

# 梨幼树到结果初期春施 $^{15}\text{N}$ -尿素的利用及其在土壤的残留与损失

梁振旭, 孙明德, 武 阳, 田海青, 杜瑞瑞, 赵艳艳, 刘松忠\*

(北京市林业果树科学研究院, 北京市落叶果树工程技术研究中心, 农业部华北地区园艺作物生物学与种质创制重点实验室, 北京 100093)

**摘 要:** 2014—2016 年, 以‘黄冠’梨为材料, 采用 $^{15}\text{N}$ 示踪技术研究了从幼树期到结果初期梨树对春季施用氮素的吸收利用及土壤残留与损失情况。研究表明, 幼树期(2014—2015 年)梨树生长以中心干和粗根等树体骨干结构建立为主, 生长量相对较小; 进入结果初期(2016 年)后树体生长表现为树体骨干结构建立为主, 枝梢等营养器官生长与产量形成并存, 生长量大幅增加。整个试验期间, 树体贮藏器官的标记氮素吸收量较大, 其中幼树期中心干吸收量最大, 结果初期粗根吸收量最大。0~100 cm 土层标记氮素残留量随土层深度和施用年限增加逐渐降低, 其中, 施用标记氮素后第 1 年(2014 年), 土壤标记氮素残留量较高, 残留率达 63.61%, 梨幼树对标记氮素利用率仅为 3.25%。随后两年(2015—2016 年)土壤残留量较低, 树体对标记氮素利用率仅为 0.51%和 0.80%。试验结束时, 幼树期到结果初期梨树对标记氮素的累计利用率为 4.57%, 土壤标记氮素残留量为 20.34%, 损失率达 75.07%。

**关键词:** 梨; 幼树期; 结果初期;  $^{15}\text{N}$ -尿素; 吸收; 残留后效

**中图分类号:** S 661.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0513-353X (2021) 01-0137-09

## Utilization of $^{15}\text{N}$ -urea Applied in Spring for Pear Trees and Its Residual in Soil and Loss from the No-bearing Stage to the Young Bearing Stage

LIANG Zhenxu, SUN Mingde, WU Yang, TIAN Haiqing, DU Ruirui, ZHAO Yanyan, and LIU Songzhong\*

(Beijing Academy of Forestry and Pomology Sciences, Beijing Engineering Research Center for Deciduous Fruit Tree, Key Laboratory of Biology and Genetic Improvement of Horticultural Crops (North China), Ministry of Agriculture, Beijing 100093, China)

**Abstract:** To investigate the uptake and utilization of nitrogen and its residual and loss in the soil of ‘Huangguan’ pear trees during the no-bearing stage to the young bearing stage, the growth of various organs and the uptake, residual and loss of labeled nitrogen at 0 – 100 cm soil layers were studied during the years of 2014 – 2016 with  $^{15}\text{N}$  tracer technique. The results showed that the growth of pear trees in the no-bearing stage (2014 – 2015) mainly displayed in the growth of the central trunk and coarse root with a lower growth rate. However, it showed that the establishment of tree structure, the growth of vegetative

**收稿日期:** 2020 – 04 – 08; **修回日期:** 2020 – 07 – 20

**基金项目:** 国家科技支撑计划项目 (2014BAD16B03-3); 国家重点研发计划项目 (2019YFD1000102); 北京市农林科学院科技创新专项 (KJCX20170111, KJCX20180701)

\* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: szliu1978@163.com)

organs such as branches and shoots, and the formation of yield and quality coexisted in the young bearing stage. During the whole experiment period, the amount of labeled nitrogen absorbed by the storage organs of the tree was larger, among which absorption of the central trunk's uptake was the largest in the no-bearing stage, while the amount of labeled nitrogen absorbed by the coarse roots was the largest among all tested organs in the young bearing stage. After the application of labeled nitrogen in the first year (2014), the utilization rate of labeled nitrogen was 3.25% for the pear trees, while the residual rate of labeled nitrogen in 0 - 100 cm soil layer was higher accounting for 63.61%. In the following two years (2015 - 2016), the residual amount of soil was lower, and the utilization rate of labeled nitrogen for pear trees was only 0.51% and 0.80%. By the end of the experiment, the utilization rate and residual rate of labeled nitrogen was 4.57% and 20.34% respectively, however, the three-year loss rate was as high as 75.07%.

**Keywords:** pear; no bearing stage; young bearing stage;  $^{15}\text{N}$ -urea; uptake; residual effect

在中国, 目前梨主要分布在立地条件差、土壤瘠薄的丘陵山地、河滩或旱源地区, 梨园普遍存在土壤有机质含量低、保肥保水能力差、养分供应能力普遍不足的问题。同时由于梨高产量负荷、低根系密度的特性, 养分利用率低, 而且高产量带走大量养分, 需要维持较高的根层养分供给才能满足树体生长发育与产量品质形成的需要(姜远茂等, 2007)。氮素在果树生长与增产等方面发挥了重要作用(彭福田等, 2002; Raese et al., 2007; Roccuzzo et al., 2017; 侯昕等, 2019; Setea et al., 2019; Meng et al., 2020)。这也导致目前梨树生产中存在氮素尤其是化肥氮连年施用且施用量偏高的现象非常普遍(董彩霞等, 2012; 谢凯等, 2013), 从而带来较大的环境风险(卢树昌等, 2008; 赵佐平等, 2014)。

针对梨园土壤养分状况及梨树所处的生育阶段, 采取相应的氮素管理策略是减少氮素投入, 实现梨生产提质增效的重要手段。适量的氮素投入可以降低库尔勒梨园土壤的  $\text{N}_2\text{O}$  排放(王成等, 2018), 果树发育后期施氮不利于树体吸收(Quartieri et al., 2002), 氮素合理的施用深度与施用时期有利于提高利用效率, 降低氮素损失(武阳等, 2017; Wu et al., 2019)。这些研究着重探讨了施氮对当年土壤氮素残留与损失的影响, 但是残留在土壤中的氮素可能被后茬作物或来年被吸收利用, 形成残留后效(Krupnik et al., 2004)。因此, 探究土壤氮素的残留后效, 在节省氮素投入、提高氮素利用率及降低环境影响等方面具有经济与生态价值, 在小麦、玉米等大田作物及其轮作体系等方面已开展了许多研究(Jia et al., 2011; Alonso-Ayuso et al., 2016; Quemada et al., 2019), 在果树方面报道较少。

梨树幼树期到结果初期是由栽植到形成稳定树体结构的时期, 也是由营养生长为主到以生殖生长为主的过渡时期。本研究中, 以华北地区主栽品种‘黄冠’梨为材料, 采用  $^{15}\text{N}$  同位素示踪技术, 研究了连续施氮条件下, 梨幼树定植施用氮素后连续 3 年树体对氮素的吸收利用及标记氮素在土壤中的残留与损失情况, 以期为幼树期到结果初期梨树优质安全生产的氮素管理提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与试验设计

试验于 2014 年 3 月—2016 年 10 月在北京市林业果树科学研究院(39°56'N, 116°56'E)进行。

试验地土壤为粘壤土, 0 ~ 100 cm 土层养分含量如表 1 所示。一年生梨苗(黄冠/杜梨, 本课题组自育)于 2014 年 3 月 25 日定植, 株距 1.0 m, 行距 3.5 m, 南北行向。树行起垄, 两侧垄上覆盖地布, 地布下铺设滴灌管。

表 1 试验地土壤理化性状  
Table1 Physical and chemical characteristics of the experimental soil

| 土层/cm<br>Soil layer | 有机质/ (g · kg <sup>-1</sup> )<br>Organic matter | 碱解氮/ (mg · kg <sup>-1</sup> )<br>Alkali-hydrolysable<br>nitrogen | 有效磷/ (mg · kg <sup>-1</sup> )<br>Available<br>phosphorus | 有效钾/ (mg · kg <sup>-1</sup> )<br>Available<br>potassium | pH   |
|---------------------|--|--|--|---|------|
| 0 ~ 20              | 18.3   | 75.8   | 128.4  | 102.2   | 7.80 |
| 20 ~ 40             | 18.7   | 58.4   | 237.3  | 90.4  | 7.90 |
| 40 ~ 60             | 11.2   | 48.1   | 82.3   | 74.7  | 8.07 |
| 60 ~ 80             | 9.4  | 38.7   | 70.6   | 55.1  | 8.09 |
| 80 ~ 100            | 8.1  | 32.5   | 53.8   | 49.9  | 8.13 |

定植后, 选取树体高度、冠幅及长势基本一致的 9 株梨树, 分为 3 组, 每组 3 株, 单株重复。自 2014 年开始, 连续 3 年均进行施氮处理(氮源为尿素), 其中第 1 年添加丰度为 10.19%的 <sup>15</sup>N 标记尿素(上海化工研究院生产), 第 2 年、第 3 年不添加 <sup>15</sup>N, 每年施用日期与折算为纯氮的用量及磷(过磷酸钙, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量 12.0%)、钾(硫酸钾, K<sub>2</sub>O 含量 52.0%)的用量如表 2 所示。施用方法: 在距梨树中心干 20 cm 处挖深 10 cm、宽 10 cm 的环状沟, 将尿素用水溶解后均匀浇入, 将磷、钾肥折算为单株用量后一并施入, 然后盖土。整个试验期间(含定植前)不再施用其他肥料。其他按梨园正常生产进行, 管理水平较高。

表 2 肥料施用时期与施用量  
Table 2 Fertilizer application data and rate in the experiment g · 株<sup>-1</sup>

| 施氮日期<br>Date of N application | 施氮量 N application rate            |  |               | 施磷量<br>P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> application<br>rate | 施钾量<br>K <sub>2</sub> O application<br>rate |
|-------------------------------|-----------------------------------|--|---------------|--|---|
|                               | 未标记氮素施用量<br>Urea application rate | <sup>15</sup> N 施用量<br><sup>15</sup> N-urea application rate | 总施氮量<br>Total |  |   |
| 2014 - 04 - 26                | 16.16                             | 1.38   | 17.54         | 8.77   | 17.54                                       |
| 2015 - 03 - 18                | 26.30                             | 0  | 26.30         | 13.15  | 26.30                                       |
| 2016 - 03 - 20                | 35.08                             | 0  | 35.08         | 17.54  | 35.08                                       |

1.2 样品采集与测定

植株样品采集方法: 定植前随机选取 3 株梨树并解析为中心干和根, 测定基础生物量与全氮含量。分别于 2014 年 11 月 15 日、2015 年 11 月 13 日、2016 年 8 月 16 日将 3 组试验植株进行破坏性采样, 并分解为叶片、短梢、中长梢、一年生枝(2015、2016 年)、两年生枝(2016 年)、中心干、粗根(直径 ≥ 0.2 cm)、细根(直径 < 0.2 cm)和果实(2016 年), 依次用清水、洗涤剂、清水、1%盐酸、去离子水(3 次)冲洗后, 105 °C 下杀青 30 min, 随后在 70 °C 下烘干, 粉碎后过 0.25 mm 筛, 混匀后用于测定来自肥料中的氮(Nitrogen derived from fertilizer, Ndff)(顾曼如, 1990)和全氮含量。

土壤样品采集方法: 分别于 2014 年 11 月 14 日、2015 年 11 月 11 日和 2016 年 8 月 15 日, 在植株东南西北 4 个方向距树干 20 和 40 cm 处共设 8 个土壤采样点, 用土钻在每个采样点垂直方向分别采集 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80 和 80 ~ 100 cm 土层土壤样品。将同一层土壤样品混合, 实验室风干、过筛后, 采用四分法取样进行 Ndff 和全氮含量测定。

所有样品测定均在中国农业科学院农产品加工研究所进行，<sup>15</sup>N 丰度用 MAT251 型同位素比值质谱仪（Thermo Finnigan, USA）测定，全氮用 QSY-II 半自动凯氏定氮仪（北京强盛分析仪器制造中心）测定。

计算公式：

Ndff（%）=（植物样品中 <sup>15</sup>N 丰度 - <sup>15</sup>N 自然丰度）/（肥料中 <sup>15</sup>N 丰度 - <sup>15</sup>N 自然丰度）× 100。

标记氮素利用率（%）= [器官 Ndff× 器官全氮量（g）]/标记氮素施用量（g）× 100。

标记氮肥残留率（%）=（土壤 Ndff× 土层全氮量/标记氮素施用量（g）× 100。

标记氮素损失率（%）= 1 - 标记氮素利用率 - 标记氮素残留率。

### 1.3 数据处理

用 Microsoft Excel 2013 软件进行数据处理和作图，用 SPSS23.0 分析软件进行单因素方差分析，差异显著性检验用 LSD 法，显著性水平 α = 0.05，表中数据为平均值 ± 标准差。

## 2 结果与分析

### 2.1 幼树期到初果期梨树各器官生物量

自 2014 年 3 月定植到 2016 年 8 月试验结束，共进行了 4 次植株样品采集测定（表 3，表 4）。定植后第 1 年（至 2014 年 11 月），梨树生长量较小，仅为 108.4 g，其中地上部中心干生长量最大，中长梢次之，这两个器官的生长量共占当年生长量的 65.6%；根系生长量相对较小，仅占当年植株总生长量的 25.8%。定植后第 2 年（2015 年），树体生物量迅速增加，尤其是中心干生长量最大，占当年总生长量比例达 52.0%，中长梢与叶片生长量也有一定增加；粗根的生长量仅次于中心干，占总生长量的 25.7%，但细根的生长量较小。进入结果初期后（2016 年），树体生物量大幅度增加，且生长量为 2015 年生长量的 2.87 倍。其中粗根的生长量占当年植株总生长量的 33.4%，显著高于其他器官；地上部中心干、一年生枝和叶片生长量分别占总生长量的 10.7%、14.9%和 15.1%；另外，果实生物量也占当年生长量的 19.1%。这表明，梨幼树期（2014—2015 年）树体生长主要以中心干和根，尤其是粗根生长为主，即以树体骨干结构建立为中心；进入结果初期后则表现为树体骨干结构建立、枝梢等营养器官生长和产量品质形成并存。

表 3 不同采样时期梨树平均单株各器官生物量  
Table3 Biomass of organs of pear trees at sampling data in 2014 - 2016 g

| 采样日期<br>Sampling<br>data | 叶片<br>Leaf | 短梢<br>Short<br>shoot | 中长梢<br>Medium<br>and long<br>shoot | 一年生<br>枝<br>1-Year<br>branch | 二年生<br>枝<br>2-Year<br>branch | 中心干<br>Trunk | 粗根<br>Coarse<br>root | 细根<br>Fine<br>root | 果实<br>Fruit | 单株总量<br>Total<br>Biomass |
|--------------------------|------------|----------------------|------------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------|----------------------|--------------------|-------------|--------------------------|
| 2014 - 03                | —          | —                    | —                                  | —                            | —                            | 35.8 a       | 34.2 a               | —                  | —           | 70.0 ± 7.4               |
| 2014 - 11                | 7.3 e      | 2.1 f                | 25.8 c                             | —                            | —                            | 81.1 a       | 45.8 b               | 16.4 d             | —           | 178.4 ± 12.1             |
| 2015 - 11                | 57.3 d     | 5.2 g                | 91.0 c                             | 29.1 e                       | —                            | 428.5 a      | 217.6 b              | 18.5 f             | —           | 847.0 ± 19.7             |
| 2016 - 08                | 348.5 c    | 39.1 f               | 146.7 e                            | 317.6 d                      | 34.9 f                       | 634.8 b      | 863.3 a              | 24.0 g             | 368.7 c     | 2 777.4 ± 96.1           |

注：同一行不同小写字母表示同一采样时期树体各器官生物量在  $P < 0.05$  水平差异显著；— 代表没有检测到。下同。  
Note: The small letters after the data mean biomass of organs sampled at the same time had significantly difference at  $P < 0.05$ . “—” means not detected. The same below.

表 4 各器官年生长量占植株总生长量比例  
Table 4 The ratio of the annual growth of each organ to the total growth of the plant in 2014 - 2016 %

| 年份<br>Year | 叶片<br>Leaf | 短梢<br>Short shoot | 中长梢<br>Medium and long shoot | 一年生枝<br>1-Year branch | 二年生枝<br>2-Year branch | 中心干<br>Trunk | 粗根<br>Coarse root | 细根<br>Fine root | 果实<br>Fruit |
|------------|------------|-------------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|-------------------|-----------------|-------------|
| 2014       | 6.7        | 1.9               | 23.8                         | —                     | —                     | 41.8         | 10.7              | 15.1            | —           |
| 2015       | 7.5        | 0.5               | 9.8                          | 4.4                   | —                     | 52.0         | 25.7              | 0.3             | —           |
| 2016       | 15.1       | 1.8               | 2.9                          | 14.9                  | 1.8                   | 10.7         | 33.4              | 0.3             | 19.1        |

2.2 梨树各器官对 <sup>15</sup>N-尿素的吸收与利用

梨幼树定植施用 <sup>15</sup>N 尿素后, 3 年试验期间各个采样时期测定的 Ndff 如表 5 所示。各器官的 Ndff 值随树龄增加逐渐降低, 并且 2015 年和 2016 年与 2014 年差异较大。定植后当年 (2014 年), 短梢和中长梢 Ndff 分别为 2.566 和 2.603, 两者将差异不显著, 但均显著高于其他器官; 叶片由于收获时养分回流导致 Ndff 显著低于其它器官。第 2 年 (2015 年) 的测定结果显示, 细根 Ndff 最高, 为 0.632; 中心干、粗根等贮藏器官的 Ndff 分别为 0.593 和 0.589, 仅次于细根; 新梢和叶片等新生营养器官的 Ndff 相对较低。第 3 年 (2016) 各器官 Ndff 变化趋势与 2015 年相似, 但贮藏器官中二年生枝 Ndff 相对较高, 果实 (生殖器官) 中 Ndff 最低。

表 5 不同采样时期梨树各器官 Ndff  
Table 5 Ndff of organs of pear trees at sampling data in 2014 - 2016 %

| 采样日期<br>Sampling data | 叶片<br>Leaf | 短梢<br>Short shoot | 中长梢<br>Medium and long shoot | 一年生枝<br>1-Year branch | 二年生枝<br>2-Year branch | 中心干<br>Trunk | 粗根<br>Coarse root | 细根<br>Fine root | 果实<br>Fruit |
|-----------------------|------------|-------------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|-------------------|-----------------|-------------|
| 2014 - 11             | 1.919 d    | 2.566 a           | 2.603 a                      | —                     | —                     | 2.127 c      | 2.038 cd          | 2.369 b         | —           |
| 2015 - 11             | 0.485 d    | 0.558 c           | 0.413 e                      | 0.444 de              | —                     | 0.593 b      | 0.589 b           | 0.632 a         | —           |
| 2016 - 08             | 0.168 g    | 0.187 f           | 0.165 g                      | 0.186 f               | 0.294 b               | 0.262 c      | 0.226 d           | 0.302 a         | 0.201 e     |

经计算, 平均单株各器官的标记氮素吸收量如表 6 所示。试验期间, 幼树期到初果期梨树的平均单株标记氮素吸收量分别为 44.79、50.28 和 55.85 mg, 呈逐渐增加的趋势, 但第 2 年 (2015 年) 和第 3 年 (2016 年) 增加的幅度较小。定植后第 1 年 (2014 年), 树体贮藏器官的标记氮素吸收量较高, 其中中心干吸收量最高 (17.26 mg), 显著高于其他器官; 营养器官中中长梢的吸收量最高 (8.30 mg), 但显著低于中心干和粗根, 叶片、短梢和细根中吸收量相对较低。第 2 年的测定值也有相似的趋势。进入结果初期后 (2016 年), 粗根的标记氮素吸收量为 23.73 mg, 显著高于其他器官, 叶片次之, 其他营养器官与果实吸收量相对较低。

表 6 不同采样时期梨树平均单株各器官标记氮素吸收量  
Table 6 Labelled-N uptake of organs of pear trees at sampling data in 2014 - 2016 mg

| 采样日期<br>Sampling data | 叶片<br>Leaf | 短梢<br>Short shoot | 中长梢<br>Medium and long shoot | 一年生枝<br>1-Year branch | 二年生枝<br>2-Year branch | 中心干<br>Trunk | 粗根<br>Coarse root | 细根<br>Fine root | 果实<br>Fruit | 单株总量<br>Total Biomass |
|-----------------------|------------|-------------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|-------------------|-----------------|-------------|-----------------------|
| 2014 - 11             | 1.54 e     | 0.70 e            | 8.30 c                       | —                     | —                     | 17.26 a      | 12.32 b           | 4.48 d          | —           | 44.79 ± 3.42          |
| 2015 - 11             | 4.57 c     | 0.42 d            | 4.52 c                       | 1.53 d                | —                     | 22.16 a      | 15.72 b           | 1.36 d          | —           | 50.28 ± 4.87          |
| 2016 - 08             | 12.40 b    | 0.60 e            | 1.90 de                      | 4.40 d                | 0.58 e                | 9.42 c       | 23.73 a           | 0.64 e          | 2.16 de     | 55.85 ± 5.05          |

## 2.3 不同土层土壤 $^{15}\text{N}$ - 尿素残留量

为了更为准确测定土壤氮素残留情况, 对 0 ~ 100 cm 深度土壤分 5 层对土壤  $\text{Ndff}$  进行了测定, 并计算了土层标记氮素残留量如图 1 所示。施用  $^{15}\text{N}$  尿素当年 (2014 年), 各个土层标记氮素残留量较高, 随着时间推移, 第 2 年和第 3 年相同土层标记氮素残留量逐渐降低。就不同土层而言, 同一采样时期, 随土层深度增加标记氮素残留量逐渐降低。同时, 施用  $^{15}\text{N}$  尿素后当年, 0 ~ 60 cm 土层标记氮素残留量相对较高, 60 ~ 100 cm 土壤相对较低。2015 年则表现为 0 ~ 40 cm 土层残留量相对较高, 而 2016 年仅 0 ~ 20 cm 土层残留量相对较高。

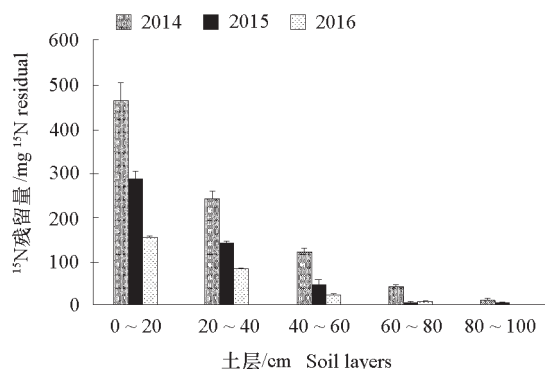


图 1 不同采样时期梨树园各土层标记氮素残留量  
Fig. 1 Labeled-N residual of soil layers for pear trees at sampling data in the year of 2014 - 2016

## 2.4 梨树整体植株对 $^{15}\text{N}$ 吸收利用及土壤残留和损失

如表 7 所示, 梨幼树定植后施用  $^{15}\text{N}$  尿素, 当年 (2014 年) 植株对标记氮素吸收量最大, 平均单株 44.79 mg, 第 2 年 (2015 年) 和第 3 年 (2016 年) 对土壤残留标记氮素的吸收量分别为 7.08 和 11.24 mg。整个试验过程中, 植株对标记氮素的累计吸收量也由施氮当年的 44.79 mg, 提高到 63.11 mg; 氮素累计利用率也由 3.25% 逐渐增加到 4.57%。施氮后当年 (2014 年) 标记氮素的土壤残留量为 877.8 mg, 残留率达 63.61%, 第 2 年和第 3 年的残留量分别为 497.1 和 280.7 mg, 残留率也由 36.02% 降低到 20.34%, 表明施用标记氮素后第 3 年土壤仍然残留。从计算出的  $^{15}\text{N}$  损失情况来看, 第 1 年的标记氮素损失量为 457.4 mg, 损失率为 33.12%, 第 2 年和第 3 年的损失量分别为每株 373.6 和 205.2 mg, 年损失率分别为 27.10% 和 14.86%, 表明标记氮素的损失率逐渐降低。但是在整个试验过程中标记氮素损失量逐渐增加, 试验结束时总损失量为 1 036.2 mg, 累计损失率高达 75.12%。

表 7 梨树平均单株  $^{15}\text{N}$  吸收与利用、土壤残留与损失情况  
Table 7 Uptake, residual and loss of labelled-N for pear trees during the year of 2014 - 2016

| 年份<br>Year | $^{15}\text{N}$ 吸收与利用 $^{15}\text{N}$ Uptake and utilization |                         |   |   | $^{15}\text{N}$ 残留 $^{15}\text{N}$ Residual |                              |
|------------|--|-------------------------|---|---|---|------------------------------|
|            | 年吸收/mg<br>Annual uptake                                      | 累计吸收/mg<br>Total uptake | 年利用率/%<br>Annual utilization percentage | 累计利用率/%<br>Total utilization percentage | 残留量/mg<br>Residual                          | 残留率/%<br>Residual percentage |
| 2014       | 44.79 ± 3.42   | —                       | 3.25 ± 0.07                             | —                                       | 877.8 ± 6.7                                 | 63.61 ± 0.48                 |
| 2015       | 7.08 ± 1.13  | 51.87 ± 6.22            | 0.51 ± 0.05                             | 3.77 ± 0.26                             | 497.1 ± 12.4                                | 36.02 ± 0.90                 |
| 2016       | 11.24 ± 2.05   | 63.11 ± 5.47            | 0.80 ± 0.09                             | 4.57 ± 0.48                             | 280.7 ± 15.5                                | 20.34 ± 1.13                 |
| 年份<br>Year | $^{15}\text{N}$ 损失 $^{15}\text{N}$ Loss                      |                         |   |   |   |                              |
|            | 年损失/mg<br>Annual loss  | 累计损失/mg<br>Total loss   | 年损失率/%<br>Annual loss percentage        | 累计损失率/%<br>Total loss percentage        |   |                              |
| 2014       | 457.4 ± 8.4  | —                       | 33.12 ± 0.61                            | —                                       |   |                              |
| 2015       | 373.6 ± 9.7  | 831.3 ± 67.2            | 27.10 ± 1.08                            | 60.22 ± 4.26                            |   |                              |
| 2016       | 205.2 ± 11.2   | 10 036.2 ± 94.4         | 14.86 ± 0.85                            | 75.07 ± 3.93                            |   |                              |

## 3 讨论

目前中国梨生产体系中氮素的施用量一直呈现较高态势。谢凯等 (2013) 对环渤海湾地区中国梨栽培面积前 3 位的河北、辽宁和山东梨园氮素投入量的调查结果表明, 其主要梨园氮素投入量分

别为 998、967 和  $540 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 其中化肥氮素投入量分别为 777、781 和  $251 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。董彩霞等(2012)对中国主要梨园的调查结果也表明梨生产中氮素投入量较大。本课题组于 2015—2016 年对北京、山东、河北、辽宁、陕西、山西等北方地区典型盛果期梨园的调查(数据未发表)发现生产中氮素投入量过大。

根系尤其是吸收根数量必然影响树体对养分的吸收(束怀瑞, 1995)。本研究中, 梨树栽植后第 1 年(2014 年), 根系的生长量较小, 进入结果初期(2016 年)根系生物量才成倍数增加, 树体的总生物量也呈现相同的变化。这也导致了树体在第一年对氮素的需求量较小, 标记氮素的利用率较低(3.25%), 与 Menino 等(2007)对未结果梨树氮素利用率的研究结果相似(6.00%)。Neto 等(2008)的研究也显示, 梨幼树在栽植后第 1 年吸收的氮主要来自于土壤氮, 来自于肥料氮的量较小。因此, 在低氮素利用率的情况下, 当氮素施用量超过了树体的需求量, 多余的氮素一部分通过挥发或土壤淋失损失, 另一部分残留在土壤中。同时如果土壤残留氮量过高会对根系生长产生负面影响(Othman & Leskovar, 2019)。

本研究中, 施用标记氮后第 2 年和第 3 年均在梨树体和土壤中检测到, 表明第 1 年施用的氮素存在残留后效。但是, 受自然降水淋失、挥发及为了与生产中的实际氮素投入情况一致每年均施用氮素产生的稀释效应等影响, 导致标记氮素在  $0 \sim 100 \text{ cm}$  土层的残留量低, 造成梨幼树期到结果初期(2015 年、2016 年)对残留标记氮素的利用率较低, 仅为 0.51%和 0.80%。许多学者对残留氮素的再利用进行了研究。Riley 等(2016)认为土壤残留氮没有后茬效应, Zhao 等(2015)的研究也证实长期施肥条件下土壤残留氮的后茬效应较低。本研究结果与上述研究一致, 比 Ladha 等(2005)估计的小麦对上茬残留氮素的利用率( $< 7.00\%$ )还低。本研究中, 施用的标记氮素在 3 年中的利用率仅为 4.57%, 明显低于盛果期梨树对春季施氮的利用率(武阳 等, 2017; 王前登 等, 2018; Wu et al., 2019), 这也导致了氮素的残留量和损失量均相对较高。其中, 施用氮肥后当年标记氮素残留率高达 63.61%, 高于赵伟等(2015)小麦肥料氮残留盆栽试验的研究(约 33.33%), 这主要是由于试验作物及试验条件不同所致。相关研究(解文艳 等, 2015; 倪雪 等, 2019)认为, 干旱、地面覆盖等措施可阻控氮素向深层土壤淋失, 提高上中层土壤的氮素残留。因此, 本研究中采用的滴灌水分调控、起垄覆盖地布等措施(Masvaya et al., 2017; Li et al., 2018), 在一定程度上提高了  $0 \sim 100 \text{ cm}$  土壤的氮素残留。施肥后随着时间推移, 氮素残留量逐渐降低, 氮素损失率逐渐提高。到试验结束时, 本研究中的标记氮素残留量为 20.34%, 而 3 年的损失率高达 75.07%。因此, 在土壤氮素残留量较高的情况下应控制氮素用量, 以免造成氮素资源浪费(石德杨 等, 2013)。

本研究中, 新栽植梨树对春施标记氮素的吸收量少、利用率低, 导致当年土壤标记氮素残留量较高。虽然残留在土壤中的标记氮素在随后两年存在残留后效, 但树体对残留标记氮素的利用率较低, 这也导致本研究中幼树期到结果初期梨树对标记氮素的累计利用率低、损失量较高。本试验仅开展了春季施氮对幼树期到结果初期梨树氮素吸收利用及其土壤氮素残留后效的研究, 今后还需要结合施用时期、施用量、施用方法与形态等氮素管理方法与梨树生长发育阶段及土壤养分状况等进一步探讨如何提高当年氮的利用率、贮藏氮的再利用及对土壤残留氮的连续吸收等, 以期建立以高利用、低残留为核心的梨优质丰产氮素利用技术。

## References

- Alonso-Ayuso M, Gabriel J L, Quemada M. 2016. Nitrogen use efficiency and residual effect of fertilizers with nitrification inhibitors. *European Journal of Agronomy*, 80: 1 - 8.
- Dong Cai-xia, Jiang Hai-bo, Zhao Jing-wen, Xu Yang-chun. 2012. Current fertilization in pear orchards in China. *Soil*, 44 (5): 754 - 761. (in Chinese)

- 董彩霞, 姜海波, 赵静文, 徐阳春. 2012. 我国主要梨园施肥现状分析. 土壤, 44 (5): 754 - 761.
- Hou Xin, Xu Xinxiang, Jia Zhihang, Yu Tianwu, Ge Shunfeng, Jiang Yuanmao. 2019. Effect of nitrogen supply levels on growth and expression of glutamine, glutamate and asparagine synthase genes of 'M9T337' apple rootstock. Acta Horticulturae Sinica, 46 (11): 2239 - 2248. (in Chinese)
- 侯 昕, 徐新翔, 贾志航, 于天武, 葛顺峰, 姜远茂. 2019. 供氮水平对苹果砧木 'M9T337' 幼苗生长和GS、GOGAT、AS基因表达的影响. 园艺学报, 46 (11): 2239 - 2248.
- Gu Man-ru. 1990. The application of  $^{15}\text{N}$  in the study of nitrogen nutrition of apple. China Fruits, (2): 46 - 48. (in Chinese)
- 顾曼如. 1990.  $^{15}\text{N}$ 在苹果氮素营养研究中的应用. 中国果树, (2): 46 - 48.
- Jia S, Wang X, Yang Y, Dai K, Meng C, Zhao Q, Zhang X, Zhang D, Feng Z, Sun Y, Wu X, Cai D, Grant C. 2011. Fate of labeled urea- $^{15}\text{N}$  as basal and topdressing applications in an irrigated wheat-maize rotation system in North China Plain: I winter wheat. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 90 (3): 331 - 346.
- Jiang Yuan-mao, Zhang Hong-yan, Zhang Fu-suo. 2007. Theory and practice of nutrition management for deciduous fruit in North China. Beijing: China Agricultural University Press: 13 - 27. (in Chinese)
- 姜远茂, 张宏彦, 张福锁. 2007. 北方落叶果树养分资源综合管理理论与实践. 北京: 中国农业大学出版社: 13 - 27.
- Krupnik T J, Six J, Ladha J K, Paine M J, van Kessel C. 2004. An assessment of fertilizer nitrogen recovery efficiency by grain crops//Mosier A R, Syers J K, Freney J R. Agriculture and the nitrogen cycle: assessing the impacts of fertilizer use on food production and the environment (SCOPE 65). London: Ialand Press: 193 - 207.
- Ladha J K, Pathak H, Krupnik T J, Six J, Kessel C. 2005. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects. Advances in Agronomy, 87: 85 - 156.
- Li N, Zhou C J, Sun X, Jing J Y, Tian X X, Wang L Q. 2018. Effects of ridge tillage and mulching on water availability, grain yield, and water use efficiency in rain-fed winter wheat under different rainfall and nitrogen conditions. Soil & Tillage Research, 179: 86 - 95.
- Lu Shu-chang, Chen Qing, Zhang Fu-suo, Jia Wen-zhu. 2008. Analysis of nitrogen input and soil nitrogen load in orchards of Hebei Province. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 14 (5): 858 - 865. (in Chinese)
- 卢树昌, 陈 清, 张福锁, 贾文竹. 2008. 河北省果园氮素投入特点及其土壤氮素负荷分析. 植物营养与肥料学报, 14 (5): 858 - 865.
- Masvaya E N, Nyamangara J, Descheemaeker K, Giller K E. 2017. Tillage, mulch and fertilier impacts on soil nitrogen availability and maize production in semi-arid Zimbabwe. Soil & Tillage Research, 168: 125 - 132.
- Meng J X, Gao Y, Han M L, Liu P Y, Yang C, Shen T, Li H W. 2020. *In vitro* anthocyanin induction and metabolite analysis in *Malus spectabilis* leaves under low nitrogen conditions. Horticultural Plant Journal, 6 (5): 284 - 292.
- Menino M, Carranca C, Varennes A. 2007. Distribution and remobilization of nitrogen in young non-bearing orange trees grown under mediterranean conditions. Journal of Plant Nutrition, 30: 1083 - 1096.
- Neto C, Carranca C, Clemente J, Varennes A. 2008. Nitrogen distribution, remobilization and re-cycling in young orchard of non-bearing 'Rocha' pear trees. Scientia Horticulturae, 118: 299 - 307.
- Ni Xue, Hao Qing-ju, Chen Shi-jie, Li Xiao-xi, Shi Xiao-jun, Jiang Chang-sheng. 2019. Effects of plastic film mulching and nitrogen fertilizer application on  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from a vegetable field. Environmental Science, 40 (2): 893 - 903. (in Chinese)
- 倪 雪, 郝庆菊, 陈世杰, 李晓茜, 石孝均, 江长胜. 2019. 地膜覆盖和施氮对菜地  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响. 环境科学, 40 (2): 893 - 903.
- Othman Y A, Leskovar D. 2019. Nitrogen management influenced root length intensity of young olive trees. Scientia Horticulturae, 246: 726 - 733.
- Peng Fu-tian, Jiang Yuan-mao, Gu Man-ru, Shu Huai-rui. 2002. Effect of nitrogen on apple fruit development in different load. Scientia Agricultura Sinica, 35 (6): 690 - 694. (in Chinese)
- 彭福田, 姜远茂, 顾曼如, 束怀瑞. 2002. 不同负荷水平下氮素对苹果果实生长发育的影响. 中国农业科学, 35 (6): 690 - 694.
- Quartieri M, Millard P, Tagliavini M. 2002. Storage and remobilization of nitrogen by pear (*Pyrus communis* L.) trees as affected by timing of N supply. European Journal of Agronomy, 17: 105 - 110.
- Quemada M, Alonso-Ayuso M, Castellano-Hinojosa A, Bedmar E J, Gabriele J L, González I G, Valentind F, Calvo M. 2019. Residual effect of synthetic nitrogen fertilizers and impact on soil nitrifiers. European Journal of Agronomy, 109: 125917.
- Raese J T, Drake S R, Curry E A. 2007. Nitrogen fertilizer influences fruit quality, soil nutrients and cover crops, leaf color and nitrogen content, biennial bearing and cold hardiness of 'Golden Delicious'. Journal of Plant Nutrition, 30: 1585 - 1604.
- Riley H. 2016. Residual value of inorganic fertilizer and farmyard manure for crop yields and soil fertility after long-term use on a loam soil in



- Norway. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 104 (1): 25 - 37.
- Roccuzzo G, Scandellari F, Allegra M, Torrisi B, Stagno F, Mimmo T, Zanutelli D, Gioacchini P, Millard P, Tagliavini M. 2017. Seasonal dynamics of root uptake and spring remobilisation of nitrogen infield grown orange trees. *Scientia Horticulturae*, 226: 223 - 230.
- Setea P, Comina J, Ciottab M. 2019. Nitrogen fertilization affects yield and fruit quality in pear. *Scientia Horticulturae*, 258: 108782.
- Shi De-yang, Zhang Hai-yan, Dong Shu-ting. 2013. Effects of nitrogen application on nitrogen balance and use efficiency and yield of summer maize in soil with high residual nitrogen. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 19 (1): 37 - 44. (in Chinese)
- 石德杨, 张海艳, 董树亭. 2013. 土壤高残留氮条件下施氮对夏玉米氮素平衡、利用及产量的影响. *植物营养与肥料学报*, 19 (1): 37 - 44.
- Shu Huai-rui. 1995. Fruit cultivation physiology. Beijing: China Agriculture Press: 165 - 166. (in Chinese)
- 束怀瑞. 1995. 果树栽培生理学. 北京: 中国农业出版社: 165 - 166.
- Wang Cheng, Chen Bo-lang, Yusufujiang Yusuyin, Wang Qian-deng, Chai Zhong-ping, Liu Xue-yan. 2018. Effects of different nitrogen application levels on nitrous oxide emission from the soil of a 'Kuerlexiangli' pear orchard. *Journal of Fruit Science*, 35 (11): 1353 - 1362. (in Chinese)
- 王 成, 陈波浪, 玉素甫江 · 玉素音, 王前登, 柴仲平, 刘雪艳. 2018. 不同施氮水平对 '库尔勒香梨' 园土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响. *果树学报*, 35 (11): 1353 - 1362.
- Wang Qian-deng, Chen Bo-lang, Yusu Yu-jiang Yu Su-yin, Wang Cheng, Chai Zhong-ping. 2018. Characteristics of absorption, utilization, and distribution of  $^{15}\text{N}$ -urea for Korla fragrant pear in spring. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 29 (5): 1443 - 1449. (in Chinese)
- 王前登, 陈波浪, 玉素甫江 · 玉素音, 王 成, 柴仲平. 2018. 库尔勒香梨春季施用  $^{15}\text{N}$  - 尿素的吸收、分配和利用特性. *应用生态学报*, 29 (5): 1443 - 1449.
- Wu Y, Sun M D, Liu J, Wang W J, Liu S Z. 2019. Fertilizer and soil nitrogen utilization of pear trees as affected by the timing of split fertilizer application in rain-fed orchard. *Scientia Horticulturae*, 252: 363 - 369.
- Wu Yang, Sun Ming-de, Liu Jun, Tian Hai-qing, Wang Wen-juan, Liu Song-zhong. 2017. The influences of different fertilization depth on the nitrogen absorption, distribution and utilization of 'Hwangkumbae' pear trees. *Acta Horticulturae Sinica*, 44 (11): 2171 - 2178. (in Chinese)
- 武 阳, 孙明德, 刘 军, 田海青, 王文娟, 刘松忠. 2017. 施氮深度对 '黄金梨' 树氮素吸收、分配及利用效率的影响. *园艺学报*, 44 (11): 2171 - 2178.
- Xie Kai, Li Yuan-jun, Le Wen-quan, Wang Shao-min, Li Jun-cai, Dong Cai-xia, Xu Yang-chun. 2013. A study on soil nutrient status and nutrients input in the main pear orchards around Bohai Bay region. *Chinese Journal of Soil Science*, 44 (1): 132 - 137. (in Chinese)
- 谢 凯, 李元军, 乐文全, 王少敏, 李俊才, 董彩霞, 徐阳春. 2013. 环渤海湾地区主要梨园土壤养分状况及养分投入研究. *土壤通报*, 44 (1): 132 - 137.
- Xie Wen-yan, Zhou Huai-ping, Yang Zhen-xing, Guan Chun-lin. 2015. Effect of soil surface mulching on residual nitrate nitrogen in soil of spring maize field in dryland. *Journal of Soil and Water Conservation*, 29 (4): 158 - 164. (in Chinese)
- 解文艳, 周怀平, 杨振兴, 关春林. 2015. 旱地春玉米地表覆盖对土壤硝态氮残留的影响. *水土保持学报*, 29 (4): 158 - 164.
- Zhao W, Liang B, Yang X, Zhou J. 2015. Fate of residual  $^{15}\text{N}$ -labeled fertilizer in dryland farming systems on soils of contrasting fertility. *Soil Science and Plant Nutrition*, 61 (5): 846 - 855.
- Zhao Wei, Liang Bin, Zhou Jian-bin. 2015. Residual of applied  $^{15}\text{N}$  fertilizer in soils under long-term different patterns of fertilization and utilization. *Acta Pedologica Sinica*, 52 (3): 587 - 596. (in Chinese)
- 赵 伟, 梁 斌, 周建斌. 2015. 施入  $^{15}\text{N}$  标记氮肥在长期不同培肥土壤的残留及其利用. *土壤学报*, 52 (3): 587 - 596.
- Zhao Zuo-ping, Yan Sha, Liu Fen, Wang Xiao-ying, Tong Yan-an. 2014. Analysis of nitrogen inputs and soil nitrogen loading in different kinds of orchards in Shaanxi Province. *Acta Ecologica Sinica*, 34 (19): 5642 - 5649. (in Chinese)
- 赵佐平, 闫 莎, 刘 芬, 王小英, 同延安. 2014. 陕西果园主要分布区氮素投入特点及氮负荷风险分析. *生态学报*, 34 (19): 5642 - 5649.