

不同施氮量及施氮比例对橡胶园土壤无机氮运移特征的影响

任常琦, 张永发, 王 帅, 罗雪华, 薛欣欣, 赵春梅, 王文斌*

中国热带农业科学院橡胶研究所/土壤肥料研究中心, 海南海口 571101

摘 要: 橡胶树是重要的经济树种, 为探究橡胶园合理的施肥量, 设置不同氮肥用量的田间试验, 明确中期和后期施肥后橡胶园的氮素运移特征。设置 4 个处理: ①空白对照 (CK), 不施肥; ②常规施肥 (C, 施肥总量 2 kg/株, 前期: 中期: 后期=5:3:2); ③减量施肥 (J, 施肥总量 1.6 kg/株, 前期: 中期: 后期=5:3:2), 减量施肥相当于常规施肥减量 20%; ④同步施肥 (T, 施肥总量 1.6 kg/株, 前期: 中期: 后期=3:3:2)。结果表明: 不同施肥处理的橡胶园土壤氮素运移特征不同, 以垂直运移为主, 水平运移在 5 cm 内波动明显, 随着水平距离的增加, 不再有明显变化。中期施肥铵态氮主要迁移至 40~60 cm, 而后期施肥铵态氮主要停留在 0~20 cm。无机氮的变化趋势与铵态氮一致, 无机氮主要以铵态氮的形式赋存。在后期施肥, 铵态氮和硝态氮的迁移能力均有所减弱, 向深层土壤的迁移减少。因此, 调整施肥量和施肥时间, 有利于提高橡胶园氮肥利用率, 减少氮素损失。

关键词: 橡胶园; 施肥量; 铵态氮; 硝态氮; 水平; 垂直

中图分类号: S794.1; S147.22 文献标识码: A

Effects of Different Nitrogen Application and Ratios on the Transportation Characteristics of Soil Inorganic Nitrogen in Rubber Plantations

REN Changqi, ZHANG Yongfa, WANG Shuai, LUO Xuehua, XUE Xinxin, ZHAO Chunmei, WANG Wenbin*

Rubber Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / Soil and Fertilizer Research Center, Haikou, Hainan 571101, China

Abstract: Rubber tree is an important economic tree species. In order to explore the reasonable amount of fertilization in rubber plantations, field experiments with different nitrogen fertilizer dosages were set up to clarify the nitrogen transportation characteristics of rubber plantations after mid- and late-stage fertilization. Four treatments were set up: ① blank control (CK), no fertilization; ② conventional fertilization (C, total fertilization 2 kg/plant, early stage : middle stage : late stage=5 : 3 : 2); ③ reduced fertilization (J, total fertilization 1.6 kg/plant, early stage : middle stage : late stage =5 : 3 : 2), and the reduction of fertilization is equivalent to a 20% reduction in conventional fertilization; ④ simultaneous fertilization (T, total fertilization 1.6 kg/plant, early stage : middle stage : late stage=3 : 3 : 2). The results showed that the characteristics of soil nitrogen transportation in rubber plantations with different fertilization treatments were different, mainly vertical transportation, and horizontal transportation fluctuated significantly within 5 cm, and there was no obvious change with the increase of horizontal distance. The ammonium nitrogen in the mid-term fertilization mainly transported to 40–60 cm, while the ammonium nitrogen in the later fertilization mainly stayed at 0–20 cm. The trend of inorganic nitrogen was consistent with that of ammonium nitrogen, the main form of soil inorganic nitrogen under different fertilization treatments was ammonium nitrogen. The transportation ability of both ammonium and nitrate nitrogen was reduced and the transportation to deep soil was reduced in the late fertilization. Therefore, adjusting the amount and time of fertilization is beneficial to improving the utilization rate of nitrogen fertilizer in rubber plantations and reduce nitrogen loss.

Keywords: rubber plantation; fertilization application; ammonium nitrogen; nitrate nitrogen; horizontal; vertical

收稿日期 2022-08-01; 修回日期 2022-09-23

基金项目 国家重点研发计划项目 (No. 2020YFD1001200); 海南省自然科学基金项目 (No. 421QN337, No. 320QN377)。

作者简介 任常琦 (1991—), 女, 硕士, 研究方向: 土壤养分管理。*通信作者 (Corresponding author): 王文斌 (WANG Wenbin), E-mail: mywwb@163.com。

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.08.010

天然橡胶是世界各国国防和经济发展不可或缺的战略物资。在全球 2500 种以上的产胶植物中, 橡胶树 (*Hevea brasiliensis*) 是商品天然橡胶生产的唯一来源。因此, 橡胶树被大量种植于亚洲、非洲、大洋洲、拉丁美洲 40 多个国家和地区。我国也是天然橡胶的主产国之一, 种植面积约为 116.1 万 hm^2 , 居世界第 3 位。然而, 近年来, 随着天然橡胶消费量的持续增长, 如何保障天然橡胶稳产、增产已成为我国急需解决的难题。

土壤肥力是限制橡胶树产胶能力的重要因子。然而, 在过去的 50 年中, 由于长期持续割胶和施肥不当, 胶园土壤肥力下降严重, 肥力综合质量指数仅为 0.30~0.66^[1]。其中, 土壤氮素亏损最为严重。仅 1977—1998 年, 胶园土壤全氮含量即下降了 0.23%~0.33%^[2]。因此, 近年来, 施用氮肥成为调控胶园土壤肥力的重要举措。然而, 目前对于胶园土壤的氮素管理, 大多仅关注氮肥的肥力效应, 少有关注氮肥施用对土壤氮素组分运移规律的影响。这限制了胶园土壤氮素的精准管理和风险调控。要想促进橡胶树快速生长, 提高胶乳产量, 提高胶乳品质和延长经济寿命, 同时提高肥料利用率, 合理施肥是一项重要的措施。

众所周知, 土壤氮主要包括硝态氮、铵态氮和有机态氮, 其中硝态氮和铵态氮是可直接被吸收利用的, 但这 2 种形态的氮含量不足氮素的 5%, 且极易损失^[3-4]。施用氮肥可提升土壤有效态氮含量, 但由于土壤氮素生物化学转化、吸附-解吸、植物吸收等过程的影响^[5-6], 氮肥施用量和施用方式因土壤类型和作物类型而异。不当的氮肥施用方式不但会降低氮肥利用率^[7], 也可能导致无机氮淋失引起的水体污染等环境问题^[8-10]。与温带土壤不同, 我国胶园土壤为砖红壤, 土壤偏酸性, 且该区域具有高温、降雨强度大、淋溶性强等特点。这意味着胶园土壤氮素淋失风险高, 急需摸清氮肥施用量对土壤无机氮组分赋存特征和运移规律, 以减少氮淋失。同时, 与其他作物不同, 橡胶树作为一种热带特有的多年生、大型经济乔木, 不但在垂直-水平方向根圈范围广, 且常年经历割胶行为对氮素的损耗, 因此, 还应进一步在垂直-水平方向上, 评价不同时期施肥对土壤氮素的影响。然而, 过去的研究不但少有关注氮肥施用对胶园土壤氮素组分的影响, 更仅考虑

一次施肥的影响。

综上, 根据橡胶树管理特点和种植区砖红壤氮素易淋失的特点, 本研究在田间尺度上, 研究不同氮肥施用量、施用时期对胶园土壤无机氮组分的水平和垂直运移特征。研究结果可为胶园土壤的合理施肥和氮素的精准管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究地点位于海南省儋州市中国热带农业科学院试验场 (109°29'11.219" E, 19°29'6.215" N)。该地区属热带季风气候, 年平均气温为 23.8 °C, 年均降雨量约为 1650 mm, 但降雨分布不均, 5—11 月是雨季, 占全年降水量的 70%~90%, 12 月至翌年 4 月是旱季。选取长势一致的热研 7-33-97 成龄橡胶树, 树龄为 14 a, 割龄为 6 a, 于 2005 年定植, 2013 年开割, 胶园内株行距为 3.0 m×7.0 m, 土壤基本理化性质如下: pH 4.80, 有机碳为 6.33 g/kg, 全氮为 0.59 g/kg, 有效磷为 19.65 mg/kg, 速效钾为 41.17 mg/kg, 硝态氮为 3.98 mg/kg, 铵态氮为 2.59 mg/kg, 容重为 1.46 g/cm^3 , 砂粒为 52.07%, 粉粒为 29.77%, 黏粒为 18.16%。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 在橡胶树种植过程中, 通常每年施肥 3 次, 本研究以全年的常规施肥量为基础, 减少 20% 的施肥量作为减量施肥处理, 以及在减少 20% 用量的同时, 将施肥量后移, 作为同步施肥处理, 所施肥料均为复合肥, N : P_2O_5 : K_2O = 14 : 7 : 9, 具体施肥量见表 1。试验采用完全随机区组设计, 设置 4 个处理: ①空白对照 (CK), 不施肥; ②常规施肥 (C, 施肥总量 2 kg/株, 前期 : 中期 : 后期 = 5 : 3 : 2); ③减量施肥 (J, 施肥总量 1.6 kg/株, 前期 : 中期 : 后期 = 5 : 3 : 2), 减量施肥相当于常规施肥减量 20%。④同步施肥 (T, 施肥总量 1.6 kg/株, 前期 : 中期 : 后期 = 3 : 3 : 2), 前期同步施肥相当于常规施肥减量 40%, 中期和后期与常规施肥量相同。每个处理重复 3 次, 共 12 个小区, 总面积为 2.73 hm^2 。肥料分别于研究当年的 4 月底 (前期)、6 月底 (中期) 和 9 月底 (后期) 施入施肥穴内并覆土, 施肥穴位于 2 株橡胶树之间, 距离橡胶树主干垂直距离 1.5 m, 大小为 80 cm×20 cm×20 cm。

表 1 不同处理的施肥量
Tab. 1 Fertilizer application in different treatments

处理 Treatment	总施肥量 Total fertilization amount/ (kg·株 ⁻¹)	前期 Early stage/ (kg·株 ⁻¹)	中期 Medium stage/ (kg·株 ⁻¹)	后期 Later stage/ (kg·株 ⁻¹)
CK	0	0	0	0
C	2.00	1.00	0.60	0.40
J	1.60	0.80	0.48	0.32
T	1.60	0.60	0.60	0.40

1.2.2 样品采集 于施肥当年的 5 月底（前期）、7 月底（中期）、10 月底（后期）采集施肥穴土壤样品。每个小区分别选择 3 个施肥穴用土钻法采集土样，以施肥穴为取样原位点，在施肥穴里面均匀布置 3 个原位点，每个原位点进行距离施肥穴边缘横向 0（原位点）、5、15、30、45、60 cm 的布点取样，采样深度均为 0~20、20~40、40~60、60~80 cm，每个施肥穴 3 个原位点等距离、同一土层的土壤样品混合成 1 个样品，每个施肥穴共采集土样 72 个。

1.2.3 样品分析 铵态氮和硝态氮用 1 mol/L 的 KCl 浸提，浸提液使用 AA3 连续流动分析仪（德国 seal）分析。

1.3 数据处理

前期施肥数据已经以论文形式发表，本研究选取中期和后期施肥的数据进行分析，使用 SPSS 20.0 软件进行单因素方差分析，利用 Excel 2019 软件绘制图表。

2 结果与分析

2.1 不同施氮水平无机氮在土壤中的水平运移

2.1.1 土壤铵态氮的水平运移 由图 1 可看出，施肥后，土壤铵态氮含量显著增加，尤其是在施肥穴处，常规施肥和同步施肥处理显著高于 CK，并且常规施肥处理和同步处理显著高于减量 20% 处理，这是因为减量 20% 施肥量较少，表明施肥量对土壤铵态氮残留影响较大，施肥量越多，土壤铵态氮残留量越多。施肥穴垂直深度为 0~20 cm 时，在不同的水平距离下，随着距离的增加，土壤铵态氮含量呈降低趋势，尤其是在距施肥穴 5 cm 处，降低明显，在中期施肥中，常规施肥处理由 118.54 mg/kg 降至 32 mg/kg，降低了 73.18%；同步施肥处理降低了 13.84%；在后期施肥中，常规施肥和减量施肥处理在 5 cm 处分别降

低了 88.66%、39.67%。当距施肥穴位置超过 30 cm 后，土壤铵态氮含量不再有明显变化，各处理之间含量达到相近水平。说明施肥量增加，仅在施肥穴处效果显著，并不能提高距施肥穴 30 cm 以外的土壤铵态氮含量。

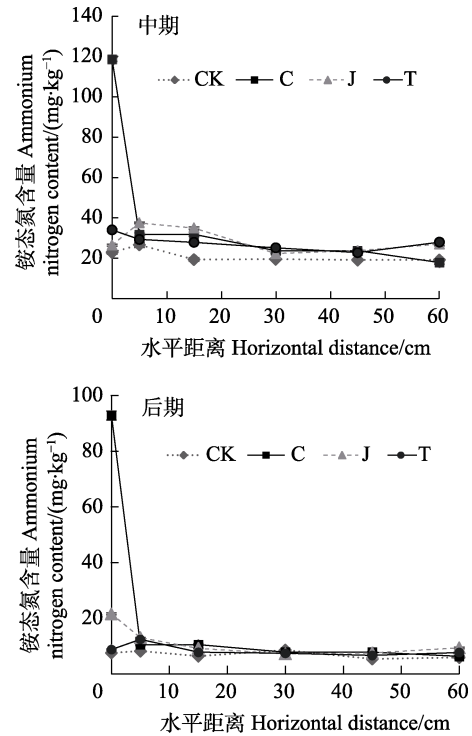


图 1 不同施肥处理水平方向上铵态氮的变化

Fig. 1 Changes of ammonium nitrogen in the horizontal direction of different fertilization treatments

2.1.2 土壤硝态氮的水平运移 由图 2 可看出，施肥后，土壤硝态氮含量增加。施肥穴垂直深度为 0~20 cm 时，在中期施肥时期，硝态氮含量在距施肥穴 5 cm 处达到最大值，随后显著降低，在 30 cm 以外，变化不再明显，在 60 cm 处，减量施肥、同步施肥、CK 处理的硝态氮含量趋于相近水平，但常规施肥处理土壤的硝态氮含量仍明显高于这 3 种处理。说明硝态氮含量很不稳定，施用过多的氮肥，土壤硝态氮可能会随着雨水径流发生水平运移。在后期施肥时期，随着水平距离的增加，土壤硝态氮含量呈降低趋势，尤其是在距施肥穴 5 cm 处，降低明显，常规施肥和减量施肥处理分别降低 83.02%、90.3%，在 30 cm 以外，变化不再明显，在 60 cm 处趋于接近水平。

2.1.3 土壤无机氮的水平运移 由图 3 可看出，施肥后，土壤无机氮含量明显增加，尤其是在施肥穴处的常规施肥和同步施肥处理，显著高于其

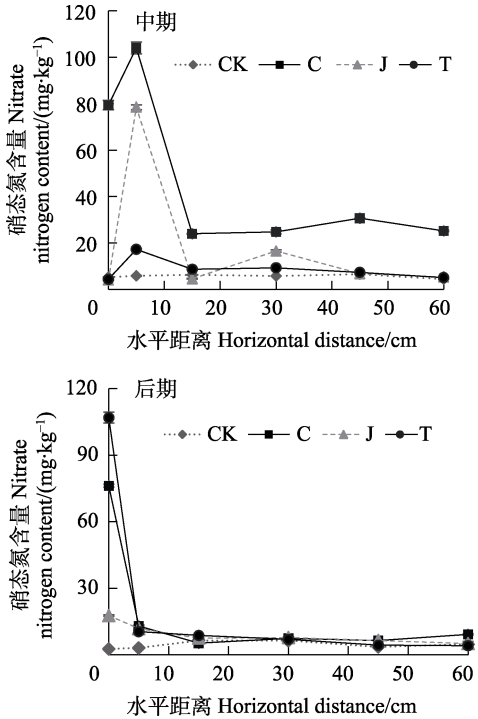


图 2 不同施肥处理水平方向上硝态氮的变化

Fig. 2 Changes of nitrate nitrogen in horizontal direction of different fertilization treatments

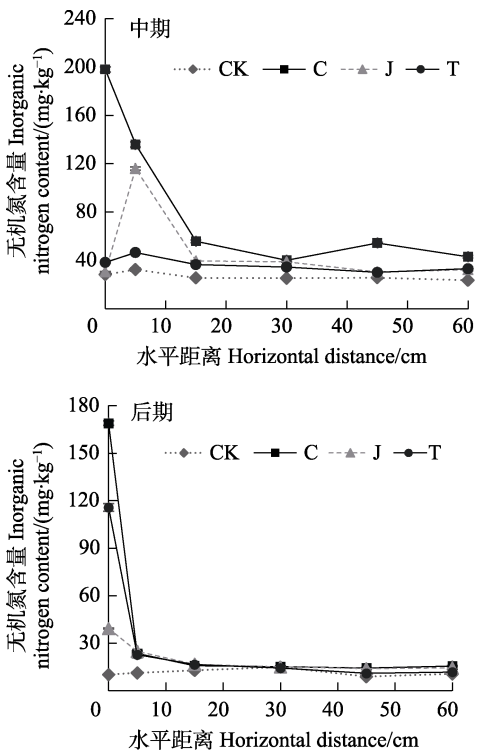


图 3 不同施肥处理水平方向上无机氮的变化

Fig. 3 Changes of inorganic nitrogen in horizontal direction of different fertilization treatments

他 2 种处理。施肥穴垂直深度为 0~20 cm 时，在中期施肥中，随着距离的增加，常规施肥和同步

施肥处理无机氮含量逐渐降低，而减量施肥处理在距离施肥穴 5 cm 处，无机氮含量达到最高值，为 116 mg/kg，随着距离的增加，也逐渐降低；在后期施肥中，随着距离的增加，无机氮含量呈降低趋势，尤其是在距施肥穴 5 cm 处，降低明显，常规施肥和减量施肥处理分别降低 86.12%、80.32%，当距离超过 30 cm 后，变化不再明显，并在 60 cm 处达到相似水平。

2.2 不同施氮水平下无机氮在土壤中的垂直运移

2.2.1 土壤铵态氮的垂直运移 施肥后，在垂直方向上，土壤铵态氮含量显著增加。在中期施肥时期，在垂直深度为 20~40 cm 时，铵态氮含量大小依次是常规施肥 > 减量施肥 > 同步施肥 > 空白处理，但其他深度的铵态氮含量大小均为常规施肥 > 同步施肥 > 减量施肥 > 空白处理，尤其是常规施肥处理，铵态氮含量显著高于其他 3 种处理，这与施肥量有关，施氮量越高，土壤中铵态氮含量越高。随着垂直深度的增加，常规施肥土壤铵态氮含量呈现出先降低后增加的趋势，在 0~20 cm 处铵态氮含量最高，为 118.54 mg/kg，在 40~60 cm 含量最低，为 94.33 mg/kg。同步施肥处理呈现出先增加后降低的趋势，在 40~60 cm 含量达到最大值 77.99 mg/kg。减量施肥处理呈现出先增加后降低的趋势，在 40~60 cm 含量达到最大值 72.35 mg/kg (图 4)。这表明中期施肥会加速铵态氮向深层土壤淋洗，可淋洗至 60~80 cm，但多集中在 40~60 cm 土层。

在后期施肥时期，在垂直深度为 20~40 cm 时，铵态氮含量大小依次是常规施肥 > 同步施肥 > 减量施肥 > 空白处理，但其他深度的铵态氮含量大小均为常规施肥 > 减量施肥 > 同步施肥 > 空白处理，尤其是常规施肥处理，铵态氮含量显著高于其他 3 种处理。随着垂直深度的增加，常规施肥土壤铵态氮含量呈现出先降低后增加的趋势，在 0~20 cm 处铵态氮含量最高，为 92.74 mg/kg，在 40~60 cm 含量最低，为 31.21 mg/kg。同步施肥处理呈现出先增加后降低的趋势，在 20~40 cm 含量达到最大值 11.47 mg/kg。减量施肥处理呈现出先降低后增加再降低的趋势，在 40~60 cm 含量达到最大值 25.8 mg/kg (图 4)。这表明后期施肥会加速铵态氮向深层土壤淋洗，可淋洗至 60~80 cm，但多集中在 0~20 cm 土层。

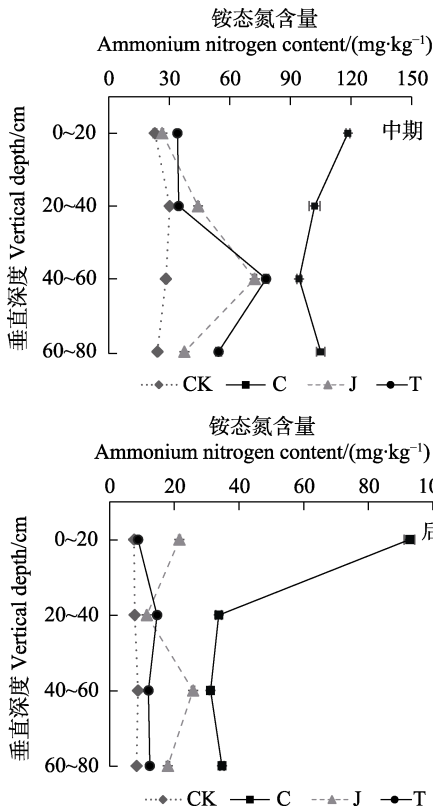


图 4 不同施肥处理垂直方向上铵态氮的变化

Fig. 4 Changes of ammonium nitrogen in vertical direction in different fertilization treatments

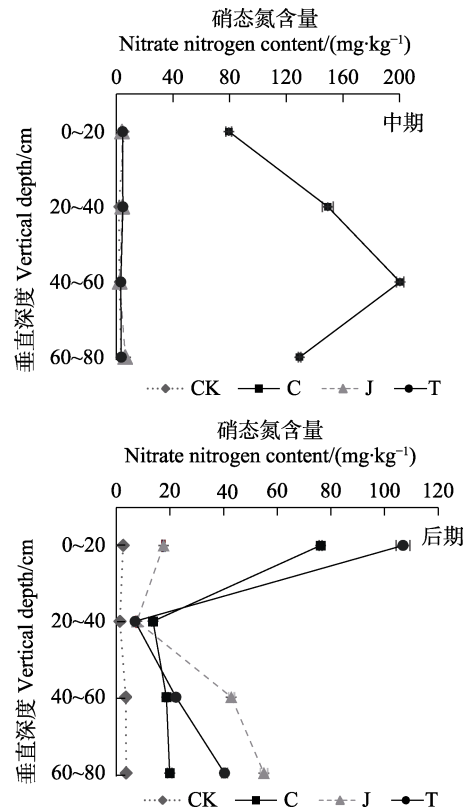


图 5 不同施肥处理垂直方向上硝态氮的变化

Fig. 5 Changes of nitrate nitrogen in vertical direction in different fertilization treatments

2.2.2 土壤硝态氮的垂直运移 中期施肥后，在施肥穴处，常规施肥处理的土壤硝态氮含量显著增加，其他 3 种处理的影响并不明显。在垂直方向上，随着深度的增加，常规施肥处理的硝态氮含量呈先增加后降低的趋势，在 40~60 cm 处达到最大值 200.39 mg/kg (图 5)。说明中期施肥后，硝态氮可淋洗至 60~80 cm，但多集中在 40~60 cm 土层。

后期施肥后，在施肥穴处，各土层的土壤硝态氮含量增加，随着深度的增加，其硝态氮含量呈先降低后增加的趋势，常规施肥和同步施肥在 0~20 cm 残留较多，分别为 76.17、106.9 mg/kg。减量施肥在 40~60 cm 残留较多，为 42.86 mg/kg (图 5)。这说明后期施肥，硝态氮向下淋溶减弱。

2.2.3 土壤无机氮的垂直运移 在中期施肥后 (图 6)，常规施肥呈现出先增加后降低的趋势，在 40~60 cm 处达到最大值 294.73 mg/kg；同步施肥处理呈现出先增加后降低的趋势，在 20~40 cm 处含量最低，为 39.28 mg/kg，在 40~60 cm 达到最大值 80.05 mg/kg；减量施肥呈现出先增加后降低的趋势，在 40~60 cm 处达到最大值 74.71 mg/kg；总体来看，常规施肥>同步施肥>减量施肥，虽然

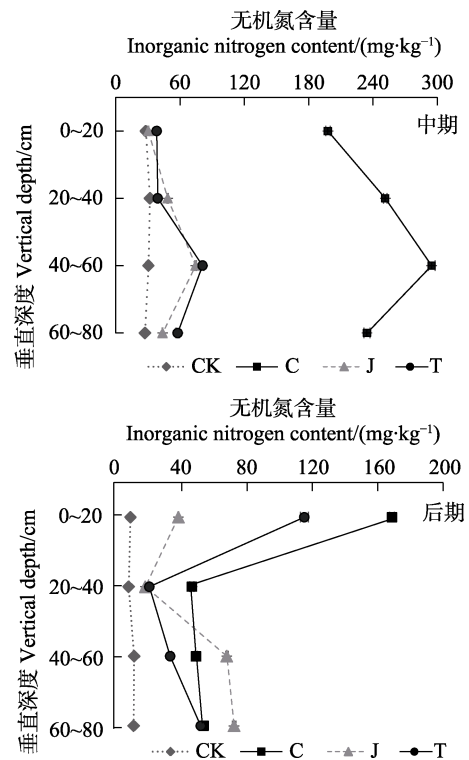


图 6 不同施肥处理垂直方向上无机氮的变化

Fig. 6 Changes of inorganic nitrogen in vertical direction under different fertilization treatments

本次常规施肥和同步施肥的施氮量相同，但在第一次施肥中，常规施肥的施氮量比同步施肥多 20%。这说明施肥量会增加土壤无机氮含量，无机氮主要迁移至 40~60 cm 土层。

在后期施肥后（图 6），在施肥穴处，各土层的土壤无机氮含量增加，随着深度的增加，施肥处理无机氮含量呈先降低后增加的趋势，常规施肥和同步施肥是在 0~20 cm 残留较多，分别为 115.67、168.9 mg/kg。减量施肥在 40~60 cm 残留较多，为 68.66 mg/kg。

2.3 施肥中期不同施氮水平对水平方向上铵态氮和硝态氮占比的影响

由表 2 可知，中期施肥降低了铵态氮的占比，并且在水平方向上呈波动的变化趋势。CK 在不同水平距离下，铵态氮占比无较大变化，减量施肥和同步施肥的铵态氮占比接近，高于常规施肥处理。施肥增加了硝态氮占比，表现为常规施肥>减量施肥>同步施肥。硝态氮占比在水平方向上呈波动的变化趋势，在距施肥穴 5 cm 处占比较高。说明施肥改变了土壤中的铵态氮和硝态氮的分布和运移。

由表 2 可知，后期施肥降低了铵态氮的占比，并且在水平方向上呈波动的变化趋势，呈现减量

施肥>常规施肥>同步施肥。施肥增加了硝态氮占比，表现为常规施肥>同步施肥>减量施肥。硝态氮占比在水平方向上呈波动的变化趋势，在距施肥穴 15 cm 处占比较高。说明施肥改变了土壤中的铵态氮和硝态氮的分布和运移。

2.4 不同施氮水平对垂直方向上铵态氮和硝态氮占比的影响

由表 3 可知，常规施肥处理降低了垂直方向上铵态氮占比，减量施肥和同步施肥处理与 CK 差别小。随着深度的增加，常规施肥处理铵态氮占比呈先降低后增加，在 0~20 cm 占比最高，这与常规施肥处理表层较高的铵态氮含量有关；减量处理和同步处理铵态氮占比呈先增加后降低的趋势，并在 40~60 cm 达到最高值，说明铵态氮迁移主要停留在 40~60 cm 土层。

常规施肥处理增加了垂直方向上硝态氮占比，减量施肥和同步施肥处理与 CK 差别小。随着深度的增加，常规施肥处理铵态氮占比呈先增加后降低，在 40~60 cm 达到最大值；而减量施肥和同步施肥呈先降低后增加的趋势，在 0~20 cm 占比较高。说明本次施肥硝态氮在 0~20 cm 土层聚集，但施肥量增加，引起硝态氮向下淋洗，使其在 40~60 cm 聚集较多。

表 2 水平方向土壤中铵态氮和硝态氮占无机氮的比例

Tab. 2 Proportion of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen in total inorganic nitrogen in horizontal soil after first fertilization %

时期 Stage	指标 Index	处理 Treatment	0 cm	5 cm	15 cm	30 cm	45 cm	60 cm
中期	铵态氮占比	CK	81.22	82.04	75.69	77.33	74.68	81.50
		C	59.88	23.39	57.07	59.01	43.59	41.53
		J	87.05	32.32	88.51	57.56	77.82	83.63
		T	88.71	63.02	76.26	73.05	75.74	84.64
	硝态氮占比	CK	18.78	17.96	24.31	22.67	25.32	18.50
		C	40.12	76.61	42.93	61.66	56.41	58.47
		J	12.95	67.68	11.49	42.44	22.18	16.37
		T	11.29	36.98	23.74	26.95	24.26	15.36
后期	铵态氮占比	CK	74.40	73.00	49.96	57.40	60.70	55.66
		C	125.16	49.99	31.35	29.64	27.92	34.10
		J	54.99	52.44	34.41	48.29	54.05	65.17
		T	7.58	54.46	47.43	51.92	60.68	65.63
	硝态氮占比	CK	25.60	27.00	50.04	42.60	39.30	44.34
		C	45.10	55.15	68.70	48.56	44.97	59.32
		J	45.01	47.56	65.59	51.71	45.95	34.83
		T	92.42	45.54	52.57	48.08	39.32	34.37

表 3 垂直方向土壤中铵态氮和硝态氮占无机氮的比例

Tab. 3 Proportion of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen in total inorganic nitrogen in vertical soil after first fertilization %

时期 Stage	指标 Index	处理 Treatment	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	60~80 cm
中期	铵态氮占比	CK	81.22	94.62	92.73	88.28
		C	59.88	40.57	32.01	44.80
		J	87.05	91.29	96.85	85.58
		T	88.71	88.29	96.22	94.05
	硝态氮占比	CK	18.78	5.38	7.27	11.72
		C	40.12	59.43	67.99	55.20
		J	12.95	8.71	3.15	14.42
		T	11.29	11.71	3.78	5.95
后期	铵态氮占比	CK	74.40	84.98	71.08	69.13
		C	54.90	71.11	62.51	63.56
		J	54.99	59.83	37.57	24.66
		T	7.58	67.62	35.09	23.53
	硝态氮占比	CK	25.60	15.02	28.92	30.87
		C	45.10	28.89	37.49	36.44
		J	45.01	40.17	62.43	75.34
		T	92.42	32.38	64.91	76.47

由表 3 可知，后期施肥降低了铵态氮占比，铵态氮占比呈常规处理 > 减量处理 > 同步处理，随着深度的增加，各施肥处理铵态氮占比呈先增加后降低的趋势，在 20~40 cm 占比最高，说明铵态氮迁移主要停留在 20~40 cm 土层。后期施肥增加了硝态氮占比，硝态氮占比呈同步处理 > 减量处理 > 常规处理，随着深度的增加，各施肥处理铵态氮占比呈先降低后增加的趋势，常规处理和同步处理的硝态氮在 0~20 cm 占比最高，减量处理在 60~80 cm 占比最高。说明硝态氮能迁移至 60~80 cm 土层，但在 0~20 cm 聚集较多。

3 讨论

施肥量和施肥方式会综合影响土壤水分和溶质运移^[11]，在阳离子交换量低的橡胶园土壤，雨季降雨量大且频繁，淋洗严重，施入的氮肥极易随雨水淋溶^[12]，氮肥过量或不合理施用是引起土壤硝态氮淋溶的主要原因^[13]。并且施氮水平越高，淋溶损失越大^[14]。

王火焰等^[15]研究指出，肥料养分利用率低是由于常规施肥措施下，土壤中肥料养分的供应时间、空间、浓度和用量无法与作物需求匹配。但分次施用氮肥能改善作物氮素需求与供应的匹配度，提高氮素利用效率^[16]。本研究结果也验证了该观点，中期施肥，各施肥处理的铵态氮、硝态

氮和无机氮含量整体水平方向的残留情况为：CK < 同步施肥 < 减量施肥 < 常规施肥；后期施肥，各施肥处理的硝态氮和无机氮含量整体水平方向的残留情况为：CK < 减量施肥 < 同步施肥 < 常规施肥，且常规施肥方式的残留量远远大于其他施肥方式。因此，在不同时期调整施肥量，对于减少氮肥损失，提高肥料利用率是十分必要的。

本研究中，在水平方向上，铵态氮含量随着距离的增加逐渐降低，在 0~5 cm 内骤降，但硝态氮含量在中期 0~5 cm 内增加，后期 0~5 cm 内骤降，随后变化不明显，这可能与该地区的温度和降水有关。硝态氮是一种通过静电力与土壤胶体发生作用的非专性吸附阴离子，通常不易被带负电的土壤胶体所吸附，主要以溶质的形式存在于土壤溶液中，其运移速率随土壤含水量的不同而相应地变化。已有研究表明，硝态氮受土壤含水量影响较大，其水平运移浓度随土壤含水量增加而减少^[17]。本研究中，中期较后期温度更高，降水更少，使中期的硝态氮水平运移增加，含量升高。祁栋灵等^[18]也发现，橡胶林土壤硝态氮含量季节性变化明显，6 月份含量最高。此外，硝态氮的运移受土层中水分横向移动较弱的限制，在水平方向 6 cm 以内，硝态氮运移速率较大，超过 6 cm，运移速率变化较小^[17]。因此，远离施肥穴的土壤硝态氮变化不明显。而铵态氮易被土壤胶

体吸附, 相对稳定, 水平迁移并不明显。本研究还发现, 在水平方向上, 常规施肥的铵态氮占比明显低于对照。这可能与氮素在土壤中生物化学转化、吸附-解吸、植物吸收等过程有关^[5-6]。如前所述, 土壤氮素亏损是橡胶种植土壤肥力的限制因子^[1-2]。因此, 氮肥施加量越大, 土壤养分就越充足, 微生物的活性就越大。这将会增强土壤的反硝化过程, 进而加剧土壤氮素的流失^[7-10]。尤其在表层土壤, 因与肥料直接接触, 土壤的硝化、反硝化过程会更强烈, 氮素流失效应更强。在常规施肥中, 大量的氮肥施入, 通常对橡胶生长具有更强的促进作用, 这也会加剧土壤中氮素的损耗。此外, 施肥方式不同, 对土壤结构、矿物组成等物理性状的影响也不同, 进而影响土壤氮素在土壤中的持留和淋失^[8-10]。

在合理施肥的情况下, 铵态氮和硝态氮含量会随着土层深度的增加而减少, 但 SIEMENS 等^[13]研究发现, 不合理施肥会导致硝态氮淋溶及土壤深层硝态氮的累积。尤其是在雨热季, 降雨、高温会促使施入的氮肥随着水分向土壤深层淋溶^[19], 导致氮素累积。本研究结果显示, 施肥量对橡胶园土壤垂直方向上氮素运移有显著影响, 铵态氮、硝态氮、无机氮含量整体上表现为: 中期, 常规施肥 > 同步施肥 > 减量施肥 > 空白处理; 后期, 常规施肥 > 减量施肥 > 同步施肥 > 空白处理, 同步施肥和减量施肥氮素迁移远低于常规施肥, 说明这 2 种施肥量是橡胶园合理的施肥用量。中期施肥, 铵态氮和硝态氮发生垂直运移, 主要迁移至 40~60 cm 土层, 并且硝态氮迁移是在施肥量较大的常规施肥处理中, 迁移较为明显。后期施肥, 相对于硝态氮来说, 铵态氮迁移不明显, 并且硝态氮和铵态氮均主要集中在 0~20 cm。说明调整全年施肥比例后, 土壤氮素的运移更加接近合理施肥情况下的氮素变化规律。与硝态氮相比, 通常铵态氮更易被土壤吸附, 在特定条件下借助下渗流的驱动才可能在土壤剖面中随水迁移^[20]。但本研究中, 土壤氮素主要以铵态氮的形式存在。土壤铵态氮占比大于硝态氮占比, 但随着水平距离和垂直深度的增加, 在施肥量较多的常规处理中, 硝态氮占比大于铵态氮。这可能是因为尿素在施入土壤后, 除少量以分子态被土壤吸附, 大部分在土壤中脲酶的作用下, 水解为碳酸铵, 并释放出铵态氮^[21], 在其发生硝化作用之前就发生了迁移, 引起铵态氮占比增加。但施肥量增加,

土壤硝态氮占比也随之提高, 这是由于土壤硝态氮含量会随施氮量的增加而升高^[22]。施肥后, 土壤的铵态氮占比降低。与不施肥处理相比, 氮肥(尿素)施入土壤后, 铵态氮的比例降低。这可能与氮肥对土壤微生物的激发效应有关。微生物是激发效应的驱动者, 在自然条件下, 大部分微生物处于休眠或潜在活跃状态^[23], 当向系统中投入无机氮肥后, 能够促进土壤硝化微生物——氨氧化细菌的增长繁殖^[24-26], 从而产生正激发效应。这增加了微生物对土壤无机氮的利用, 而微生物会优先选择能量消耗小的铵态氮利用。这可能会增加对土壤铵态氮的消耗, 表现出施肥后土壤铵态氮占比降低的情况。

土壤中铵态氮和硝态氮的分布趋势还取决于多种因素, 除氮肥施用量、施肥时间的变化外, 作物吸收、微生物对 NH_4^+ 和 NO_3^- 的固定、反硝化、氨挥发等过程均是决定其动态变化的重要因素^[8, 27-29]。因此, 对于橡胶林氮素水平-垂直方向运移, 后续还需进行更多、更深入的研究, 才能明确其变化的主导过程及关键因子。

4 结论

不同施肥处理土壤氮素迁移特点有所不同, 以垂直运移为主。土壤氮素水平运移呈现出递减趋势, 在 5 cm 内变化剧烈, 超过 30 cm 后, 变化不再明显。中期施肥铵态氮主要迁移至 40~60 cm, 而后期施肥铵态氮主要停留在 0~20 cm。无机氮的变化趋势与铵态氮一致, 无机氮主要以铵态氮的形式运移, 在后期施肥, 铵态氮和硝态氮的迁移能力均有所减弱, 向深层土壤的迁移减少。说明调整施肥量和施肥时间, 对于减少土壤氮素向深层迁移, 改善氮肥流失有积极作用。

参考文献

- [1] 吴敏, 何鹏, 韦家少. 海南岛胶园土壤肥力的综合评价[J]. 中国土壤与肥料, 2009(2): 1-5.
WU M, HE P, WEI J S. Integrated evaluation of soil fertility for rubber plantation in Hainan province[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2009(2): 1-5. (in Chinese)
- [2] 赵春梅, 王文斌, 茶正早. 我国天然橡胶林养分管理研究现状[J]. 热带农业科学, 2021, 41(2): 10-17.
ZHAO C M, WANG W B, CHA Z Z. Nutrient management for rubber plantation in China[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2021, 41(2): 10-17. (in Chinese)

- [3] GENT L, FORDE B G. How do plants sense their nitrogen status?[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2017, 68: 2531-2539.
- [4] HOBBIIE, E A, HÖGBERG P. Nitrogen isotopes link mycorrhizal fungi and plants to nitrogen dynamics[J]. *New Phytologist*, 2012, 196: 367-382.
- [5] 刘海林, 雷菲, 贝美容, 林清火, 茶正早, 罗微. 胶园土壤氮素矿化特性研究[J]. *西南农业学报*, 2018, 31(12): 2604-2609.
LIU H L, LEI F, BEI M R, LIN Q H, CHA Z Z, LUO W. Study on nitrogen mineralization characters of rubber plantation soils in Hainan[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 31(12): 2604-2609. (in Chinese)
- [6] 陈永川, 刘忠妹, 许木果, 黎小清, 丁华平, 杨春霞, 李春丽. 西双版纳橡胶林土壤氮的分布特征及与橡胶树生长的关系[J]. *西南农业学报*, 2019, 32(3): 584-589.
CHEN Y C, LIU Z M, XU M G, LI X Q, DING H P, YANG C X, LI C L. Spatial distribution of soil nitrogen of rubber tree plantation and its relationship with rubber tree growth in Xishuangbanna[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 32(3): 584-589. (in Chinese)
- [7] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 778-783.
ZHU Z L. Research on soil nitrogen in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 778-783. (in Chinese)
- [8] DE VRIES F T, BARDGETT R D. Plant-microbial linkages and ecosystem nitrogen retention: lessons for sustainable agriculture[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2012, 10(8): 425-432.
- [9] GALLOWAY J N, TOWNSEND A R, ERISMAN J W, BEKUNDA M, CAI Z, FRENEY J R, MARTINELLI L A, SEITZINGER S P, SUTTON M A. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions[J]. *Science*, 2008, 320: 889-892.
- [10] NORTON J, OUYANG Y. Controls and adaptive management of nitrification in agricultural soils[J]. *Front Microbiol*, 2019, 10: 1-18.
- [11] 陈效民, 邓建才, 柯用春, 张佳宝, 朱安宁. 硝态氮垂直运移过程中的影响因素研究[J]. *水土保持学报*, 2003(2): 12-15.
CHEN X M, DENG J C, KE Y C, ZHANG J B, ZHU A N. Study on influence factors in process of nitrate vertical transport[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003(2): 12-15. (in Chinese)
- [12] 林清火, 罗微, 林钊沐, 茶正早. 砖红壤地区旱地土壤肥料养分淋失研究进展[J]. *热带农业科学*, 2003, 23(1): 61-66.
LIN Q H, LUO W, LIN Z M, CHA Z Z. Research advances on leaching of fertilizer nutrients in the latosol areas[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2003, 23(1): 61-66. (in Chinese)
- [13] SIEMENS J, KAUPENJOHANN M. Contribution of dissolved organic nitrogen to N leaching from four German agricultural soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2002, 165(6): 675-681.
- [14] 陈艳彬. 不同施氮水平对幼龄橡胶树氮素贮藏与再利用的影响研究[D]. 海口: 海南大学, 2019.
CHEN Y B. Effects on nitrogen storage and reutilization in young rubber trees caused by different nitrogen supply rates[D]. Haikou: Hainan University, 2019. (in Chinese)
- [15] 王火焰, 周健民. 根区施肥—提高肥料养分利用率和减少面源污染的关键和必需措施[J]. *土壤*, 2013, 45(5): 785-790.
WANG H Y, ZHOU J M. Root-zone fertilization—a key and necessary approach to improve fertilizer use efficiency and reduce nonpoint source pollution from the cropland[J]. *Soils*, 2013, 45(5): 785-790. (in Chinese)
- [16] ZHANG Z J, CHU G, LIU L J, WANG Z Q, WANG X M, ZHANG H, YANG J C, ZHANG J H. Mid-season nitrogen application strategies for rice varieties differing in panicle size[J]. *Field Crops Research*, 2013, 150: 9-18.
- [17] 杜臻杰, 陈效民, 方堃, 邓建强, 王伯仁, 黄晶. 典型红壤旱地硝态氮水平运移规律的研究[J]. *土壤通报*, 2009(6): 1349-1352.
DU Z J, CHEN X M, FANG K, DENG J Q, WANG B R, HUANG J. Study on horizontal transport of nitrate-N in dry land of representative red soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009(6): 1349-1352. (in Chinese)
- [18] 祁栋灵, 杨川, 李子敏, 孙瑞, 张先, 吴志祥. 橡胶树乡土树种混交林土壤有效氮季节动态特征[J]. *森林与环境学报*, 2021, 41(1): 10-17.
QI D L, YANG C, LI Z M, SUN R, ZHANG X, WU Z X. Analysis of the dynamics of available nitrogen under a mixed mode of rubber intercropping with native trees[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2021, 41(1): 10-17. (in Chinese)
- [19] 李玲玲, 李书田. 有机肥氮素矿化及影响因素研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18 (3): 749-757.
LI L L, LI S T. A review on nitrogen mineralization of organic manure and affecting factors[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2012, 18 (3): 749-757. (in Chinese)
- [20] 王少平, 俞立中, 许世远, 程声通. 上海青紫泥土壤氮素淋溶及其对水环境影响研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2002(6): 554-558.
WANG S P, YU L Z, XU S Y, CHENG S T. Nitrogen leaching in the purple clay and analysis on its influence on

- water environmental quality in Shanghai[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2002(6): 554-558. (in Chinese)
- [21] 李学红, 李东坡, 武志杰, 崔磊, 肖富容, 李永华, 郑野, 张金明. 脲酶/硝化抑制剂在黑土和褐土中对尿素氮转化的调控效果[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(4): 1352-1360.
LI X H, LI D P, WU Z J, CUI L, XIAO F R, LI Y H, ZHENG Y, ZHANG J M. Effect of urease / nitrification inhibitor on urea nitrogen conversion in black soil and cinnamon soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(4): 1352-1360. (in Chinese)
- [22] 李晓欣, 胡春胜, 程一松. 不同施肥处理对作物产量及土壤中硝态氮累积的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2003, 21(3): 38-42.
LI X X, HU C S, CHENG Y S. Effects of different fertilizers on crop yields and nitrate accumulation[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2003, 21(3): 38-42. (in Chinese)
- [23] TALBOT J M, ALLISON S D, TRESEDER K K. Decomposers in disguise: mycorrhizal fungi as regulators of soil C dynamics in ecosystems under global change[J]. *Functional Ecology*, 2008, 22(6): 955-963.
- [24] 刘少文, 殷敏, 褚光, 徐春梅, 王丹英, 章秀福, 陈松. 土壤氮激发效应及其微生物机理研究进展[J]. *中国水稻科学*, 2019, 33(4): 303-312.
LIU S W, YIN M, CHU G, XU C M, WANG D Y, ZHANG X F, CHEN S. Research progress of soil nitrogen priming effect and its microbial mechanisms[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2019, 33(4): 303-312. (in Chinese)
- [25] 刁田田. 菜地 N₂O 排放途径及其功能微生物群落组成的关系[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
DIAO T T. Characteristics of N₂O emission pathways and relative dynamics of microbial community in vegetable soils[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015. (in Chinese)
- [26] 郑利芳. 土壤微生物对春玉米地硝态氮阻控措施的影响[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2020.
ZHENG L F. Response of soil microorganism to the control measures of nitrate nitrogen in spring maize field[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education), 2020. (in Chinese)
- [27] PORTIER E, SILVER W L, YANG W H. Invasive perennial forb effects on gross soil nitrogen cycling and nitrous oxide fluxes depend on phenology[J]. *Ecology*, 2019, 100(7): e02716-1- e02716-11.
- [28] 马芬, 杨荣全, 郭李萍. 控制氮肥施用引起的活性氮气体排放: 脲酶/硝化抑制剂研究进展与展望[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(4): 908-922.
MA F, YANG R Q, GUO L P. Decrease the emission of active nitrogen gases in nitrogen fertilizer application: research progresses and perspectives of urease/nitrification inhibitors[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(4): 908-922. (in Chinese)
- [29] 李占台, 李长青, 李艳梅, 孙焱鑫, 王激清, 杨俊刚. 不同施肥模式对设施生菜产量和氮损失的影响[J]. *土壤通报*, 2022, 53(1): 135-143.
LI Z T, LI C Q, LI Y M, SUN Y X, WANG J Q, YANG J G. Effects of different fertilization patterns on yield and nitrogen loss of lettuce in greenhouse[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(1): 135-143. (in Chinese)