

富士苹果果实膨大期肥料氮去向及土壤氮素平衡的研究

王 芬, 田 歌, 于 波, 何 流, 刘晓霞, 葛顺峰*, 姜远茂*

(山东农业大学园艺科学与工程学院, 作物生物学国家重点实验室, 山东泰安 271018)

摘 要: 采用 ^{15}N 同位素示踪技术, 研究了不同施氮水平 (0、50、100、150、200、250 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 对富士苹果膨大期肥料氮吸收利用、土壤残留和土壤氮素总平衡的影响。结果表明, 当施氮水平低于 100 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 随施氮水平的提高果实单果质量及产量均显著提高, 但当施氮水平高于 100 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 各处理间差异不显著。随施氮水平的提高, 肥料氮利用率逐渐下降, 且树木吸收的氮来自土壤氮的比例逐渐降低, 来自肥料氮的比例逐渐升高; 果实膨大期结束时 (施氮 2 个月后), 肥料氮的 5.98%~13.78% 被树木吸收, 27.26%~37.38% 残留在 0~60 cm 土体中, 48.84%~66.76% 通过其他途径损失。随施氮水平的提高, 树木吸收的肥料氮量和土壤残留氮量逐渐增加, 但肥料氮利用率和土壤残留率却不断降低, 同时损失量和损失率不断增加。随施氮水平的提高, 0~60 cm 土体无机氮 (硝态氮 + 铵态氮) 含量显著提高, 且残留在土壤剖面中的无机氮主要分布在表土层 (0~20 cm)。不施氮和低氮水平 (施氮 50 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 土壤无机氮积累量为负积累, 当施氮水平高于 100 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 土壤无机氮积累量均呈正积累。随施氮水平的提高, 土壤氮素总平衡由亏缺转为盈余, 表明供氮不足会造成土壤氮肥力的下降, 过量施氮则会加剧土壤氮素累积, 增加氮素污染风险。拟合分析发现, 在试验施肥水平土壤氮素总平衡与施氮水平呈线性极显著正相关关系, 其回归方程为 $y = 0.2912x - 22.481$ ($R^2 = 0.986$), 当施氮水平为 77.20 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 土壤氮素达到平衡。

关键词: 苹果; 果实膨大期; 氮水平; 氮去向; 土壤氮素平衡

中图分类号: S 661.1

文献标志码: A

文章编号: 0513-353X (2017) 08-1569-10

Fate of Fertilizer Nitrogen and Total Balance of Soil Nitrogen in Fuji Apple During Fruit Rapid-swelling Stage

WANG Fen, TIAN Ge, YU Bo, HE Liu, LIU Xiaoxia, GE Shunfeng*, and JIANG Yuanmao*

(State Key Laboratory of Crop Biology, College of Horticultural Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China)

Abstract: The effect of fertilizer N absorption and utilization, soil N residue and total balance of soil N under different nitrogen levels (0, 50, 100, 150, 200, 250 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) were studied using ^{15}N isotope tracer technique during Fuji apple fruit rapid-swelling stage. The results showed that when the nitrogen level was lower than 100 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, the fruit quality and yield increased significantly with the increase of

收稿日期: 2017-05-27; **修回日期:** 2017-08-10

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFD0201100); 国家自然科学基金项目 (31501713); 国家现代农业产业技术体系建设专项资金项目 (CARS-28)

* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: geshunfeng210@126.com; ymjiang@sda.edu.cn)

nitrogen level. But when the level of nitrogen application was higher than $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, there was no significant difference among treatments. With the increase of nitrogen application, nitrogen fertilizer utilization rate decreased gradually. The tree nitrogen from soil nitrogen proportion gradually decreased, and the proportion from fertilizer nitrogen increased; At the end of fruit rapid-swelling stage (after 2 months of nitrogen application), 5.98% - 13.78% of fertilizer N was absorbed by tree, 27.26% - 37.38% of fertilizer N was resided in 0 - 60 cm soil, and 48.84% - 66.76% of fertilizer N was lost by other means. With the increase of nitrogen application rate, the amount of fertilizer N absorbed by trees and soil N residue were increased gradually, but the utilization rate of fertilizer N and soil residual rate were decreased, and meantime, the loss and the loss rate were increased gradually. With the increase of nitrogen application, 0 - 60 cm soil inorganic nitrogen ($\text{NO}_3^- \text{-N} + \text{NH}_4^+ \text{-N}$) content increased significantly, and residual inorganic nitrogen in the soil profile is mainly distributed in the topsoil (0 - 20 cm). The accumulation of inorganic nitrogen was negative accumulation with no nitrogen and low nitrogen level ($50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$). When the nitrogen application rate was higher than $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, the accumulation of inorganic nitrogen was positive. With the increase of nitrogen application, soil total nitrogen balance is changed from deficit to surplus, the results showed that low nitrogen application rate could cause the decrease of soil N fertility, and the excessive application of nitrogen could increase the accumulation of nitrogen and increase the risk of nitrogen pollution. The results showed that there was a significant positive correlation between soil total nitrogen balance and nitrogen application rate in the test fertilization level, the regression equation is $y = 0.2912x - 22.481$ ($R^2 = 0.986$), soil nitrogen reached balance when the nitrogen rate was $77.20 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$.

Keywords: apple; fruit rapid-swelling stage; N level; N fate; balance of soil N

中国苹果主产区氮肥用量持续增加,远远超过了树体需求量(葛顺峰, 2014; 赵佐平等, 2014)。果实膨大期是果实质量和体积快速增加及花芽进行形态分化的阶段, 此期树体营养水平的高低会显著影响果实产量和花芽分化质量(史继东和张立功, 2011; 张爱敏和凤舞剑, 2016)。此期土壤供氮不足则会导致产量降低; 过量则会导致树体旺长, 果实不易着色, 还会影响钙等中、微量元素的吸收(隋秀奇等, 2013), 降低果实品质; 另外过量未被利用的氮素也会在土壤中大量累积, 易造成深层淋洗和地表径流损失(Raese et al., 2007)。目前对于这一关键时期的氮素管理仍缺乏深入研究, 果农主要凭经验和习惯施肥, 施肥标准不统一, 过量和不足并存。因此研究该阶段合理的施氮水平, 对于苹果生产节氮增效具有重要意义。

氮肥施入土壤后一方面通过根系被树体吸收以满足生长发育的需要; 另一方面在土壤剖面以无机氮形态或有机结合形态残留; 其他的氮素通过氨挥发、硝化反硝化、淋溶等途径由土壤—植株体系损失至环境中。肥料氮的去向受作物种类、土壤类型、氮肥用量、施肥方法及时期等方面的影响, 变异较大(Ottman & Pope, 2000; Lópezbellido et al., 2006)。山楠等(2016)在夏玉米上的研究表明, 肥料氮的利用率为 9.01% ~ 67.57%, 土壤中 ^{15}N 残留率和损失率分别为 21.40% ~ 40.54% 和 11.04% ~ 50.45%。葛顺峰等(2011)的研究表明, 2 年生苹果园肥料氮的利用率为 19.38% ~ 31.28%, 土壤 ^{15}N 残留率和损失率分别为 21.50% ~ 29.13% 和 39.59% ~ 59.12%。

自 20 世纪 90 年代以来, 中国农业生态系统中氮素总体上处于盈余状态, 且呈持续增长态势, 导致氮肥利用率降低(Guo et al., 2010; 王敬国等, 2016)。研究指出, 当施氮量低于植株生长所

需氮量时, 植株会大量吸收根区土壤氮, 有耗竭土壤氮库的风险; 而当施氮量高于植株生长所需氮量时, 土壤开始出现氮素盈余 (刘新宇 等, 2010; 巨晓棠和谷保静, 2017)。因此, 优化氮肥用量使其既能满足植株生长发育的需要, 又能够维持土壤供氮能力, 可以有效地提高氮素利用效率, 还可以减少肥料氮在土壤中的累积, 降低环境污染风险。土壤系统的氮素平衡可以反映一定土体深度氮素输入、输出及土壤氮库的变化 (Oenema et al., 2003; 巨晓棠和谷保静, 2017)。近年来, 许多学者将土壤氮素总平衡作为确定氮肥投入阈值的一种方法。汪新颖等 (2014) 和倪玉雪等 (2013) 在夏玉米和冬小麦上的研究表明, 在秸秆 50% 和 100% 还田两种条件下, 土壤氮库达到平衡的施氮量分别为 198、137 kg · hm⁻² 和 192、166 kg · hm⁻²。为此, 利用 ¹⁵N 同位素示踪技术, 以 5 年生富士苹果树为试材, 研究果实膨大期不同施氮水平下 ¹⁵N 的基本去向, 分析氮素投入与土壤氮库盈亏的关系, 以期从土壤氮素总平衡角度为苹果果实膨大期氮肥的合理施用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试验设计

试验于 2016 年 6—8 月在山东省烟台市莱山镇官庄村果园进行。试验地土壤肥力属于中等水平 (表 1), 试验期间降水量为 147.1 mm。

苹果试材为 5 年生烟富 3/SH6/平邑甜茶, 株行距为 4 m × 1.5 m。选取生长势基本一致, 无病虫害的植株 21 株, 其中 3 株在试验开始前进行解析, 测定树体的氮含量, 作为基础值, 同时测量 0~60 cm 土层起始无机氮含量; 其余 18 株设 6 个处理, 单株为 1 次重复, 重复 3 次。

于 6 月 28 日进行不同施氮水平处理: 0、50、100、150、200 和 250 kg · hm⁻², 折合每株施尿素 (含 N 46%) 量为 0、72.5、145、217、289.9 和 362 g, 其中每株按比例均匀施入 ¹⁵N - 尿素 (上海化工研究院生产, 丰度 10.16%) 0、3.33、6.67、10、13.33 和 16.67 g。同时每株施入硫酸钾 (含 K₂O 50%) 200 g, 过磷酸钙 (含 P₂O₅ 14%) 357 g, 施肥方法为距中心干 30 cm 处挖深为 10 cm、宽为 20 cm 的环状沟, 施肥后每株立即浇水 4 L。

于 8 月 28 日整株破坏性解析取样, 同时进行土层取样, 在单株所占面积内均匀布设 6 个采样点, 即在树冠外缘滴水线, 树干距滴水线 2/3、1/3 处分别选取 2 个点, 避开施肥沟, 每一取土点垂直方向上取 0~20、20~40 和 40~60 cm 深度的土壤样品, 随后将每层 6 个土样均匀混合, 按四分法取样。

表 1 供试土壤基本理化性状
Table 1 The major chemical characteristics of the experimental soil

土层/cm Soil layer	碱解氮/ (mg · kg ⁻¹) Alk.-hydr. N	速效磷/ (mg · kg ⁻¹) Avail. P	速效钾/ (mg · kg ⁻¹) Avail. K	有机质/ (g · kg ⁻¹) Organic matter	容重/ (g · cm ⁻³) Bulk density
0~20	69.64	32.19	169.13	18.05	1.15
20~40	50.23	17.34	153.05	15.62	1.23
40~60	41.02	15.42	141.62	13.23	1.31

1.2 测定项目及方法

试验结束后, 将树体整株挖出, 样品解析为果实、叶片、多年生枝、一年生枝、中心干、粗根 (d > 0.2 cm) 和细根 (d ≤ 0.2 cm)。样品按清水、洗涤剂、清水、1%盐酸、3 次去离子水顺序冲洗后, 在 105 °C 下杀青 30 min, 随后在 80 °C 下烘干至恒量, 电磨粉碎后过 60 目筛, 混匀后装袋备

用。样品全氮用凯氏定氮法测定，植株和土壤 ^{15}N 丰度在中国农业科学院农产品加工研究所用 MAT-251 质谱仪测定。

土样取回后于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中保存，解冻后过 2 mm 筛，称取 5 g，加入 50 mL $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{CaCl}_2$ ，振动 30 min 过滤，即成浸提液。利用德国 BRAN + LUEBBE 公司产 AA3 流动分析仪（AA3 Digital Colorimeter）测定土壤硝态氮和铵态氮含量。

1.3 数据处理

树体吸氮量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) = 树体全氮量 - 树体全氮量基础值。

树体吸氮量来自肥料氮的百分比 (Ndff%) = 树体吸收的肥料氮量/树体吸氮量 $\times 100$ 。

树体吸氮量来自土壤氮的百分比 (Ndffs%) = $1 - \text{Ndff}\%$ 。

^{15}N 利用率 (%) = ^{15}N 吸收量/ ^{15}N 施用量 $\times 100$ 。

^{15}N 残留率 (%) = 土壤 ^{15}N 残留量/ ^{15}N 施用量 $\times 100$ 。

^{15}N 损失率 (%) = $1 - ^{15}\text{N}$ 利用率 - ^{15}N 残留率。

^{15}N 回收率 (%) = ^{15}N 利用率 + ^{15}N 残留率。

土壤无机氮积累量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) = 试验结束后土壤无机氮总量 - 起始无机氮总量。

风险/收益 = ^{15}N 损失率/ ^{15}N 回收率 (Cookson et al., 2001)。

土壤氮素总平衡 = 输入 (肥料氮投入量) - 输出 (树体吸收肥料氮量 + 树体吸收土壤氮量 + 肥料氮损失量)。

用 Microsoft Excel 2007 进行数据处理，用 SPSS 数据处理系统单因素试验统计分析方法进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同施氮水平对树体生长及产量的影响

由表 2 可知，随施氮水平的提高，树体秋梢长度显著增加，施氮 $250\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理的秋梢长度是对照的 7.98 倍。当氮素用量低于 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时，随施氮水平的提高单果质量及产量均显著增加；而当氮素用量高于 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时，继续增加氮素的投入对单果质量和产量无显著影响。与对照相比较，施氮处理的增产率达 19.23% ~ 36.14%，当氮素用量超过 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 后，增产效果不显著。

表 2 不同施氮水平对树体秋梢生长及产量的影响

Table 2 Effects of different nitrogen levels on autumn shoot growth and yield of tree

N/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	秋梢长度/cm Length of autumn shoot	单果质量/g Fruit quality	单株产量/kg Yield per plant	增产率/% Yield increase rate
0 (对照 Control)	$5.20 \pm 0.95\text{ f}$	$133.82 \pm 9.23\text{ c}$	$14.72 \pm 1.02\text{ c}$	—
50	$10.26 \pm 1.25\text{ e}$	$159.58 \pm 5.25\text{ b}$	$17.55 \pm 0.58\text{ b}$	$19.23 \pm 3.92\text{ b}$
100	$19.30 \pm 3.50\text{ d}$	$176.27 \pm 11.88\text{ a}$	$19.39 \pm 0.43\text{ a}$	$31.73 \pm 2.94\text{ a}$
150	$29.48 \pm 3.75\text{ c}$	$174.85 \pm 9.53\text{ a}$	$19.58 \pm 0.96\text{ a}$	$33.02 \pm 6.51\text{ a}$
200	$36.34 \pm 1.36\text{ b}$	$190.07 \pm 2.38\text{ a}$	$20.04 \pm 0.47\text{ a}$	$36.14 \pm 3.19\text{ a}$
250	$41.47 \pm 1.37\text{ a}$	$188.38 \pm 5.46\text{ a}$	$20.00 \pm 0.49\text{ a}$	$35.86 \pm 3.36\text{ a}$

注：表中数据为 3 次重复的平均值；同列不同小写字母分别表示各处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: Each value is the mean of three replicates $\pm SE$. Data followed by different small letters in the same row mean significantly difference at the 5%, respectively. The same below.

2.2 不同施氮水平下 树体吸收土壤氮和肥料氮的比例

树体吸收的氮素主要来源于土壤氮和肥料氮。由图 1 可知，随施氮水平的提高，树体吸收的氮素来源于肥料的比例明显增加，土壤氮的贡献率相应减少，来自土壤氮和肥料氮的比例分别为 59.32%~100% 和 0~40.68%。说明在低供氮条件下，树体主要吸收土壤氮；随施氮水平的提高，树体吸收土壤氮的比例逐渐下降，吸收肥料氮的比例有所上升，但比例仍不足 41%。

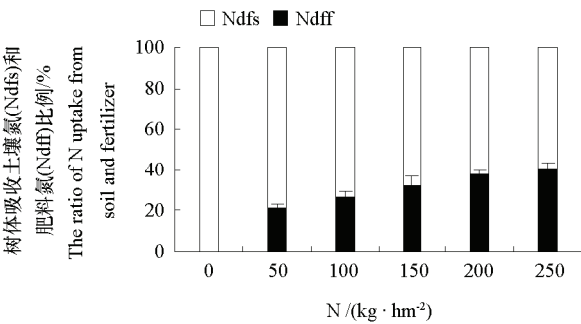


图 1 树体吸收土壤氮和肥料氮的比例
Fig. 1 The ratio of N uptake from soil and fertilizer

2.3 不同施氮水平对土壤无机氮（硝态氮 + 铵态氮）含量和积累量的影响

由表 3 可以看出，施用氮肥显著增加了 0~60 cm 土层土壤无机氮的残留，且不同施氮水平下各土层的硝态氮残留量均明显高于铵态氮。0~20 cm 土层无机氮含量最高，其次是 20~40，40~60 cm 最低。各土层内，无机氮含量均随施氮水平提高而提高，各施氮处理较对照增幅分别为 46.45%~205%（0~20 cm）、46.35%~192.84%（20~40 cm）和 26.51%~306.02%（40~60 cm）。

无机氮积累量为试验结束后土壤无机氮含量与处理前起始无机氮的差值。表 3 表明，施用氮肥显著提高了 0~60 cm 土层土壤的无机氮积累量，不施氮肥和施氮 50 kg·hm⁻² 处理无机氮积累量均表现为负积累（-16.71、-7.52 kg·hm⁻²）；当施氮水平超过 100 kg·hm⁻² 后呈正积累（2.37~30.79 kg·hm⁻²）。

表 3 不同施氮水平对 0~60 cm 土壤无机氮含量和积累量的影响
Table 3 Effects of different N rates on inorganic N and accumulation in 0~60 cm soil depth

N/ (kg · hm ⁻²)	0 ~ 20 cm			20 ~ 40 cm			40 ~ 60 cm			0 ~ 60 cm 无机氮 Inorganic N		
	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	合计 Total	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	合计 Total	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	合计 Total	总计 Total	起始 Initial	积累量 Accumulation
0 (对照 Control)	7.16	2.85	10.01 f	5.14	2.26	7.40 f	3.09	1.05	4.15 f	21.55 f	38.26	- 16.71 f
50	10.35	4.31	14.66 e	7.33	3.50	10.83 e	4.08	1.16	5.25 e	30.74 e	38.26	- 7.52 e
100	13.25	5.78	19.03 d	9.23	4.66	13.89 d	5.18	2.52	7.71 d	40.63 d	38.26	2.37 d
150	17.66	6.02	23.68 c	11.64	5.25	16.89 c	6.89	4.37	11.26 c	51.84 c	38.26	13.58 c
200	20.03	6.80	26.83 b	12.71	6.01	18.72 b	9.66	5.22	14.88 b	60.43 b	38.26	22.17 b
250	22.68	7.85	30.53 a	14.66	7.01	21.67 a	11.31	5.54	16.85 a	69.05 a	38.26	30.79 a

2.4 不同施氮水平对树体吸收、土壤残留和损失的影响

各处理肥料氮去向均表现为损失 > 土壤残留 > 利用 (表 4)。随施氮水平的提高, 树体吸收的肥料氮量逐渐增加, 肥料氮利用率却不断降低, 施氮 250 kg · hm⁻² 处理 (5.98%) 比 50 kg · hm⁻² (13.78%) 下降了 7.8 个百分点。肥料氮在土壤中的残留量为 18.69 ~ 68.15 kg · hm⁻², 且随施氮水平的提高显著增加, 残留率却逐渐降低, 0 ~ 60 cm 土体肥料氮残留率在 27.26% ~ 37.38% 之间。肥料氮损失量与损失率均随施氮水平的提高而增加, 损失率高达 48.84% ~ 66.76%。肥料氮回收量包括树体吸收量和土壤残留量, 随施氮水平的提高回收量显著增加 (25.58 ~ 83.10 kg · hm⁻²), 而回收率不断降低 (51.16% ~ 33.24%)。随着施氮水平的提高, 肥料氮风险/收益比 (肥料氮损失量/回收量) 逐渐增大, 当施氮量超过 100 kg · hm⁻² 后此比值均大于 1, 表明该施氮水平下施用氮肥引起的风险高于收益。

表 4 果实膨大期肥料氮去向
Table 4 The fate of nitrogen fertilizer during fruit expanding stage

N/ (kg · hm ⁻²)	树体吸收肥料氮 Fertilizer N uptake		0 ~ 60 cm 残留肥料氮 Soil residue		肥料氮总损失 Fertilizer N total loss		肥料氮回收 Fertilizer N recovery		风险/ 收益 Risk/ Benefit
	kg · hm ⁻²	%	kg · hm ⁻²	%	kg · hm ⁻²	%	kg · hm ⁻²	%	
50	6.89 ± 0.16 d	13.78 ± 0.32 a	18.69 ± 1.58 e	37.38 ± 3.16 a	24.42 ± 1.43 e	48.84 ± 2.85 d	25.58 ± 1.42 e	51.16 ± 2.85 a	0.95
100	9.21 ± 0.42 c	9.21 ± 0.42 b	34.38 ± 0.95 d	34.38 ± 0.95 ab	56.40 ± 0.78 d	56.40 ± 0.78 c	43.60 ± 0.78 d	43.60 ± 0.78 b	1.29
150	11.64 ± 1.64 b	7.76 ± 1.09 c	47.68 ± 2.02 c	31.79 ± 1.35 bc	90.68 ± 2.60 c	60.45 ± 1.73 b	59.33 ± 2.59 c	39.55 ± 1.73 c	1.53
200	13.89 ± 0.34 a	6.94 ± 0.17 cd	59.76 ± 2.63 b	29.88 ± 1.32 cd	126.35 ± 2.32 b	63.18 ± 1.16 b	73.65 ± 2.32 b	36.83 ± 1.16 c	1.72
250	14.95 ± 0.45 a	5.98 ± 0.18 d	68.15 ± 1.30 a	27.26 ± 0.52 d	166.90 ± 1.19 a	66.76 ± 0.48 a	83.10 ± 1.19 a	33.24 ± 0.48 d	2.01

2.5 不同施氮水平下土壤氮素总平衡

不同施氮水平显著影响了土壤氮素总平衡。由表 5 可知, 随施氮水平的提高, 树体吸收的肥料氮量逐渐增加, 而吸收的土壤氮量不断降低, 土壤氮素总平衡逐渐由亏缺转为盈余。低氮 (施氮 0、50 kg · hm⁻²) 处理土壤氮素总平衡表现为亏缺状态 (-26.62、-6.64 kg · hm⁻²); 当施氮水平超过 100 kg · hm⁻² 后, 土壤氮素总平衡表现为盈余状态 (9.62 ~ 46.26 kg · hm⁻²), 且盈余量随施氮水平的提高而显著增加。

表 5 不同施氮水平下土壤氮素总平衡
Table 5 Total balance of soil nitrogen in different fertilization N rates

氮输入 N input	氮输出 N output				土壤氮素总平衡 Total balance of soil N
	树体吸收肥料氮量 N fertilizer uptake by tree	树体吸收土壤氮量 Soil N uptake by tree	肥料氮损失量 Fertilizer N loss	总计 Total	
0	0 e	26.62 ± 0.66 a	0 f	26.62 ± 0.66 f	-26.62 ± 0.66 f
50	6.89 ± 0.16 d	25.32 ± 1.61 ab	24.42 ± 1.43 e	56.64 ± 1.97 e	-6.64 ± 1.97 e
100	9.21 ± 0.42 c	24.76 ± 1.57 abc	56.40 ± 0.78 d	90.38 ± 1.52 d	9.62 ± 1.52 d
150	11.64 ± 1.64 b	23.80 ± 0.87 abc	90.68 ± 2.60 c	126.12 ± 1.91 c	23.88 ± 1.91 c
200	13.89 ± 0.34 a	22.78 ± 1.84 bc	126.35 ± 2.32 b	163.02 ± 3.48 b	36.98 ± 3.48 b
250	14.95 ± 0.45 a	21.89 ± 2.27 c	166.90 ± 1.19 a	203.74 ± 2.92 a	46.26 ± 2.92 a

以施氮水平为自变量, 以土壤氮素总平衡为因变量建立方程, 拟合发现, 土壤氮素总平衡与施氮水平之间呈线性极显著正相关, 回归方程为 $y = 0.2912x - 22.481$ ($R^2 = 0.986$)。由拟合方程得出, 当施氮水平为 77.20 kg · hm⁻² 时, 土壤氮素达到平衡。

3 讨论

研究表明, 果实膨大期的苹果树体以不再萌发或较少萌发秋梢为最好, 此时树体吸收的养分集中供应于果实膨大和花芽分化, 如果此时期秋梢生长过旺则会导致养分分散进而影响产量和花芽分化质量(张爱敏和凤舞剑, 2016)。本试验中发现, 过量施氮会导致树体营养生长过旺; 施氮水平在一定范围内能够显著提高果实产量, 超过这一范围后增产效果不明显, 这与王大铭(2014)的研究结果一致。施氮量除了显著影响苹果产量外, 冯焕德等(2008)还发现过量施氮不利于果实着色和可溶性固形物的积累, 显著降低了果实品质。

植株吸收的氮素主要来源于土壤氮和肥料氮。左红娟等(2012)在冬小麦上的研究表明, 作物吸收的氮素主要来源于土壤, 来自肥料氮的比例不足 1/3。本研究中发现, 在低氮肥条件下, 苹果果实膨大期树体吸收的氮素主要来自于土壤氮; 随施氮水平的提高, 树体吸收土壤氮的比例逐渐下降, 吸收肥料氮的比例有所上升, 但最高比例仍不足 41%, 可见果实膨大期苹果树体对土壤氮的依赖程度较高。

氮肥施入土壤后其利用率大约在 30%~50%之间, 且随施肥方式、土壤性状及管理方式差异很大(Ladha et al., 2005)。本研究中发现, 施肥 2 个月后, 氮肥利用率在 5.98%~13.78%之间, 显著低于葛顺峰等(2011)在 2 年生苹果园上的研究结果(利用率为 19.38%~31.28%), 这主要与本试验周期较短有关; 与前人研究相一致的是, 本研究中也发现随施氮水平的提高氮肥利用率呈降低趋势。未被植株吸收的氮素部分会残留在土壤中, 朱兆良(2002)总结发现国内当季作物收获时肥料氮残留率一般为 15%~30%, 而国外一般在 12%~44%之间。本试验的肥料氮残留率为 27.26%~37.38%, 施氮量越大残留量越多, 但残留率越小, 这与葛顺峰等(2011)在苹果园和石玉等(2007)在冬小麦上的研究一致。韦剑锋等(2015)对马铃薯氮素去向的研究表明, 氮肥损失量和损失率均随施氮水平的提高而增加, 本试验得出相同的结论, 且在各施氮水平下均呈现损失 > 土壤残留 > 肥料利用。本试验中较高的损失率(48.84%~66.76%)是由于该时期的降水较多, 导致肥料氮随地表径流和深层淋失而损失。另外, 根据风险/收益比值, 当施氮量达到 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时此比值高于 1, 因此, 从环境安全的角度考虑, 生产上应合理控制氮肥用量。

残留在土壤中的无机氮主要包括硝态氮和铵态氮, 土壤无机氮含量可以表征土壤的供氮能力, 也能反映土壤对施用氮肥的响应, 无机氮含量随施氮量的增加而增加(化党领 等, 2012)。赵靛等(2014)在玉米上的研究表明, 氮肥供应不足时, 土壤无机氮处于净消耗状态, 而施氮量高于 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 土壤无机氮出现积累。本研究结果表明, 果园中土壤无机氮的残留形式主要为硝态氮, 氮肥用量增加显著提高了土壤无机氮含量, 且随土层加深无机氮含量逐渐降低。不施氮或氮素用量较低($< 50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)时, 土壤无机氮呈负积累; 而当施氮量高于 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 土壤无机氮呈正积累, 表明过量施氮会加剧土壤无机氮素的累积, 过量累积在土壤中的硝态氮在持续降水或大量灌溉条件下, 容易由根区淋溶至土壤深层, 威胁浅层地下水的安全。另有研究表明, 残留在土壤中的氮素对后季作物仍具有可利用性(Zhang et al., 2007; 王西娜 等, 2016), 因此在苹果树后期管理中要合理调控根层水肥状况, 一方面要适当减少氮肥用量, 挖掘根层土壤中残留氮素资源, 以发挥残留氮素的后效; 另一方面要合理调控根层含水量, 防止硝酸盐向深层的淋洗。

氮肥的输入补充了土壤氮库, 有利于培肥地力, 但同时存在着资源浪费和环境污染等问题。倪玉雪等(2013)和汪新颖等(2014)对华北平原冬小麦和夏玉米的研究指出, 当氮肥用量超过作物的需求量时, 氮素盈余急剧增加。Ju 等(2009)对 3 种重要集约化种植体系的研究表明, 氮素年盈

余量与施氮水平呈显著正相关关系。因此,在果树生产中,施用氮肥既要保证树体的生长需求,实现肥料氮的高效利用,又要维持土壤氮库的平衡,减少氮素盈余。本研究结果表明,施氮水平与土壤氮素总平衡存在极显著正相关关系,当施氮水平低于 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,土壤氮素总平衡表现为亏缺,表明树体吸收了大量根区的土壤氮素,造成土壤氮肥力的下降;而当施氮水平高于 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,土壤氮素总平衡表现为盈余,且氮素盈余量随施氮水平的提高而提高,加大了氮素面源污染的风险。

当土壤氮素总平衡为负值时,尽管氮素利用率较高,损失较低,但树体供氮缺乏,产量较低,还会消耗土壤本底氮素;当氮素大量盈余时,过量的氮素导致树体旺长,增产效果不显著,较低的氮素利用率和较高的损失率会导致农业生产效益降低和环境污染风险加大。本试验条件下,从土壤氮素输入输出总平衡角度拟合得出富士苹果果实膨大期的氮肥适宜用量为 $77.20 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,此施氮水平下既能保证苹果产量,还可以降低氮素环境污染风险。另外,本试验条件下的土壤肥力为中等水平,而中国还有很大面积的果园土壤肥力处于较低水平,因此不同土壤肥力条件下富士苹果膨大期适宜的施氮水平仍有待于进一步研究。

References

- Cookson W R, Rowarth J S, Cameron K C. 2001. The fate of autumn-, late winter- and spring-applied nitrogen fertilizer in a perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) seed crop on a silt loam soil in canterbury, New Zealand. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 84 (1): 67 - 77.
- Feng Huan-de, Li Bing-zhi, Zhang Lin-sen, Jin Hui-cui, Li Huan-bo, Han Ming-yu. 2008. Influences of different rates of nitrogen on fruit quality, photosynthesis and element contents in leaves of red Fuji apples. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 17 (1): 229 - 232. (in Chinese)
- 冯焕德, 李丙智, 张林森, 金会翠, 李焕波, 韩明玉. 2008. 不同施氮量对红富士苹果品质、光合作用和叶片元素含量的影响. *西北农业学报*, 17 (1): 229 - 232.
- Ge Shun-feng. 2014. Effects of soil C/N ratio on nitrogen balance of plant-soil system in apple orchard [Ph. D. Dissertation]. Tai'an: Shandong Agricultural University. (in Chinese)
- 葛顺峰. 2014. 苹果园土壤碳氮比对植株—土壤系统氮素平衡影响的研究[博士论文]. 泰安: 山东农业大学.
- Ge Shun-feng, Jiang Yuan-mao, Wei Shao-chong, Fang Ji-xiang. 2011. Nitrogen balance under different nitrogen application rates in young apple orchards. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 17 (4): 949 - 955. (in Chinese)
- 葛顺峰, 姜远茂, 魏绍冲, 房祥吉. 2011. 不同供氮水平下幼龄苹果园氮素去向初探. *植物营养与肥料学报*, 17 (4): 949 - 955.
- Guo J H, Liu X J, Zhang Y, Shen J L, Han W X, Zhang W F. 2010. Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 327 (5968): 1008 - 1010.
- Hua Dang-ling, Zhang Shi-hui, Wang Rui, Liu Wei-qun, Zhao Ying, Huo Guang. 2012. Regulation of soil inorganic nitrogen by applying different nitrogen rate on flue-cured tobacco-planting soil. *Science of Soil and Water Conservation*, 10 (6): 86 - 91. (in Chinese)
- 化党领, 张诗卉, 王 瑞, 刘卫群, 赵 颖, 霍 光. 2012. 施氮量对植烟土壤不同土层无机氮质量含量的调控. *中国水土保持科学*, 10 (6): 86 - 91.
- Ju X T, Xing G X, Chen X P, Zhang S L, Zhang L J, Liu X J. 2009. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems. *PNAS*, 106 (9): 3041 - 3046.
- Ju Xiao-tang, Gu Bao-jing. 2017. Indexes of nitrogen management. *Acta Pedologica Sinica*, 54 (2): 281 - 296. (in Chinese)
- 巨晓棠, 谷保静. 2017. 氮素管理的指标. *土壤学报*, 54 (2): 281 - 296.
- Ladha J K, Krupnik T J, Six J. 2005. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects. *Advances in Agronomy*, 87: 85 - 156.
- Liu Xin-yu, Ju Xiao-tang, Zhang Li-juan, Li Xin, Yuan Li-jin, Liu Nan. 2010. Effects of different N rates on fate of N fertilizer and balance of soil

- N of winter wheat. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 16 (2): 296 - 303. (in Chinese)
- 刘新宇, 巨晓棠, 张丽娟, 李 鑫, 袁丽金, 刘 楠. 2010. 不同施氮水平对冬小麦季化肥氮去向及土壤氮素平衡的影响. *植物营养与肥料学报*, 16 (2): 296 - 303.
- Lópezbellido L, Lópezbellido R J, Lópezbellido F J. 2006. Fertilizer nitrogen efficiency in durum wheat under rainfed mediterranean conditions: effect of split application. *Agronomy Journal*, 98 (1): 55 - 62.
- Ni Yu-xue, Yin Xing, Liu Xin-yu, Ju Xiao-tang, Zhang Li-juan. 2013. Exploration of N fertilizer fate and quantitative soil nitrogen pool budget in growing season of winter wheat in north China plain. *Ecology and Environmental Sciences*, 22 (3): 392 - 397. (in Chinese)
- 倪玉雪, 尹 兴, 刘新宇, 巨晓棠, 张丽娟. 2013. 华北平原冬小麦季化肥氮去向及土壤氮库盈亏定量化探索. *生态环境学报*, 22 (3): 392 - 397.
- Oenema O, Kros H, Wim D V. 2003. Approaches and uncertainties in nutrient budgets: implications for nutrient management and environmental policies. *European Journal of Agronomy*, 20 (1 - 2): 3 - 16.
- Ottman M J, Pope N V. 2000. Nitrogen fertilizer movement in the soil as influenced by nitrogen rate and timing in irrigated wheat. *Soil Science Society of America Journal*, 64 (5): 1883 - 1892.
- 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 (10): 1585 - 1604.
- Shan Nan, Du Lian-feng, Bi Xiao-qing, An Zhi-zhuang, Zhao Li-ping, Zhao Tong-ke. 2016. Nitrogen use efficiency and behavior studied with ¹⁵N labeled fertilizer in maize in fluvo-aquic soils. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 22 (4): 930 - 936. (in Chinese)
- 山 楠, 杜连凤, 毕晓庆, 安志装, 赵丽平, 赵同科. 2016. 用 ¹⁵N 肥料标记法研究潮土中玉米氮肥的利用率与去向. *植物营养与肥料学报*, 22 (4): 930 - 936.
- Shi Ji-dong, Zhang Li-gong. 2011. The rule of apple tree requiring fertilizer and scientific fertilization. *Yantai Fruits*, (3): 8 - 10. (in Chinese)
- 史继东, 张立功. 2011. 苹果树需肥规律及科学施肥. *烟台果树*, (3): 8 - 10.
- Shi Yu, Yu Zhen-wen, Li Yan-qi, Wang Xue. 2007. Effects of nitrogen fertilizer rate and ratio of base and topdressing on winter wheat yield and fate of fertilizer nitrogen. *Scientia Agricultura Sinica*, 40 (1): 54 - 62. (in Chinese)
- 石 玉, 于振文, 李延奇, 王 雪. 2007. 施氮量和底追肥比例对冬小麦产量及肥料氮去向的影响. *中国农业科学*, 40 (1): 54 - 62.
- Sui Xiu-qi, Guo Zheng-hua, Yang Zeng-sheng, Zhang Dai-sheng, Li Hong-yan, Wang Shu-li. 2013. Key points and supporting measures of bagging apple management during fruit expansion stage to ripening stage. *Yantai Fruit*, (3): 30 - 31. (in Chinese)
- 隋秀奇, 郭征华, 杨增生, 张代胜, 李洪妍, 王淑丽. 2013. 果实膨大期至成熟期套袋苹果管理的重点及配套措施. *烟台果树*, (3): 30 - 31.
- Wang Da-ming. 2014. Effect of different nitrogen and potassium fertilizers to yield and quality of Fuji apple. *Journal of Jilin Forestry Science and Technology*, 43 (5): 47 - 49. (in Chinese)
- 王大铭. 2014. 不同氮、钾肥水平对红富士苹果产量和品质的影响. *吉林林业科技*, 43 (5): 47 - 49.
- Wang Jing-guo, Lin Shan, Li Bao-guo. 2016. Nitrogen cycling and management strategies in Chinese agriculture. *Scientia Agricultura Sinica*, 49 (3): 503 - 517. (in Chinese)
- 王敬国, 林 杉, 李保国. 2016. 氮循环与中国农业氮管理. *中国农业科学*, 49 (3): 503 - 517.
- Wang Xi-nan, Wang Zhao-hui, Li Hua, Wang Rong-hui, Tan Jun-li, Li Sheng-xiu. 2016. Dynamics and availability to crops of residual fertilizer nitrogen in upland soil. *Acta Pedologica Sinica*, 53 (5): 1202 - 1212. (in Chinese)
- 王西娜, 王朝辉, 李 华, 王荣辉, 谭军利, 李生秀. 2016. 旱地土壤中残留肥料氮的动向及作物有效性. *土壤学报*, 53 (5): 1202 - 1212.
- Wang Xin-ying, Peng Ya-jing, Wang Wei, Liu Xin-yu, Ju Xiao-tang, Zhang Li-juan. 2014. Exploration of N fertilizer fate and quantitative soil nitrogen pool budget in growing season of summer maize in north China plain. *Ecology and Environmental Sciences*, 23 (10): 1610 - 1615. (in Chinese)
- 汪新颖, 彭亚静, 王 玮, 刘新宇, 巨晓棠, 张丽娟. 2014. 华北平原夏玉米季化肥氮去向及土壤氮库盈亏定量化探索. *生态环境学报*, 23 (10): 1610 - 1615.
- Wei Jian-feng, Wei Qiao-yun, Liang Zhen-hua, Song Shu-hui, Wei Dong-ping, Liang He. 2015. Effects of nitrogen application levels on nitrogen

- utilization efficiency and fate of fertilizer for winter-planting potato. *Chinese Journal of Soil Science*, 46 (6): 1483 - 1488. (in Chinese)
- 韦剑锋, 韦巧云, 梁振华, 宋书会, 韦冬萍, 梁 和. 2015. 供氮水平对冬马铃薯氮肥利用效率及氮素去向的影响. *土壤通报*, 46 (6): 1483 - 1488.
- Zhang Ai-min, Feng Wu-jian. 2016. Misunderstandings and countermeasures of apple tree fertilization. *Modern Agriculture*, (10): 20 - 23. (in Chinese)
- 张爱敏, 风舞剑. 2016. 苹果树施肥的误区及科学对策. *现代化农业*, (10): 20 - 23.
- Zhang L, Ju X, Qiang G. 2007. Recover of ^{15}N -labeled nitrate injected into deep subsoil by maize in a calcareous cambisol in north China plain. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 38 (11 - 12): 1563 - 1577.
- Zhao Liang, Hou Zhen-an, Huang Ting, Zhang Yang, Chai Ying, Mao Jia-shuang. 2014. Study on the nitrogen rate threshold of maize yield and nitrogen balance in Shihezi Xinjiang. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 20 (4): 860 - 869. (in Chinese)
- 赵 靓, 侯振安, 黄 婷, 张 扬, 柴 颖, 毛家双. 2014. 新疆石河子地区玉米产量及氮素平衡的施氮量阈值研究. *植物营养与肥料学报*, 20 (4): 860 - 869.
- 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.
- Zhu Zhao-liang. 2002. Nitrogen management in relation to food production and environment in China. *Acta Pedologica Sinica*, 39 (Suppl): 3 - 11. (in Chinese)
- 朱兆良. 2002. 氮素管理与粮食生产和环境. *土壤学报*, 39 (增刊): 3 - 11.
- Zuo Hong-juan, Bai You-lu, Lu Yan-li, Wang Lei, Wang He, Wang Zhi-yong. 2012. Fate of fertilizer nitrogen applied to winter wheat in north China plain based on high abundance of ^{15}N . *Scientia Agricultura Sinica*, 45 (15): 3093 - 3099. (in Chinese)
- 左红娟, 自由路, 卢艳丽, 王 磊, 王 贺, 王志勇. 2012. 基于高丰度 ^{15}N 华北平原冬小麦肥料氮的去向研究. *中国农业科学*, 45 (15): 3093 - 3099.

征 订

欢迎订阅 2018 年《作物学报》英文版

The Crop Journal (《作物学报(英文版)》)是中国科协主管,中国作物学会、中国农业科学院作物科学研究所和中国科技出版传媒股份有限公司共同主办的学术期刊。创刊于 2013 年 10 月。主要刊登农作物遗传育种、耕作栽培、生理生化、生态、种质资源以及与农作物有关的生物技术、生物数学、农业气象等领域以第一手资料撰写的研究论文、研究简报以及专题综述等。2016 年被中国科学技术信息研究所评选为“中国科技核心期刊”,被中国知网评选为“2016 中国最具国际影响力学术期刊”。目前收录 The Crop Journal 的国、外数据库有: ESCI 数据库、Scopus 数据库、美国化学文摘(CA)、英国国际农业与生物科学研究中心文摘(CABI)、英国食品科学与技术文摘、联合国粮农组织的 AGRIS 数据库、DOAJ、中国科学引文数据库(CSCD)等。The Crop Journal 与国际知名出版商 Elsevier 合作,在 ScienceDirect 网络出版平台实现全文开放获取(Open Access)和在线预出版(Online first),免收作者任何费用。The Crop Journal 为双月刊,每期 90 页,定价 60 元/册,全年 360 元。可通过全国各地邮局订阅,刊号: CN 10-1112/S, ISSN 2095-5421, 2214-5141 (Online), 邮发代号: 80-668。也可向编辑部直接订购。

网址: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/22145141>, E-mail: cropjournal@caas.cn

地址: 北京市海淀区中关村南大街 12 号, 中国农业科学院作物科学研究所《作物学报》编辑部(邮编 100081)

电话: 010-82108548; 010-82105793