

菜田氮素反硝化损失与 N_2O 排放的定量评价

丁 洪^{1,2} 王跃思² 项虹艳¹ 李卫华¹

(¹ 福建省农业科学院土壤肥料研究所, 福州 350013; ² 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

摘 要: 在田间条件下, 应用原状土柱培养-乙炔抑制法测定蔬菜地氮肥反硝化损失和 N_2O 排放量。结果表明, 在茄子-灰泥土系统中, 不施氮肥处理下, 土壤氮素反硝化损失量和 N_2O 排放量分别为 $\text{N } 22.8 \text{ kg } \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $\text{N } 8.2 \text{ kg } \cdot \text{hm}^{-2}$; 施氮肥处理下, 反硝化损失量和 N_2O 排放量都极显著提高, 分别达 $\text{N } 37.9$ 和 $\text{N } 33.8 \text{ kg } \cdot \text{hm}^{-2}$; 氮肥反硝化损失量占施肥量的 5.1%, 产生的 N_2O 排放量占施肥量的 8.6%。土壤氮素反硝化损失量和 N_2O 排放量与土壤水分含量极显著相关, 而与土壤中铵态氮和硝态氮含量的相关性不显著。

关键词: 菜田; 氮肥; 反硝化; 氧化亚氮

中图分类号: S 606; S 154.1 文献标识码: A 文章编号: 0513-353X (2004) 06-0762-05

Denitrification Loss and N_2O Emission from Nitrogen Fertilizer Applied to Vegetable Field

Ding Hong^{1,2}, Wang Yuesi², Xiang Hongyan¹, and Li Weihua¹

(¹ Institute of Soil and Fertilizer, Fujian Academy of Agricultural Science, Fuzhou 350013, China; ² State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: A field experiment was conducted to measure denitrification loss and N_2O emission from nitrogen fertilizer applied to a field grown with eggplants by soil core incubation-acetylene inhibition method. The results showed that the amount of N_2O emitted from soil (without N fertilizer applied) was $\text{N } 8.2 \text{ kg } \cdot \text{hm}^{-2}$, while the amount of N_2O derived from applied N fertilizer was $\text{N } 25.6 \text{ kg } \cdot \text{hm}^{-2}$ (8.6 % of applied N). The corresponding figures for denitrification losses were $\text{N } 22.8$ and $\text{N } 15.1 \text{ kg } \cdot \text{hm}^{-2}$ (5.1 % of applied N) respectively. The denitrification loss and N_2O emission amounts of the treatment with N fertilizer applied were significantly higher than that of the treatment without N fertilizer applied ($P < 0.01$). These results also indicated that nitrification-denitrification was one of main approaches of nitrogen fertilizer losses in vegetable field. And there were significant relationships between denitrification loss and N_2O emission and soil water content ($P < 0.01$).

Key words: Vegetable field; Nitrogen fertilizer; Denitrification; Nitrous oxide

目前, 我国氮肥利用率还很低, 大约在 30%~35%, 损失率平均达 45%^[1]。氮肥施入农田后通过氨挥发、硝化-反硝化气态损失和硝酸盐淋失等途径损失掉, 但以哪一条途径为主目前尚无一致的看法, 有些方面还存在争议。

对于氮肥的硝化-反硝化气态损失量究竟有多大, 在许多报道中是众说不一。Aulakh 等^[2]认为, 反硝化损失量为微量至 $\text{N } 100 \text{ kg } \cdot \text{hm}^{-2}$; Hauck^[3]估计, 氮肥损失中有 30% 是缘于反硝化作用; Ryden 等^[4]报道, 施肥量高的蔬菜水浇地反硝化损失可达 $\text{N } 200 \text{ kg } \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 而 Goffman^[5]在评述中认为, 在温暖地区和大多数热带农业系统中, 反硝化作用不可能是氮肥损失的重要途径。国内在 20 世纪 80 年代末开始这方面的研究, 但在田间直接测定的工作仍不多, 近年来有少量有关华北平原潮土和褐土

收稿日期: 2004-03-11; 修回日期: 2004-11-26

基金项目: 福建省自然科学基金重点项目 (F0100001); 中科院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室开放课题 (LAPC-KF-2003-02) 资助项目

上测定结果的报道^[6,7], 测得的反硝化损失量均较低。

硝化 - 反硝化作用还产生温室气体 N_2O 排放, 对全球气温升高有很大影响, 同时 N_2O 破坏大气臭氧层, 使更多的紫外线辐射到地面, 对生物产生伤害^[8]。土壤硝化 - 反硝化过程释放的 N_2O 是全球 N_2O 的主要源, 约占生物圈释放到大气中 N_2O 总量的 90 %^[9]; 化学氮肥的使用每年产生 N_2O - N 约 $1.5 \times 10^6 \text{ t}$, 占人类活动向大气输入 N_2O - N 量的 44 %和每年向大气输入 N_2O 总量的 13 %^[10]。我国在 20 世纪 90 年代以来开展了一些测定工作, 但对有些重要的农业生态系统还缺乏研究, 特别是有关蔬菜地土壤氮素的硝化 - 反硝化损失和 N_2O 排放量的研究还鲜有报道。我国蔬菜种植面积很大, 且施肥量高, 因此开展这一研究很有意义。

1 材料与方法

1.1 试验地点和作物

试验地点选择在福州市新店镇杨廷村, 试验蔬菜为茄子。试验土壤为灰泥土, 有机质含量 15.0 g kg^{-1} , 全氮 1.8 g kg^{-1} , 全磷 1.0 g kg^{-1} , 全钾 14.8 g kg^{-1} , 碱解氮 195.6 mg kg^{-1} , 速效磷 58.5 mg kg^{-1} , 速效钾 66.6 mg kg^{-1} , CEC $10.8 \text{ cmol kg}^{-1}$, 土壤容重 1.3 g cm^{-3} , pH 6.2。

1.2 试验设计

试验于 2003 年 5 月 4 日进行, 土壤翻耕后整地, 划好小区, 小区面积 10.8 m^2 。8 日施肥和移栽茄子苗, 设施氮肥和不施氮肥两个处理, 两处理均施用磷肥 (P_2O_5) 90 kg hm^{-2} (钙镁磷)、钾肥 (K_2O) 180 kg hm^{-2} (氯化钾); 施氮肥处理施纯 N 300 kg hm^{-2} (尿素), 3 次重复, 随机排列。磷肥作基肥一次施入, 钾肥 66 %作基肥, 34 %在 7 月 10 日作追肥, 氮肥是 40 %作基肥, 30 %在 5 月 31 日第 1 次追肥, 30 %在 7 月 10 日第 2 次追肥。施肥后均在土面浇水。每小区种 4 行茄子苗, 每行 12 株。其它管理措施与当地习惯一致。

1.3 田间气样采集和分析测试方法

试验采用原状土柱培养 - 乙炔抑制法^[2]。具体做法为, 采用 PVC 材料制作成 $12.5 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ 的圆形培养桶, 底部密封, 桶侧面和桶盖各有一抽气或充气孔, 用橡皮塞塞住, 桶与盖之间垫上一密封圈, 用螺丝固定使桶与盖密封。每个桶中放入 8 个用内径 3.2 cm 的不锈钢土钻取出 15 cm 长的原状土柱, 每个小区取 2 桶土样, 一桶不充乙炔气体为 N_2O 排放量, 另一桶充乙炔气体为反硝化损失量 (乙炔浓度 10 %)。密封后埋在地里 24 h, 然后用注射器抽取 20 mL 气体注入 18 mL 的真空玻璃瓶中, 带回室内进行分析。

气体样品分析应用美国惠普公司产的 HP6890 气相色谱, 色谱柱为填充 80/100 目 porapak Q 的填充柱, 柱温 45°C , 检测器温度 380°C , ECD 检测, 定量六通阀进样, 进样量 1 mL , 载气为 5 % Ar-CH_4 , 流速 20 mL min^{-1} 。气体重量计算公式: $\text{N}_2\text{O} (\text{N kg hm}^{-2}) = M \times 1.25 \times 10^{-9} \times (V_1 - V_2) / S \times 10$, M 为测定的 N_2O 浓度 (g mL^{-1}), V_1 桶的体积 (mL), V_2 土壤体积 (mL), S 土柱表面积 (m^2)。

2 结果与分析

2.1 菜田反硝化活性与 N_2O 排放量的时间变化

图 1 显示, 土壤反硝化活性有明显的时间变化。未施氮处理, 反硝化损失量的变幅为 $0.003 \sim 1.15 \text{ kg hm}^{-2} \text{ d}^{-1}$; 施氮处理的变幅为 $0.011 \sim 2.36 \text{ kg hm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。但两个处理均一致出现了 3 次较强的反硝化活性, 施氮肥处理比未施氮肥处理更强烈。反硝化活性的增强并不是在施肥后就出现, 而是随土壤水分变化而变化, 第 3 次施肥后因土壤含水量较低而未出现较强的反硝化活性。2003 年 7 月份以后南方一直大面积干旱, 土壤水分含量较低, 对土壤反硝化作用和 N_2O 排放有很大影响。

在茄子的整个生长期, N_2O 排放量也有明显的时间变化 (图 2)。未施氮肥条件下, N_2O 排放量变幅为 $0.006 \sim 0.45 \text{ kg hm}^{-2} \text{ d}^{-1}$; 施氮肥条件下变幅为 $0.004 \sim 2.16 \text{ kg hm}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 施氮肥处理的排

放峰明显高于未施氮肥处理。图 1 和图 2 中还可以看出, N_2O 排放与反硝化活性的变化是同步的, 施肥处理与未施肥处理的变化趋势也一致。可见, 它们都是受土壤水分调节的。

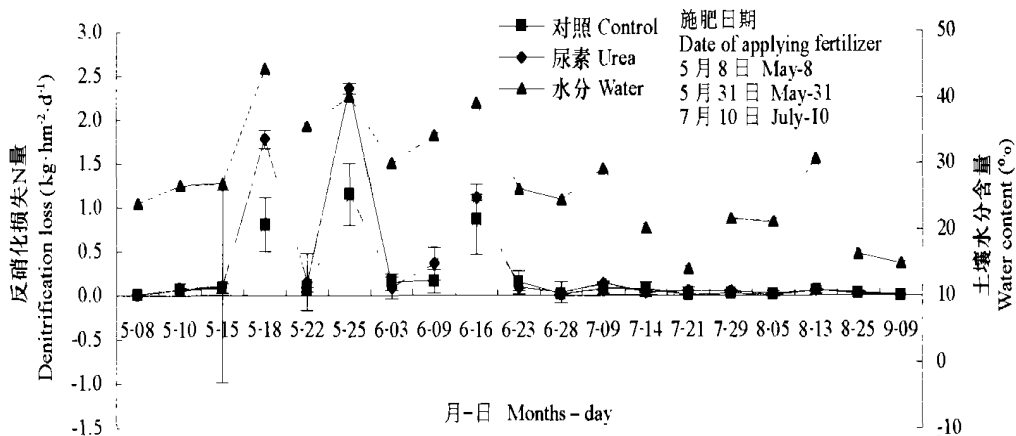


图 1 蔬菜地反硝化作用动态变化

Fig. 1 Temporary changes of denitrification activity in vegetable field

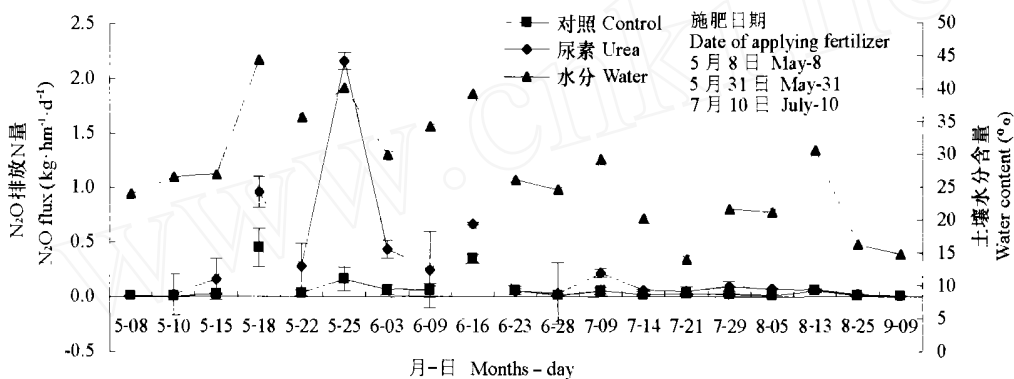


图 2 蔬菜地 N_2O 排放量动态变化

Fig. 2 Temporary changes of N_2O flux in vegetable field

2.2 菜田土壤中氮素含量的时间变化

从图 3 中可以看出, 土壤中氮素含量有明显变化。尿素氮肥作基肥施用后, 在土壤脲酶作用下水解成铵态氮, 使土壤中的铵态氮含量逐渐升高, 1 周左右达到高峰, 然后降低; 而这时期土壤中硝态氮的含量较低。尿素第 1 次、第 2 次追肥后, 土壤中铵态氮含量都有升高, 硝态氮含量也相应增加,

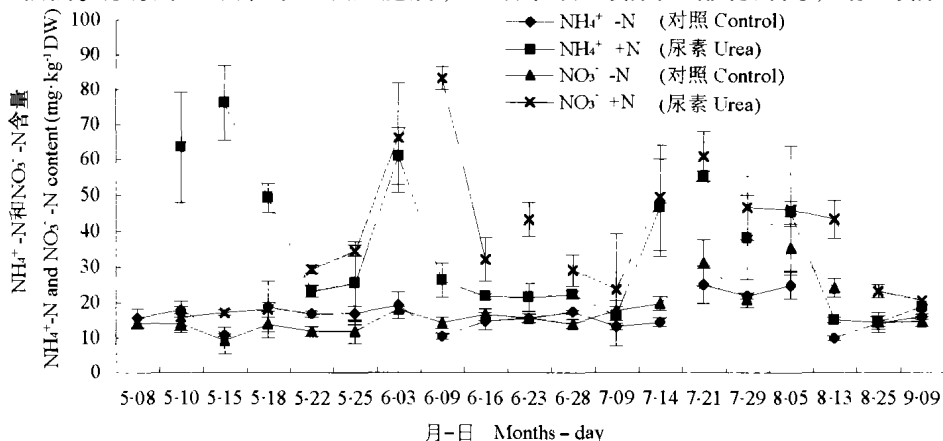


图 3 土壤中硝态氮与氨态氮含量的变化

Fig. 3 Temporary changes of NH_4^+ - N and NO_3^- - N content in soil

而且硝态氮含量一直比铵态氮含量较高，这是由于土壤硝化作用逐渐使铵态氮转化成硝态氮。这一结果也表明，蔬菜地具有较高的硝化活性。

2.3 菜田反硝化活性和 N₂O 排放与土壤水分、含氮量的关系

土壤硝化 - 反硝化活性和 N₂O 排放受诸多因子的影响，如土壤水分、质地、pH、有机质含量、含氮量、温度和微生物群体量与活性等。表 1 数据显示，氮肥产生的 N₂O 排放量和反硝化损失量与土壤水分含量极显著正相关，而与 NH₄⁺、NO₃⁻ 含量无显著相关性。可以认为，在诸多影响因子中哪一种为主要限制因子，在不同生态地区、同一地区不同季节作物甚至同一季节不同作物上是不同的，在大多数情况下是受多个因子的综合影响。试验表明，在本试验区加强水分管理是更为重要的，对调节土壤硝化 - 反硝化活性和 N₂O 排放具有关键性作用。

2.4 菜田氮肥的反硝化损失量与产生 N₂O 排放量

不施氮肥条件下，菜地土壤氮素的反硝化损失量和 N₂O 排放量分别为 N 22.8 kg·hm⁻²和 N 8.2 kg·hm⁻²；施氮肥条件下分别达 N 37.9 kg·hm⁻²和 N 33.8 kg·hm⁻²，极显著高于对照。氮肥反硝化损失量和产生的 N₂O 排放量分别为 N 15.1 kg·hm⁻²和 N 25.6 kg·hm⁻²，占施肥量的 5.1 %和 8.6 %。这是由于菜地长期大量施肥，土壤肥力较高，加上水分条件好，增强反硝化作用活性，造成一定量的氮素损失；值得注意的是，氮肥的继续使用大大增加了 N₂O 的排放量，其排放量明显高于反硝化损失量，比对照增加 3 倍多，这是一个不容忽视的环境问题。

3 讨论

蔬菜地有别于常规农作物地，常年精耕细作，复种指数高，氮肥用量大，肥水条件优越。大量的氮肥施入土壤后的去向如何，损失量有多大，产生多少温室气体排放等问题国内还研究不多，特别是在田间条件直接测定还未见报道。土壤硝化 - 反硝化作用在氮素循环中起着重要作用，开展这方面研究对于氮素调控具有重要作用。土壤硝化 - 反硝化作用受诸多因子影响，一种或几种条件适宜，都有可能造成较高的氮素损失率和大量的 N₂O 排放。本试验中，造成氮肥反硝化损失和 N₂O 大量排放主要是受土壤水分影响的，氮肥反硝化损失量占施肥量的 5.1 %，N₂O 排放量占施肥量的 8.6 %；总的来看，硝化 - 反硝化总损失量保守估计也在施肥量的 10 % 以上，这与国外的一些报道相似^[2~4]。因此认为，在本试验条件下硝化 - 反硝化作用是蔬菜地氮肥的主要损失途径之一。不过这一结果与笔者和国内其它一些研究者在华北地区旱作系统研究的结果有一定差异^[6,7]。在华北地区的旱作系统中，测定反硝化损失量和 N₂O 排放量的结果均较低，并认为硝化 - 反硝化作用可能不是氮肥的主要损失途径，这可能与南北方试验地的土壤性质、肥力状况、水分条件以及气候方面的差异有关。北方试验地土壤质地较轻、气候较为干燥以及田间土壤水分大部分时间呈不饱和状态，土壤好气性较强，不利于反硝化作用发生；而南方试验地土壤质地粘重，气温较高，雨水丰富且蔬菜地频繁浇灌，易造成厌氧状态，有利于反硝化作用进行，加之蔬菜地氮素供应丰富，因此氮肥硝化 - 反硝化损失量较高。应引起注意的是，本试验蔬菜地施用氮肥产生大量的 N₂O 排放，比在北方旱作系统中测得的结果高出十几至几十倍，对大气环境带来严重的影响。产生大量的 N₂O 的原因可能是，一方面因菜地土壤有较强的硝化活性产生 N₂O，另一方面由于该土壤条件虽会促进反硝化作用，但并非处于淹水状态，整个土壤层的嫌气性还不是很强，致使反硝化产物相当一部分以 N₂O 形式排放，而未进一步还原成 N₂。

表 1 反硝化活性和 N₂O 排放与土壤水分、含氮量的关系
Table 1 Relationship of denitrification activity and N₂O flux with soil moisture and nitrogen content

| 因子 Factors | N ₂ O 排放通量 N ₂ O flux | | 反硝化活性 Denitrification activity | |
|---|--|-----------|-----------------------------------|-----------|
| | | | | |
| | CK(n = 19) | U(n = 18) | CK(n = 19) | U(n = 18) |
| 水分含量 Water content | 0.746 ** | 0.684 ** | 0.757 ** | 0.735 ** |
| NH ₄ ⁺ 含量 NH ₄ ⁺ - N content | - 0.104 | - 0.058 | - 0.033 | - 0.074 |
| NO ₃ ⁻ 含量 NO ₃ ⁻ - N content | - 0.180 | - 0.077 | - 0.279 | - 0.167 |

**表示极显著相关。 ** Means 1 % significant.

由此看来, 如何对氮肥在土壤中的转化进行调控值得进一步深入研究。

目前, 对土壤氮素硝化 - 反硝化作用进行调控的措施主要有: 1) 改进施肥方法, 氮肥深施可以使肥料集中土壤中, 减少土壤表层或田间表层水中氮肥浓度, 能有效地减缓氮肥的硝化速率。2) 改进肥料剂型, 开发应用缓/控释肥料能大大降低硝化作用以及氮肥损失与 N_2O 排放。3) 应用脲酶抑制剂和硝化抑制剂, 脲酶抑制剂可以减缓尿素水解, 使肥料易于向土层中移动或扩散, 降低表层中铵离子浓度, 从而降低硝化作用。硝化抑制剂则是直接抑制硝化微生物活性而降低硝化作用的。4) 改善农业管理措施, 如确定适宜氮肥用量、增施有机肥、增加覆盖、调节微生物活性和合理灌溉等, 其中土壤水分管理更重要。土壤干湿交替频繁会促进硝化 - 反硝化作用的发生, 因此管理上尽可能减少浇灌水次数, 特别是避免大水漫灌。

参考文献:

- 1 李庆远, 朱兆良, 于天仁. 中国农业持续发展中的肥料问题. 南昌: 江西科学技术出版社, 1997, 38 ~ 51
- 2 Aulakh M S, Doran J W, Mosier A R. Soil denitrification-significance, measurement, and effect of management. *Advances in Soil Science*, 1992, 18: 1 ~ 57
- 3 Hauck R D. Nitrogen fertilizer effects on nitrogen cycle processes. In: Clark F E, Rossval T, eds. *Terrestrial N Cycle. Ecol. Bull. (Processes, Ecosystems strategies and Management Impact) Ecol. Bull. (Stockholm)*. 1981, 33: 551 ~ 562
- 4 Ryden J C, Lund L J. Nature and extent of directly measured denitrification losses from some irrigated vegetable crop production units. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44: 505
- 5 Goffman P M. A conceptual assessment of the importance of denitrification as a source of soil nitrogen loss in tropical agro-ecosystems. *Fertilizer Research*, 1995, 42: 139 ~ 148
- 6 丁 洪, 蔡贵信, 王跃思, 等. 玉米 - 潮土系统中氮肥硝化反硝化损失和 N_2O 排放. *中国农业科学*, 2001, 34 (4): 416 ~ 421
- 7 张玉铭, 董文旭, 曾江海, 等. 玉米地土壤反硝化速率与 N_2O 排放通量的动态变化. *中国生态农业学报*, 2001, 9 (4): 70 ~ 72
- 8 IPCC Report. Estimated sources and sinks of nitrous oxide. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 205p
- 9 Bouwman A F. Exchange of greenhouse gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere. In: Bouwman A F, ed. *Soil and the Greenhouse Effect*. New York: Wiley, 1990, 61 ~ 127
- 10 CAST. Preparing US agriculture for global climate change. Task Force Report no. 119. Iowa: Council for Agricultural Science and Technology, 1992, 1 ~ 96

欢迎购阅下列新书

- | | | |
|-------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| 1 - 1 《英汉生物学词汇》(第二版) 99 元 | 1 - 27 《实用分子生物学方法手册》32 元 | 1 - 51 《拉汉英种子植物名称》(第3版) 134 元 |
| 1 - 2 《英汉/汉英生物化学词汇》30 元 | 1 - 31 《被子植物有性生殖图谱》96 元 | 1 - 52 《分子克隆实验指南》(第三版) 187 元 |
| 1 - 3 《拉汉英农业害虫名称》90 元 | 1 - 32 《基因工程原理》(第二版) 上册 58 元 | 1 - 53 《生物信息学: 序列与基因组分析》82 元 |
| 1 - 7 《PCR 技术实验指南》(译) 110 元 | 1 - 33 《基因工程原理》(第二版) 下册 78 元 | 1 - 54 《生物化学技术原理及应用》(第三版) 45 元 |
| 1 - 8 《植物生理与分子生物学》94 元 | 1 - 34 《基因及其表达》24 元 | 1 - 55 《基因工程》49 元 |
| 1 - 9 《汉英生物学词汇》106 元 | 1 - 38 《植物生殖遗传学》30 元 | 1 - 56 《分子生物学》89 元 |
| 1 - 10 《新英汉病毒学词典》36 元 | 1 - 39 《蛋白质技术手册》33 元 | 1 - 57 《微注射和转基因实验指南》66 元 |
| 1 - 11 《蛋白质结构分析》(译) 46 元 | 1 - 41 《英汉生物化学及分子生物学词典》88 元 | 1 - 58 《真核生物转录调控——概念、策略和方法》86 元 |
| 1 - 13 《蛋白质电泳实验技术》29 元 | 1 - 42 《生物技术概论》23 元 | 1 - 59 《DNA 与 RNA 基本操作技术》52 元 |
| 1 - 14 《分子遗传学》70 元 | 1 - 43 《分子细胞生物学》78 元 | 1 - 60 《蛋白质组学: 从序列到功能》50 元 |
| 1 - 17 《植物分子遗传学》(第二版) 88 元 | 1 - 44 《现代遗传学原理》77 元 | 1 - 62 《植物基因工程》(第2版) 97 元 |
| 1 - 22 《英汉化学化工词汇》(第四版) 110 元 | 1 - 45 《分子克隆实验指南》(第三版英文原版) 1300 元 | 1 - 63 《基因组》55 元 |
| 1 - 24 《精编分子生物学实验指南》(译) 123 元 | 1 - 48 《细胞信号转导》(第三版) 55 元 | 1 - 64 《植物数量性状遗传体系》57 元 |
| 1 - 25 《植物分子生物学实验指南》(译) 52 元 | 1 - 50 《细胞实验指南》(译)(上、下) 244 元 | 1 - 65 《体外培养的原理与技术》165 元 |
| 1 - 26 《蛋白质纯化与鉴定实验指南》(译) 52 元 | | |

以上价格已含邮资。购书者请通过邮局汇款至北京中关村南大街 12 号《园艺学报》编辑部, 邮编: 100081。