥施用量),其相关系数均达到 0.999 及以上(图 2)。

2.4 CP 氮肥对 N₂O 排放的抑制效果

由表 3 已知,不同观测期内,相同氮水平处理下,CP 氮肥处理的 N₂O 排放率小于常规尿素处理,其抑制率在 7.21%~59.81% 之间(表 4,未扣对照 CK),说明 CP 氮肥中的硝化抑制剂确实抑制了 N₂O 排放;其中马铃薯菜季三个氮水平处理下的抑制率,相比其他菜季的同氮水平处理,均为最高,其中一个重要原因是马铃薯种植期间温度低,而

氮量的增加而增加, N₂O 排放率与施氮量间不存在

表 3 四季蔬菜和总观测期 N₂O-N 排放率

Table 3 Seasonal and annual N₂O-N emission rates of the four crops of vegetable (%)

| 处理 Treatment | 上海青 Pakchoi | 毛白菜 Chinese cabbage | 黄芽菜 Peking cabbage | 马铃薯 Potato | 总观测期 Total period |
|-----------------|----------------|------------------------|-----------------------|---------------|----------------------|
| U200 | 1.41 ± 0.32a | 2.18 ± 0.91b | 1.91 ± 0.67a | 0.69 ± 0.16ab | 1.61 ± 0.47b |
| U300 | 1.91 ± 0.48a | 3.04 ± 0.22b | 1.84 ± 0.71a | 0.92 ± 0.05ab | 2.07 ± 0.36ab |
| U400 | 1.78 ± 0.68a | 4.57 ± 0.69a | 1.77 ± 0.42a | 1.54 ± 0.69a | 2.62 ± 0.51a |
| CP200 | 1.04 ± 0.16a | 1.90 ± 0.40b | 1.73 ± 0.25a | 0.35 ± 0.05b | 1.36 ± 0.09b |
| CP300 | 1.18 ± 0.47a | 2.24 ± 0.14b | 1.47 ± 0.25a | 0.35 ± 0.08b | 1.47 ± 0.19b |
| CP400 | 1.47 ± 0.27a | 2.63 ± 0.40b | 1.39 ± 0.39a | 0.53 ± 0.22b | 1.80 ± 0.34b |

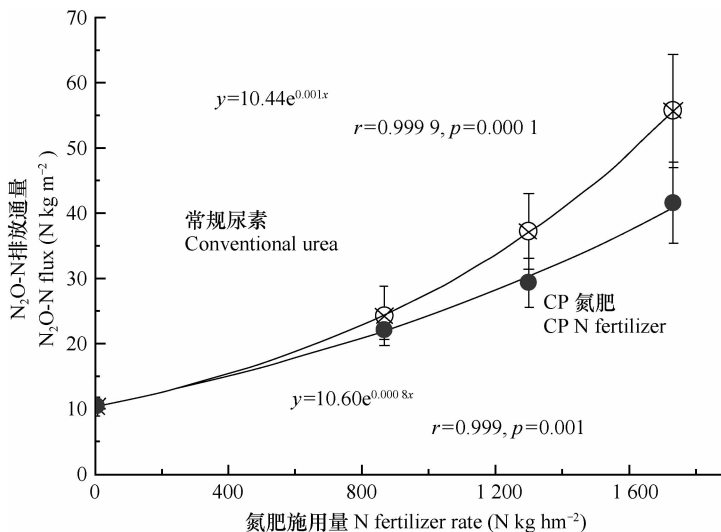


图 2 总观测期内 N₂O 排放量与施氮水平的关系(误差棒表示在 95% 的置信区间内)

Menéndez 等^[19]的研究结果表明,抑制剂在温度低时施用效果更好。因为硝化抑制剂要在一定的时间段才能体现其效果,所以总观测期的抑制率更有代表性,其范围在 8.75%~25.28% 间。此外图 3 表明,观测期内,等量氮肥施用量下,菜地土壤中 NH₄⁺-N 浓度均基本符合 CP 氮肥处理 > 常规氮肥处

理;NO₃⁻-N 浓度均基本符合 CP 氮肥处理 < 常规氮肥处理。这从侧面说明,相较于常规尿素,含有硝化抑制剂的 CP 氮肥确实抑制了土壤中氮肥从 NH₄⁺-N 向 NO₃⁻-N 的转化,从而减少了 N₂O 排放。

表 4 不同观测期硝化抑制剂对 N₂O 的抑制率

Table 4 Effect of the nitrification inhibitor on N₂O emission in different seasons (%)

| 施氮水平 N Application rate (N, kg hm ⁻²) | 上海青 Pakchoi | 毛白菜 Chinese cabbage | 黄芽菜 Peking cabbage | 马铃薯 Potato | 总观测期 Total period |
|--|----------------|------------------------|-----------------------|---------------|----------------------|
| 200 | 11.64 | 7.21 | 14.04 | 34.12 | 8.75 ± 8.95a |
| 300 | 23.7 | 19.13 | 15.30 | 50.86 | 21.00 ± 2.61a |
| 400 | 11.81 | 35.97 | 7.23 | 59.81 | 25.28 ± 4.55a |

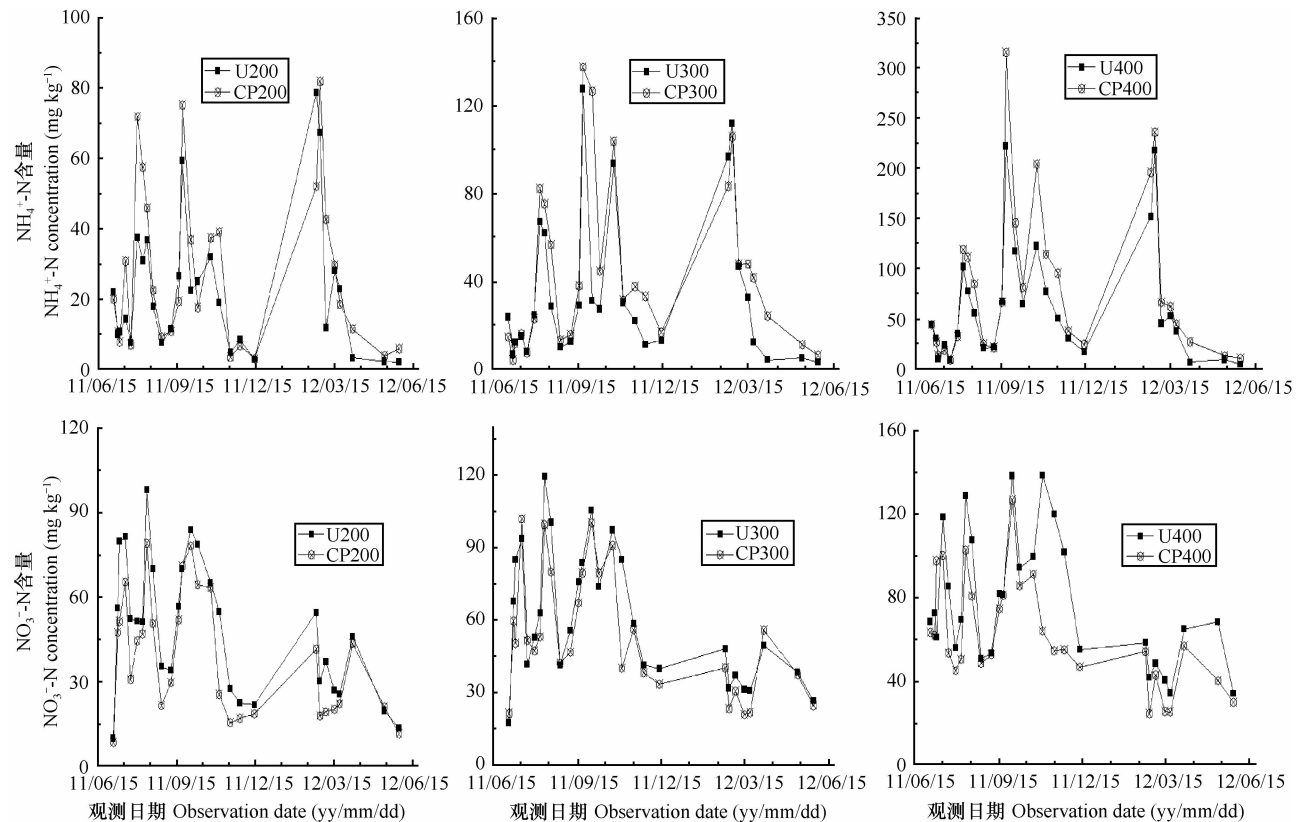


图 3 CP 氮肥与常规尿素在土壤中 20 cm 内 NH₄⁺-N 与 NO₃⁻-N 浓度比较

Fig. 3 Comparison between conventional urea and CP fertilizer in concentrations of NH₄⁺-N and NO₃⁻-N in the 0~20 cm soils

3 讨论

连续种植的四季蔬菜 N₂O 平均排放通量具有明显的差异性,不同蔬菜生育期内的不同温度是其重要原因之一。邱炜红^[20]、黄丽华^[21]等的研究分别表

明:高 N₂O 排放通量集中发生在 4 月至 9 月,6 月至 9 月是 N₂O 排放高峰期;在温度低的冬季,各处理排放量均较小。本研究中上海青和毛白菜的生育期恰好是在温度高的 6-7 月,7-9 月间,其 N₂O 排放通量明显高于生育期在温度低的 9-12 月间的黄芽菜和 2-0 月间的马铃薯。同时,作物生育期长短不同造成单位时间

施肥强度的差异,也是导致 N_2O 排放量的差异的重要原因之一^[22]。上海青和毛白菜生育期均约为 1 个月,其单位时间施肥强度明显高于生育期约为 3 个月的黄芽菜和马铃薯。土壤湿度也是影响 N_2O 排放的重要因子,不同菜季降雨灌溉不同,土壤湿度不同,也会导致 N_2O 排放的差异。此外,前茬蔬菜收获后,因不同蔬菜对氮肥的利用率不同,以及因生育期温度水分等环境不同而造成的当季土壤氮素损失状况差异,会使不同蔬菜种植前土壤中累积的氮素养分不同,从而造成蔬菜 N_2O 排放的差异。除上述原因外,蔬菜种类也可能影响 N_2O 排放,如张秀君等^[23] 研究表明蔬菜自身释放 N_2O 的速率不同。

本研究得出氮肥施用量与 N_2O 的排放量呈指数函数关系,即随着氮肥施用量增加, N_2O 的排放率也增加。其可能原因是,当施用氮肥过量时,植物系统对氮的吸收利用率降低,则多余的氮肥极大部分进入到土壤系统、水系统、大气系统中,氮肥损失率增加。部分多余的氮肥进入土壤系统,增加硝态氮和铵态氮含量,直接增加硝化和反硝化底物促进土壤 N_2O 的排放;即使土壤系统中的部分硝态氮、铵态氮被淋洗进入地下水和其他径流,或者以 NH_3 形态挥发损失,也极有可能在被灌溉或者随毛细管上升,或者通

过干湿沉降而返回菜地生态系统,成为 N_2O 的二次源,再次增加 N_2O 排放。所以,没有被蔬菜吸收利用的氮肥,极大可能转化成生成 N_2O 的底物,从而增加 N_2O 排放。因此氮肥施用量在一定范围内增加时, N_2O 排放增长缓慢;当氮肥施用量越大时, N_2O 排放增长越快,呈指数关系。这与部分研究结果不一致。曹兵等^[24] 的研究表明,随着氮肥用量增加, N_2O 排放率降低;卢昌艾^[25] 和武其甫^[26] 等的研究则相反;而张仲新等^[27] 的研究表明,在施氮水平为 $N 0 \sim 1 285.6 \text{ kg hm}^{-2}$ 内, N_2O 排放率先降低后回升。可能原因是上述研究时间较短(大部分不超过 6 个月),只对一季或两季蔬菜进行了研究;从本试验的各季蔬菜地 N_2O 排放结果来看,也并非每季蔬菜的排放率均随施氮量增加而增加。因而可推测因蔬菜种植季节的差异^[28],或轮作制度的不同^[29-30] 等因素,导致了氮肥施用量与 N_2O 的排放量的定量关系的不确定;只有通过较长时间的观测,例如以年为周期的研究,才能最大可能地避免上述因素的干扰。根据对收集到的观测时间约 1 年左右的文献整理(见表 5),发现其共同点是 N_2O 的排放率随着氮肥施用量增加而增加,且根据其数据模拟出的指数方程中,相关系数均在 0.9 以上,支持了本研究结果。

表 5 N_2O 的排放量与氮肥施用量的关系

Table 5 Relationship between nitrous oxide emission rate and nitrogen application rate

| 蔬菜轮作 Vegetable rotation | 试验时间 Growth period | 化学氮施用量 Fertilizer N rate (N, kg hm ⁻²) | N_2O 排放量 Cumulative N_2O (N, kg hm ⁻²) | 排放率 Emission ratio (%) | 指数方程 Exponential equation |
|---|----------------------------|--|--|---------------------------|---------------------------------------|
| | | 0 | 3.30 | | |
| 西红柿/黄瓜/芹菜 ^[31] Pot Tomato/Cucumber/Celery | 2007/4/12 - 2008/04/05 | 522 | 5.20 | 0.36 | $y = 3.21e^{0.001x}$ $R^2 = 0.98$ |
| | | 696 | 6.50 | 0.46 | |
| | | 870 | 8.30 | 0.57 | |
| | | 0 | 0.48 | | |
| 辣椒/萝卜/菠菜 ^[32] Pepper/Radish/Spinach | 2007/04/26 - 2008/04/16 | 200 | 1.38 | 0.36 | $y = 0.58e^{0.004x}$ $R^2 = 0.97$ |
| | | 400 | 4.05 | 0.78 | |
| | | 600 | 7.7 | 0.98 | |
| | | 760 | 10.8 | 1.13 | |
| | | 0 | 0.49 | | |
| 辣椒/小白菜/小白菜 ^[32] Pepper/Pakchoi/Pakchoi | 2008/04/24 - 2009/04/30 | 230 | 1.32 | 0.33 | $y = 0.60e^{0.004x}$ $R^2 = 0.95$ |
| | | 460 | 4.93 | 0.86 | |
| | | 690 | 7.95 | 1.03 | |
| | | 880 | 10.29 | 1.11 | |
| | | 0 | 0.85 | | |
| 莴苣/小白菜/辣椒/苋菜 ^[33] Lettuce/Pakchoi/Pepper/Amaranth | 2008/09 - 2009/09 | 500 | 2.80 | 0.39 | $y = 0.84e^{0.002x}$ $R^2 = 0.999$ |
| | | 750 | 5.42 | 0.61 | |
| | | | | | |

碳交易市场的存在,使得温室气体排放与经济效益直接关联。本研究中的 CP 氮肥中添加了一种价格低廉的硝化抑制剂,其成本约为氮肥本身的 5%。由于试验蔬菜地长期大量施肥,CP 氮肥的增产及提高肥料利用率的效果一时难以体现。但即使不考虑肥效提高等因素,仅考虑肥料成本和 N_2O 的碳交易收益,在年施用氮量为 1 300 和 1 733 $kg\ hm^{-2}$ 的菜地上,使用含有硝化抑制剂的 CP 氮肥较常规尿素一年可分别增收约 158 和 439 元 hm^{-2} ,即因添加硝化抑制剂所导致的肥料成本增加部分,小于其所减少的 N_2O 排放量所带来的碳交易收益部分。

近三十多年来我国蔬菜种植发展迅速,统计资料显示蔬菜种植面积占农作物总播种面积由 1978 年的 2.22% 增加到 2011 年的 12.10%^[34],相关研究还表明,硝化抑制剂还能提高氮肥利用率^[35],减少硝态氮和铵态氮径流损失造成的环境危害^[36]等优势,综合本实验研究结果,硝化抑制剂在蔬菜生产上有很较大的应用潜力。

4 结 论

在观测期约 1 年的时间长度内,氮肥年施用水平为 N 867、1 300、1 733 $kg\ hm^{-2}$ 的菜地上,常规尿素与 CP 氮肥的 N_2O 排放率分别为 1.61%、2.07%、2.62% 和 1.36%、1.47%、1.80%; N_2O 排放量与氮肥施用量呈指数函数关系。3 个施氮水平下硝化抑制剂均抑制了 N_2O 排放,其年抑制率分别达 8.75%、21.00%、25.28%。在后两种氮肥施用水平下,施用硝化抑制剂减少的 N_2O 排放所带来的碳交易收益略高于其硝化抑制剂的成本,因此,即使不考虑氮肥利用率的提高等因素,在该系统上施用硝化抑制剂仍是一种有利的选择。

参 考 文 献

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing//Fourth assessment report by working group 1. Geneva: IPCC, 2007

[2] Mosier A R, Kroeze C. Potential impact on the global atmospheric N_2O budget of the increased nitrogen input required to meet future global food demands. *Chemosphere-Global Change Science*, 2000, 2: 465—473

[3] Bowman A F, Boumans L J M, Batjes N H. Emissions of N_2O and NO from fertilized fields: Summary of available measurement data. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16(4): 1058—1070

[4] 杜连凤. 长江三角洲地区菜地系统氮肥利用与土壤质量变异

研究. 北京: 中国农业科学院, 2005. Du L F. The nitrogen fertilizer use efficiency and soil quality variation of vegetable-soil system in Yangse Delta area (In Chinese). Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2005

- [5] 巨晓棠, 张福锁. 中国北方土壤硝态氮的累积及其对环境的影响. *生态环境*, 2003, 12(1): 24—28. Ju X T, Zhang F S. Nitrate accumulation and its implication to environment in north China (In Chinese). *Ecology and Environment*, 2003, 12(1): 24—28
- [6] 于亚军, 朱波, 荆光军. 成都平原土壤-蔬菜系统 N_2O 排放特征. *中国环境科学*, 2008, 28(4): 313—318. Yu Y J, Zhu B, Jing G J. N_2O emission from soil-vegetable system and impact factors in Chengdu Plain of Sichuan Basin (In Chinese). *China Environmental Science*, 2008, 28(4): 313—318
- [7] 林杉, 冯明磊, 阮雷雷, 等. 三峡库区不同土地利用方式下土壤氧化亚氮排放及其影响因素. *应用生态学报*, 2008, 19(6): 1269—1276. Lin S, Feng M L, Ruan L L, et al. Soil N_2O flux and its affecting factors under different land use patterns in Three Gorges Reservoir Area of China (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(6): 1269—1276
- [8] Zheng X H, Han S H, Huang Y. Re-quantifying the emission factors based on field measurements and estimating the direct N_2O emission from Chinese croplands. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18(2), GB2018, doi: 10.1029/2003GB002167
- [9] Wang J Y, Xiong Z Q, Yan X Y, et al. Fertilizer-induced emission factors and background emissions of N_2O from vegetable fields in China. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(38): 6923—6929
- [10] 社会英, 冀宏杰, 徐爱国, 等. 应用¹⁵N 示踪研究设施蔬菜对氮肥的当季利用. *土壤通报*, 2011, 42(6): 172—176. Du H Y, Ji H J, Xu A G, et al. Study on the utilization of nitrogen fertilizer under greenhouse vegetable by N tracer (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(6): 172—176
- [11] 闵炬, 施卫明. 不同施氮量对太湖地区大棚蔬菜产量、氮肥利用率及品质的影响. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(1): 151—157. Min J, Shi W M. Effects of different N rates on the yield, N use efficiency and fruit quality vegetables cultivated in plastic greenhouse in Taihu Lake Region (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(1): 151—157
- [12] 赵长盛. 武汉城郊菜地土壤氮素的转化与淋失研究. 武汉: 华中农业大学, 2009. Zhao C S. Studies on nitrogen transformation and leaching of vegetable soil in Wuhan suburb, China (In Chinese). Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009
- [13] Bowman A F. Exchange of greenhouse gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere//Bowman A F. *Soils and greenhouse effect*. New York: Wiley and Sons, 1990
- [14] Xi Z B. Approach to slow release nitrogen fertilizer and its agrochemical evaluation. *Phosphate and Compound Fertilizer*, 2003, 18(5): 1—5
- [15] Di H J, Cameron K C, Sherlock R R, et al. Nitrous oxide emissions from grazed grassland as affected by a nitrification inhibitor, dicyandiamide, and relationships with ammonia oxidizing bacteria and archaea. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, 10(5):

- 943—954
- [16] Bhatia A, Sasmal S, Jain N, et al. Mitigating nitrous oxide emission from soil under conventional and no-tillage in wheat using nitrification inhibitors. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 136(3/4): 247—253
- [17] 李香兰, 徐华, 蔡祖聪. 氢醌、双氰胺组合影响稻田甲烷和氧化亚氮排放研究进展. *土壤学报*, 2009, 46(5): 917—924. Li X L, Xu H, Cai Z C. Effect of combined uses of hydroquinone and dicyandiamide on CH_4 and N_2O emissions from rice paddy field: A review (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(5): 917—924
- [18] 胡晓霞, 丁洪, 张玉树, 等. 菜地氮素循环及其环境效应研究进展. *中国农学通报*, 2010, 26(10): 287—294. Hu X X, Ding H, Zhang Y S, et al. Research progression nitrogen cycling and its environment effects in vegetable crop-soil system (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(10): 287—294
- [19] Menéndez S, Barrena I, Setien I, et al. Efficiency of nitrification inhibitor DMPP to reduce nitrous oxide emissions under different temperature and moisture conditions. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 53: 82—89
- [20] 邱伟红. 菜地土壤温室气体氧化亚氮排放及其控制研究. 武汉:华中农业大学, 2011. Qiu W H. Studies on greenhouse gas nitrous oxide emission and its mitigation from vegetable field (In Chinese). Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011
- [21] 黄丽华, 沈根祥, 顾海蓉, 等. 肥水管理方式对蔬菜田 N_2O 释放影响的模拟研究. *农业环境科学学报*, 2009, 28(6): 1319—1324. Huang L H, Shen G X, Gu H R, et al. Simulation of some impacts of fertilization and water management on nitrous oxide emissions from vegetable field (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(6): 1319—1324
- [22] 于亚军, 高美荣, 朱波. 小麦-玉米轮作田与菜地 N_2O 排放的对比研究. *土壤学报*, 2012, 49(1): 96—103. Yu Y J, Gao M R, Zhu B. Comparison study on N_2O emissions from field under wheat-maize rotation system and field vegetable cultivation (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(1): 96—103
- [23] 张秀君, 江丕文, 朱海. 植物排放 N_2O 和 CH_4 的研究. *植物学报*, 2012, 47(2): 120—124. Zhang X J, Jiang P W, Zhu H. Investigation of N_2O and CH_4 emissions from plants (In Chinese). *Chinese Bulletin of Botany*, 2012, 47(2): 120—124
- [24] 曹兵, 贺发云, 徐秋明, 等. 南京郊区番茄地中氮肥的气态氮损失. *土壤学报*, 2006, 43(1): 62—68. Cao B, He F Y, Xu Q M, et al. Gaseous loss from fertilizers applied to a tomato field in Nanjing suburbs (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(1): 62—68
- [25] 卢昌艾, 孔令明, 胡万里, 等. 滇池流域集约化西芹地的 N_2O 排放. *农业环境科学学报*, 2008, 27(5): 1870—1875. Lu C A, Kong L M, Hu W L, et al. N_2O emission from intensive celery field of Dianchi Watershed (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(5): 1870—1875
- [26] 武其甫, 武雪萍, 李银坤, 等. 保护地土壤 N_2O 排放通量特征研究. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(4): 942—948. Wu Q F, Wu X P, Li Y K, et al. Studies on the fluxes of nitrous oxide from green house vegetable soil (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(4): 942—948
- [27] 张仲新, 李玉娥, 华路, 等. 不同施肥量对设施菜地 N_2O 排放通量的影响. *农业工程学报*, 2010, 26(5): 269—275. Zhang Z X, Li Y E, Hua L, et al. Effects of different fertilizer levels on N_2O flux from protected vegetable land (In Chinese). *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(5): 269—275
- [28] He F F, Jiang R F, Chen Q, et al. Nitrous oxide emissions from an intensively managed greenhouse vegetable cropping system in Northern China. *Environmental Pollution*, 2009, 157(5): 1666—1672
- [29] Jia J X, Sun L Y, Kong X W, et al. Annual N_2O and CH_4 emissions from intensively managed vegetable fields in Nanjing. *China Soil Science and Plant Nutrition*, 2012, 58(1): 91—103
- [30] Halvorson A D, Del Grosso S J, Reule C A. Nitrogen, tillage, and crop rotation effects on nitrous oxide emissions from irrigated cropping systems. *Journal Environmental Quality*, 2008, 37(4): 1337—1344
- [31] Min J, Shi W M, Xing G X, et al. Nitrous oxide emissions from vegetables grown in a polytunnel treated with high rates of applied nitrogen fertilizers in Southern China. *Soil Use and Management*, 2012, 28(1): 70—77
- [32] 邱伟红, 刘金山, 胡承孝, 等. 不同施氮水平对菜地土壤 N_2O 排放的影响. *农业环境科学学报*, 2010, 29(11): 2238—2243. Qiu W H, Liu J S, Hu C X, et al. Effects of nitrogen application rates on nitrous oxide emission from a typical intensive vegetable cropping system (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(11): 2238—2243
- [33] 邱伟红, 刘金山, 胡承孝, 等. 种植蔬菜地与裸地氧化亚氮排放差异比较研究. *生态环境学报*, 2010, 19(12): 2982—2985. Qiu W H, Liu J S, Hu C X, et al. Comparison of nitrous oxide emission from bare soil and planted vegetable soil (In Chinese). *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(12): 2982—2985
- [34] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴-2012. 北京: 中国统计出版社, 2012: 475—477. National Bureau of Statistical of China. *China statistical yearbook-2012*. Beijing: China Statistical Press, 2012: 475—477
- [35] 闫湘, 金继运, 何萍, 等. 提高肥料利用率技术研究进展. *中国农业科学*, 2008, 41(2): 450—459. Yan X, Jin J Y, He P, et al. Recent advances in technology of increasing fertilizer use efficiency (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(2): 450—459
- [36] 倪秀菊, 李玉中, 徐春英, 等. 土壤脲酶抑制剂和硝化抑制剂的研究进展. *中国农学通报*, 2009, 25(12): 145—149. Ni X J, Li Y Z, Xu C Y, et al. Advance of research on urease inhibitor and nitrification inhibitor in soil (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(12): 145—149

RELATIONSHIP BETWEEN NITROGEN APPLICATION RATE AND NITROUS OXIDE EMISSION AND EFFECT OF NITRIFICATION INHIBITOR IN VEGETABLE FARMING SYSTEM

Xiong Wu^{1,2} Xia Yongqiu¹ Zhou Wei³ Yan Xiaoyuan^{1,3*}

(1 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

(2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(3 *Changshu Agroecological Experimental Station, Chinese Academy of Sciences, Changshu, Jiangsu 215500, China*)

Abstract High fertilizer N application rate and low nitrogen use efficiency are two typical problems in vegetable farming systems in China. To explore quantitatively relationship between N₂O emission rate and fertilizer N application rate and its mechanism, and effect of nitrification inhibitors in mitigating N₂O emission, a field experiment was carried out having four crops of vegetable and lasting one year. Results show that when the N application rate varied in the range of 0 ~ 1 733 kg hm⁻² a⁻¹, the total N₂O emission increased exponentially with N application rate, no matter with or without the addition of any nitrification inhibitor, that is to say, the higher the N application rate, the higher the N₂O emission rate. The application of nitrification inhibitor reduced N₂O emission (8.75% ~ 25.28%) from the soils of all the N fertilization treatments, and the mitigation effect increased with N application rate. In plots applied with N 300 or 400 kg hm⁻² season⁻¹, the economic benefit arising from reduction of N₂O emission as a result of the use of the nitrification inhibitor was higher than the cost of the nitrification inhibitor. Therefore, the use of nitrification inhibitors is a profitable option even without considering some other factors like improving N use efficiency.

Key words Nitrous oxide emission; Nitrification inhibitor; Vegetable field; N application rate

(责任编辑:卢 萍)