

# 不同供氮水平下幼龄苹果园氮素去向初探

葛顺峰, 姜远茂\*, 魏绍冲, 房祥吉

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

**摘要:** 以2年生红富士/平邑甜茶为试材, 采用田间小区和<sup>15</sup>N微区相结合, 研究了不同供氮水平下幼龄苹果园氮素去向。结果表明, 施用氮肥显著增加了植株生物量和吸氮量, 而氮肥利用率随施氮量的增加显著降低; N75、N150和N225的氮肥利用率分别为31.28%、22.95%和19.38%。土壤残留氮量随施氮量的增加而显著增加, 且残留氮素主要分布于0—60 cm土层, 深层渗漏量很少。整个作物—土壤体系氮素回收率随施肥量的增加显著降低, 损失率显著增高。N75处理的氮素回收率为60.41%, 显著高于N150(46.41%)和N225处理(40.88%); 且损失率最低(39.59%), 显著低于其它两个处理。氨挥发损失随施氮量的增加显著升高, N<sub>2</sub>O损失量各处理间无明显差异; 氮素损失中氨挥发和N<sub>2</sub>O损失所占比例较低, 较多的氮素通过反硝化和径流等途径损失。

**关键词:** 幼龄苹果园; 供氮水平; 氮素去向; 氮素损失

中图分类号: S661.1; S143.6

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2011)04-0949-07

## Nitrogen balance under different nitrogen application rates in young apple orchards

GE Shun-feng, JIANG Yuan-mao\*, WEI Shao-chong, FANG Xiang-ji

(State Key Laboratory of Crop Biology/College of Horticulture Science and Engineering,  
Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China)

**Abstract:** A field and a microplot experiment were conducted at the same time combined to study nitrogen (N) balance under different N application rates by using two-year-old ‘Fuji’ apple trees (*M. domestica* Borkh. cv. Red Fuji/*M. hupenensis* Rhed) in young apple orchards. The results show that the biomass and N uptake capacity of apple trees are increased significantly under the application of nitrogen fertilizer, and the nitrogen use efficiency (NUE) is decreased significantly with increase of N application rates. NUEs of the N75, N150 and N225 treatments are 31.28%, 22.95% and 19.38%, respectively. With increase of N application rates, the N residuals in soil are sharply increased, and the majority of residual N is concentrated in 0–60 cm layer, which indicates fertilizer nitrogen losses in deep soil layers are small. The N recovery rates in soil-crop system are sharply decreased with increase of N application rates, and the N loss rates are increased respectively. The N recovery rate of the N75 treatment is 60.41%, which is significantly higher than those of the N150 (46.41%) and N225 (40.88%) treatments, and the loss rate of the N75 treatment is the lowest (39.59%), which is significantly lower than those of the other two treatments. The amounts of ammonia volatilization are increased significantly with increase of N application rates, however, the N<sub>2</sub>O loss are same. The proportion of ammonia volatilization and N<sub>2</sub>O losses in nitrogen losses are very low, and more nitrogen are lost through denitrification and runoff.

**Key words:** young apple orchard; N levels; fate of nitrogen; nitrogen loss

收稿日期: 2010-12-22 接受日期: 2011-03-24

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-28); 公益性行业(农业)科研专项(201103003); 山东省农业重大应用创新课题(201009)资助。

作者简介: 葛顺峰(1985—), 山东高密人, 硕士研究生, 主要从事果树营养生理与氮素循环研究。Email: geshunfeng210@126.com

\* 通讯作者 Email: ymjiang@sdau.edu.cn

我国苹果栽培面积和产量居世界首位,果业逐渐成为农民增收的重要支柱产业,相应地果园集约化生产得到加强,为提高产量氮素化肥投入越来越大。据统计,目前我国果园氮肥施用量已达  $N\ 400\sim 600\text{ kg/hm}^2$ ,是国外施氮量的 4~5 倍,且呈逐年增加趋势<sup>[1-2]</sup>。氮肥的过量施用不仅使氮肥利用率(NUE)下降<sup>[3]</sup>,农业生产效益降低,而且导致果实生理性病害加重和污染环境等不良后果<sup>[4-5]</sup>。因此,明确氮素在苹果园生态系统中的去向,是提高肥料利用率和制定合理施肥制度的基础,这也是目前国内氮素循环研究的热点。近年来,因氮肥利用率低造成的氮素损失对土壤和大气环境质量的影响引起了广大学者的关注,关于施氮对苹果产量和品质以及氮在树体内的吸收、分配和利用方面的研究较多<sup>[6-8]</sup>,但是相比大田作物、蔬菜和牧草等一年生草本植物<sup>[9-13]</sup>,系统研究苹果园生态系统施氮肥后氮的去向的综合田间试验尚少见报道。为此,我们以红富士/平邑甜茶为试材,通过田间小区和<sup>15</sup>N 微区试验,对苹果园生态系统施氮肥后肥料氮的去向(树体吸收、氨挥发、硝化反硝化损失、淋溶损失和土壤残留)进行研究,以期为苹果生产合理施肥提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验设计

试验在山东泰安山东农业大学园艺试验站进行。该地属温带大陆性半湿润季风气候区,年均气温为 12.9℃,年无霜期约 195 d,年平均降水量 697 mm,降水主要集中在 6~9 月。土壤为棕壤土,表层 0—20 cm 土层有机质含量 9.83 g/kg,碱解氮 86.97 mg/kg,速效磷 22.57 mg/kg,速效钾 125.37 mg/kg, pH (H<sub>2</sub>O) 6.80。0—20、20—40、40—60、60—80、80—100 cm 土层的容重分别为 1.13、1.28、1.37、1.41、1.43 g/cm<sup>3</sup>。试材为 2 年生红富士(*M. domestica* Borkh. cv. Red Fuji/平邑甜茶(*M. hupehensis* Rhed))。

试验分田间小区试验和<sup>15</sup>N 同位素微区试验两部分。田间小区试验用于测定氮的氨挥发和硝化-反硝化损失;<sup>15</sup>N 同位素微区试验用于确定植株吸氮量和土壤残留氮量,两者结合以确定幼龄苹果园施氮肥后肥料氮的去向。

田间小区试验:小区面积 2 m<sup>2</sup>,每小区 4 株苹果植株,株行距为 0.5 m × 1.0 m,各小区四周由宽 10 cm,深 100 cm 的水泥板隔开,小区之间距离 0.5

m,防止因地下淋溶侧渗和地表径流而造成小区间氮肥相互流通。设 3 个处理,分别为:低氮(N 75 kg/hm<sup>2</sup>,N75)、中氮(N 150 kg/hm<sup>2</sup>,N150)和高氮(即农民习惯用量,N 225 kg/hm<sup>2</sup>,N225),3 次重复,随机区组排列。氮肥为尿素(含 N 46%),各处理磷、钾肥为过磷酸钙和硫酸钾,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 各 80 kg/hm<sup>2</sup>。氮肥的 60% 和磷、钾肥的全部于 4 月 20 日施入,施肥方法是距树干 15 cm 处挖两条条状沟,撒施均匀后覆土;氮肥的 40% 作为追肥于 6 月 24 日表面撒施。

<sup>15</sup>N 同位素微区试验:将 70 cm (长) × 70 cm (宽) × 80 cm (高) 的微区框埋进土壤至 5 cm 露出地面,每个微区框内一株植株,3 次重复。微区单位面积肥料用量和施用方法与小区试验相同,尿素是丰度为 10.25% 的<sup>15</sup>N-尿素(上海化工研究院生产)。

### 1.2 测定项目与方法

植株吸氮量:9 月 20 日植株停止生长时,整株破坏性采样,解析为细根(直径 ≤ 0.2 cm)、粗根(直径 > 0.2 cm)、新梢、叶片、多年生枝干。样品按清水→洗涤剂→清水→1% 盐酸→3 次去离子水顺序冲洗后,105℃ 下杀青 30 min,随后在 80℃ 下烘干至恒重,电磨粉碎后过 0.25 mm 筛,混匀后装袋备用。植物样品的全氮含量用开氏法测定;将开氏法定氮后的蒸馏液酸化,浓缩至 3 mL,用 ZHT-03 质谱计(北京分析仪器厂)测定样品的<sup>15</sup>N 丰度。

土壤残留氮量:植株解析的同时将<sup>15</sup>N 微区试验微区框内 0—20 cm 土层土壤全部取出,称重并混合均匀后四分法取样;将 20—40、40—60、60—80 和 80—100 cm 土层用土钻取 5 钻土混合,5 钻土的采集部位为树干处为一个、树干两侧的两个施肥带上各一个、两个施肥带外侧各一个。用 ZHT-03 (北京分析仪器厂)质谱计测定样品的<sup>15</sup>N 丰度。每个土层<sup>15</sup>N 残留量 = Ndff × 土层厚度 × 土壤容重 × 土层含氮量。

氨挥发:采用双层海绵通气法测定氨挥发。氨收集装置由内径 15 cm、高 10 cm 的 PVC 管制成。测定过程中分别将两块厚度为 2 cm、直径为 16 cm 的海绵均匀浸以 15 mL 的磷酸甘油溶液(50 mL 磷酸 + 40 mL 丙三醇,定容至 1 L)后,置于硬质塑料管中,下层海绵距管底 5 cm,上层海绵与管顶部相平。浸润每块海绵所需要的磷酸甘油溶液不超过 15 mL,仅相当于海绵通气孔隙体积的 3.8%,试验过程中可以保证装置内的土壤表面经海绵与外界环境的空气流通。下层海绵用于吸收土壤挥发出的 NH<sub>3</sub>,

上层海绵用于防止空气中的  $\text{NH}_3$  和灰尘进入。氨挥发的测定于施肥后的当天开始,每日上午 10:00 取样,该通量值作为每天氨挥发的平均通量。双层海绵吸收装置对氨气自然挥发有一定抑制作用,氨挥发速率为微风状态下的 85% 左右,因此所测数值通过系数矫正后可代表自然条件下的氨挥发值<sup>[14]</sup>。

总硝化-反硝化作用与  $\text{N}_2\text{O}$  排放:总硝化-反硝化作用的测定于施肥后 3 d 立即开始,用气压过程分离法(Barometric Process Separation,简称 BaPS)测定,每周 1 次。该系统适用于测定旱地土壤反硝化、总硝化和呼吸速率,仪器由德国 UMS GrmbH 公司生产,Fraunhofer Institute for Atmospherically Environment Research 研发,其计算原理和在苹果园中的应用详见文献<sup>[15-16]</sup>。

每次测定前和结束时,用 20 mL 的注射器抽取密闭空间内 10 mL 气体,采用 Agilent 4890D 型气相色谱仪分析,用 ECD 检测器检测  $\text{N}_2\text{O}$  的浓度。根据密闭空间体积、密闭培养时间和密闭培养温度来计算测定期间  $\text{N}_2\text{O}$  的排放量。

### 1.3 数据计算与统计

$\text{Ndff}$  (植株器官从肥料中吸收分配到的<sup>15</sup>N 量对该器官全氮量的贡献率,%) = [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;

氮肥利用率(%) = [ $\text{Ndff}$  × 器官全氮量(g)]/施肥量(g) × 100;

氮肥残留率(%) = ( $\text{Ndff}$  × 土层厚度 × 土壤容重 × 土层含氮量)/施肥量(g) × 100;

氮肥损失率 = 100% - 氮肥利用率 - 氮肥残留率。

试验数据采用 DPS 7.05 进行单因素方差分析, LSD 法进行差异显著性比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 植株吸氮量和氮肥利用率

施用氮肥显著增加了苹果植株生物量和吸氮量。表 1 表明,随施肥量增加,苹果植株生物量也随之增加,3 个施氮处理间差异显著,其中 N225 处理植株生物量最大,达 2776.27 kg/hm<sup>2</sup>,是 N75 处理的 1.60 倍。苹果植株的吸氮量也随施肥量的增加而显著增加,N225 处理植株吸氮量最大,达 43.61 kg/hm<sup>2</sup>,分别比 N75 和 N150 处理高 85.89% 和 26.70%。氮肥利用率则随施肥量的增加逐渐降低,N75 处理最高,N225 处理最低。

表 1 不同处理苹果植株生物量和<sup>15</sup>N 吸收量(kg/hm<sup>2</sup>)

Table 1 Total biomass and <sup>15</sup>N uptake by apple trees in different treatment

处理 Treatment	生物量 Biomass (kg/hm <sup>2</sup> )	<sup>15</sup> N 吸收量 <sup>15</sup> N uptake (kg/hm <sup>2</sup> )	氮肥利用率 NUR (%)
N75	1740.34 C	23.46 C	31.28
N150	2457.72 B	34.42 B	22.95
N225	2776.27 A	43.61 A	19.38

注(Note):所有数据均为扣除 N0 基本值后所得数据,同列数据后不同大写字母表示差异达 1% 显著水平 All data are equal to the determined value subtract the basic value. Different capital letters in the same column mean significant at 1% level.

### 2.2 氨挥发损失

不同施氮量氨挥发速率变化存在明显差异,施肥后 9 d 内,各处理氨挥发速率变化较大,在 N 0.25 ~ 2.26 kg/(hm<sup>2</sup> · d) 之间,且峰值出现时间不一。N75 和 N150 处理的氨挥发速率随着施肥后时间的推移迅速增大,均在第 3 d 出现峰值,然后逐渐下降,第 9 d 接近对照处理,整个变化过程呈单峰趋势;N225 处理峰值出现时间晚于 N75 和 N150 处理,于第 4 d 出现峰值,且峰值最大(图 1)。追肥后各处理的氨挥发速率变化趋势与基肥类似,各处理均呈先升高后降低的单峰趋势,但各处理氨挥发速率峰值普遍大于施基肥时的峰值(图 2)。原因是基肥是沟施后覆土,肥料集中在深层土壤,水解后的铵态氮被土壤吸附,从而减少了表层土壤的氨浓度,有效降低了氨态氮向氨气的转化速率,从而抑制了氨挥发;而追肥采用的是撒施,肥料处于土壤表面,并且追肥时土壤温度较

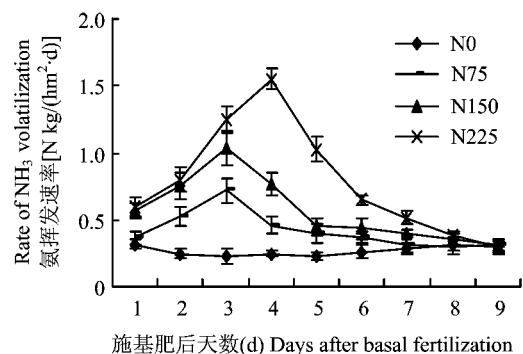


图 1 施基肥后各处理氨挥发速率的动态变化  
Fig. 1 Dynamic changes of ammonia volatilization after basal fertilization

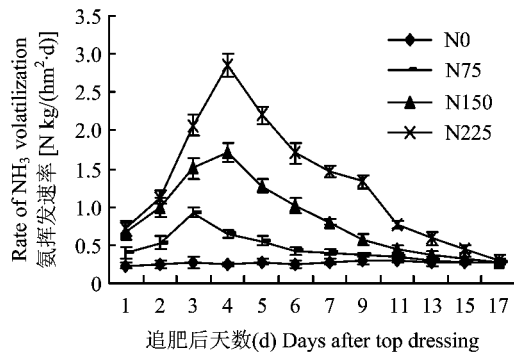


图2 追肥后各处理氨挥发速率的动态变化  
Fig. 2 Dynamic changes of ammonia volatilization after top dressing

高,有利于铵态氮向氨气的转化。

所有施肥处理的氨挥发量均显著高于对照,说明氮肥的施用明显促进了氨挥发。表2看出,不同施氮量处理氨挥发量存在显著差异,施基肥后各施氮处理的氨挥发量达 3.20 ~ 6.21 kg/hm<sup>2</sup>,追肥的氨挥发量明显高于基肥,达 5.16 ~ 22.20 kg/hm<sup>2</sup>。去掉对照本底值后,全生长季 N75、N150 和 N225 施肥处理下由氮肥的施入而引起的氨挥发损失量分别为 4.28、15.98 和 24.33 kg/hm<sup>2</sup>,分别占施氮量的 5.71%、10.65% 和 10.81%。

2.3 总硝化-反硝化作用和 N<sub>2</sub>O 排放损失(表3)

本试验从施肥后 3 d 开始每周进行总硝化-反

表2 不同处理土壤的氨挥发量

Table 2 Amount of ammonia volatilization under different treatments

处理 Treatment	基肥后(kg/hm <sup>2</sup> ) After basal dressing	追肥后(kg/hm <sup>2</sup> ) After top dressing	全生长季(kg/hm <sup>2</sup> ) Whole growth period	化肥氮的氨挥发(kg/hm <sup>2</sup> ) NH <sub>3</sub> from fertilizer	占施氮量比例(%) % of N application
N0	1.89	2.19	4.08 D	0	—
N75	3.20	5.16	8.36 C	4.28 C	5.71
N150	4.40	15.66	20.06 B	15.98 B	10.65
N225	6.21	22.20	28.41 A	24.33 A	10.81

注( Note): 同列数据后不同大写字母表示差异达 1% 显著水平 Different capital letters in the same column mean significant at 1% level.

硝化速率测定,一直持续到 9 月 20 日植株停止生长。结果看出,施肥各处理的总硝化-反硝化速率均高于不施肥处理,但施肥处理间差异不显著。总硝化速率在 N 79.84 ~ 413.42 μg/(kg·h) 之间变化,且各处理变异幅度较大;反硝化速率最大值出现在 6 月中旬的 N150 处理,达 N 167.43 μg/(kg·h),多个测定时期则处于检测限以下,各处理同样存在较大变异。

表3 生长期间不同处理的 N<sub>2</sub>O 损失量(kg/hm<sup>2</sup>)

Table 3 N<sub>2</sub>O loss under different treatments during the growth period

处理 Treatment	反硝化损失 Denitrification loss	化肥氮的反硝化损失 Denitrification loss from fertilizer
N0	1.68 D	0
N75	3.41 C	1.73
N150	3.74 B	2.06
N225	3.51 A	1.83

注( Note): 同列数据后不同大写字母表示差异达 1% 显著水平 Different capital letters in the same column mean significant at 1% level.

整个测定期间,N0、N75、N150 和 N225 处理的 N<sub>2</sub>O 排放量分别为 1.68、3.41、3.74 和 3.51 kg/hm<sup>2</sup> (表3)。去掉 N0 本底值后,N75、N150 和 N225 施肥处理下由氮肥的施入而引起的反硝化损失量分别为 1.73、2.06 和 1.83 kg/hm<sup>2</sup>。

2.4 土壤氮素残留

表4看出,N75、N150 和 N225 处理的氮素土壤残留量分别为 N 21.85、35.20 和 48.38 kg/hm<sup>2</sup>,说

表4 不同处理土壤 <sup>15</sup>N 残留量(kg/hm<sup>2</sup>)

Table 4 Amount soil of residual <sup>15</sup>N under different treatments

土壤深度 Soil depth (cm)	N75	N150	N225
0—20	8.42	12.32	15.21
20—40	6.82	11.78	17.35
40—60	4.23	7.64	9.17
60—80	1.91	2.43	4.81
80—100	0.47	1.03	1.84
总计 Total	21.85 C	35.20 B	48.38 A
残留率 Residual rate(%)	29.13	23.47	21.50

注( Note): 数据后不同大写字母表示差异达 1% 显著水平 Values followed by different capital letters mean significant at 1% level.

明随施肥量的增加,土壤残留氮量显著增加。土壤残留氮基本累积在 0—60 cm 土层中,60 cm 以下仅占土壤残留总氮量的 0.98%~1.37%,表明本试验条件下绝大部分未被吸收利用的氮素集中于施肥层(0—60 cm 土层),而氮素的深层淋溶损失则较小。

### 2.5 不同施氮量处理氮素去向分析

施氮肥后苹果吸氮量和土壤残留量随施氮量的

增加而增加,但氮素回收率却随施氮量的增加而显著降低(表 5)。其中,N75 处理氮素回收率最高,为 60.41%,比 N225 处理提高近 20 个百分点;损失率 N225 高达 59.12%,N75 处理最低。从损失途径看,氨挥发和反硝化损失量所占比例较小,说明更多的氮素通过其它途径损失。

表 5 苹果园生态系统氮素去向

Table 5 Fate of nitrogen applied in the apple ecosystem

处理 Treat.	回收氮量 N recovery				损失氮量 N loss				
	吸收 Uptake (kg/hm <sup>2</sup> )	残留 Residue (kg/hm <sup>2</sup> )	合计 Total (kg/hm <sup>2</sup> )	回收率 Rec. rate (%)	氨挥发 NH <sub>3</sub> volatil. (kg/hm <sup>2</sup> )	N <sub>2</sub> O 损失 N <sub>2</sub> O loss (kg/hm <sup>2</sup> )	其它损失 Others (kg/hm <sup>2</sup> )	合计 Total (kg/hm <sup>2</sup> )	损失率 Loss rate (%)
N75	23.46	21.85	45.31	60.41	4.28	1.73	23.68	29.69	39.59
N150	34.42	35.20	69.62	46.41	15.98	2.06	62.34	80.38	53.59
N225	43.61	48.38	91.99	40.88	24.33	1.83	106.85	133.01	59.12

注( Note): 所有数据均为扣除 N0 基本值后所得数据 All data are equal to the determined value subtract the basic value.

## 3 讨论

大量研究表明,氮肥施入土壤后其利用率仅为 30%~50%,且随种植方式、土壤性状及管理方式差异很大<sup>[17-18]</sup>。本试验看出,随施氮量的增加植株生物量显著增加,但氮肥利用率显著降低,这与许多试验结果一致<sup>[3,13,18-19]</sup>。与氮肥利用率一样,氮肥残留率也受土壤性质、作物种类和生长时期、氮肥及种类和施用技术、气象条件等因素的强烈影响,变幅很大。朱兆良等<sup>[20]</sup>研究表明,国内当季作物收获时化肥氮在土壤中的残留率一般占施氮量的 15%~30%,国外土壤中<sup>15</sup>N 残留率在 12%~44% 之间。本试验的氮素土壤残留量达 21.50%~29.13%,施肥量越大残留量越多,但残留率越小;并且施肥层(20—40 cm)向上 0—20 cm 土层的残留氮量显著多于 40—60 cm 土层,60 cm 以下土层的氮素残留量很少,表明苹果生产体系氮素下层渗漏损失较少,这与赵林等在苹果园和曹兵、庄舜尧等在蔬菜地的研究一致<sup>[7,19,21]</sup>。

通过氨挥发损失的 N 可达施入量的 1%~47%,其中碳铵的 N 素损失在 49%~66%,尿素在 29%~40%<sup>[22]</sup>。Tian 等<sup>[23]</sup>研究表明,我国北方潮土上种植的水稻、玉米和小麦施肥后的氨挥发是氮肥损失的主要途径,损失率平均为 14%~35.6%。葛顺峰等<sup>[24]</sup>对 25 年生苹果园研究表明,有机肥无

机肥配施条件下氨挥发损失为 2.29%~3.46%。本试验中氨挥发损失量只占施氮量的 5.71%~10.81%,处于较低水平,一方面与试验地土壤 pH 值较低有关。研究<sup>[25-27]</sup>表明,在众多影响氨挥发的土壤因子中,pH 起着决定性作用,当土壤 pH 低于 7 时,尿素在土壤中水解后更利于形成铵态氮,铵态氮只占铵态和氨态氮总量的 1% 以下,氨挥发潜势非常低从而显著降低氨挥发。另一方面与基肥的施肥方式有关,沟施后覆土,肥料集中在深层土壤,水解后的铵态氮被土壤吸附,从而减少了表层土壤的氨浓度,有效降低了氨态氮向氨气的转化速率,从而抑制了氨挥发。

总硝化和反硝化作用是陆地生态系统中氮循环的两个重要过程,此过程受到生物和非生物因素的调节和控制,不仅影响着土壤氮的有效性,而且是温室气体氧化亚氮释放的主要过程,是氮素损失的重要途径。Neeteson 和 Carton<sup>[28]</sup>认为,菜地土壤氮素损失的主要途径是硝酸盐淋洗和反硝化。Ryden 等<sup>[29]</sup>对多种蔬菜种植期间反硝化损失的直接测定结果表明,所施氮肥的 14%~52% 通过反硝化损失。然而本试验 3 个施氮处理反硝化损失氮量只有 1.73、2.06 和 1.83 kg/hm<sup>2</sup>,施氮量的增加并没有影响反硝化速率,处理间差异不明显,这可能与本试验所采用的测定方法有关。BaPS 技术是最近发展起来的测定土壤总硝化和反硝化作用的一种新途径,

其最大的优点在于采集的是田间原状土柱,对土壤原有结构破坏较小,不额外添加抑制剂或氮源,测定的土壤碳氮转化速率与实际情况最为接近。在不同生境条件下,把 BaPS 方法与同位素示踪法和乙炔抑制法的测定结果进行比较,发现 BaPS 方法与上述两种方法的结果有很好的一致性<sup>[30-32]</sup>。但是本试验中总硝化和反硝化作用每次测定完成后收集的气体仅通过气相色谱测定了 N<sub>2</sub>O 的含量,而没有测定其他氮氧化物,因此会低估总硝化和反硝化作用造成的氮素损失量。由于研究方法的限制,苹果园土壤总硝化和反硝化作用所导致的氮损失有待于进一步研究。

大田作物许多研究<sup>[33-34]</sup>表明,未被当季作物利用的氮主要以氮表观损失和残留土壤中,且随施氮水平的提高,氮表观损失量和土壤残留量均随之增加。从本试验看出,N75、N150 和 N225 处理,氮素利用率分别为 31.28%、22.95%、19.38%,土壤残留量为 21.85、35.20、48.38 kg/hm<sup>2</sup>,氮素损失率则为 39.59%、53.59%、59.12%,可见,施氮量越高氮肥利用率越低,氮素土壤残留量越大,损失率越高。N150 和 N225 处理的氮素土壤残留量和损失率明显高于 N75 处理,表明适量施氮条件下,土壤-作物系统中氮素的残留和损失均较低,当氮肥施用量超过作物的需要量时,氮素盈余急剧增加,盈余的氮素或以 N<sub>min</sub> 形式残留于土壤剖面中,或损失于土壤-作物和大气系统,从而导致相应的环境问题。

由于化学氮肥的去向受很多因素的影响,如土壤条件、气候、地形地貌以及施氮量和施肥时间等,同时也受到测定方法差异的影响,因此,对土壤中尿素氮去向的定量估算有相当大的不确定性<sup>[20]</sup>。本试验条件下测定了作物吸收、土壤残留、氮挥发和总硝化-反硝化等多条氮素损失途径,通过分析,仍然有相当一部分氮素以其他途径损失,被低估的总硝化-反硝化损失是其中一条途径,另一部分可能通过径流和杂草带走而损失。

## 参 考 文 献:

- [1] 高超,张桃林,孙波,等. 1980 年以来我国农业氮素管理的现状与问题[J]. 南京大学学报(自然科学版),2002,38(5): 716-721.  
Gao C, Zhang T L, Sun B *et al.* Nitrogen management in chinese agriculture since early 1980 s: status and problems[J]. J. Nanjing Univ. (Nat. Sci. Ed.), 2002, 38(5): 716-721.
- [2] 彭福田,姜远茂. 不同产量水平苹果园氮磷钾营养特点研究[J]. 中国农业科学,2006,39(2): 361-367.  
Peng F T, Jiang Y M. Characteristics of N, P, and K nutrition in different yield level apple orchards [J]. Sci. Agric. Sin., 2006, 39(2): 361-367.
- [3] 易镇邪,王璞,陈平平,屠乃美. 氮肥类型对夏玉米氮素吸收和利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2008,14(3): 472-478.  
Yi Z X, Wang P, Chen P P, Tu N M. Effect of different types of nitrogen fertilizer on nitrogen absorption and utilization of summer maize [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2008,14(3): 472-478.
- [4] Weaver M A L. Changing farm practice to meet environmental objectives of nutrient loss to Oyster Harbour[J]. Fert. Res., 1993, 36: 177-184.
- [5] 范可正. 中国肥料手册[M]. 北京:中国化工信息中心,2001.  
Fan K Z. China fertilizer manual[M]. Beijing: China National Chemical Information Center, 2001.
- [6] 赵佐平,同延安,高义民,付莹莹. 不同肥料配比对富士苹果产量及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(5): 1130-1135.  
Zhao Z P, Tong Y A, Gao Y M, Fu Y Y. Effect of different fertilization on yield and quality of Fuji apple [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2009, 15(5): 1130-1135.
- [7] 赵林,姜远茂,彭福田,等. 嘎拉苹果对春施<sup>15</sup>N-尿素的吸收、利用与分配特性[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(6): 1439-1443.  
Zhao L, Jiang Y M, Peng F T *et al.* Characteristics of absorption, utilization and distribution of spring soil <sup>15</sup>N-urea application for Gala/Malus hupehensis [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2009, 15(6): 1439-1443.
- [8] 顾曼如,束怀瑞,周宏伟. 苹果氮素营养研究 VI. 贮藏<sup>15</sup>N 的运转、分配特性[J]. 园艺学报,1986,13(1): 25-30.  
Gu M R, Shu H R, Zhou H W. A study on the nitrogen nutrition of apple trees VI. The characters of translocation and distribution of translocation [J]. Acta Hort. Sin., 1986, 13(1): 25-30.
- [9] 易时来,石孝均,温明霞,等. 小麦生长季氮素在紫色土中的迁移和淋失[J]. 水土保持学报,2004,18(4): 46-49.  
Yi S L, Shi X J, Wen M X *et al.* Nitrogen transference and leaching loss in growth period of wheat in purple soil [J]. J. Soil Water Conserv., 2004, 18(4): 46-49.
- [10] 张福珠,熊先哲,戴同顺,韩淑华. 应用<sup>15</sup>N 研究土壤-植株系统中氮素淋失动态[J]. 环境科学,1984,5(1): 21-24.  
Zhang F Z, Xiong X Z, Dai T S, Han S H. A study on the dynamics of nitrogen leaching loss within soil-plant system by using isotope <sup>15</sup>N [J]. Environ. Sci., 1984, 5(1): 21-24.
- [11] 刘吉涛. 应用<sup>15</sup>N 研究棉田生态系统中氮素动态[J]. 农村生态环境,1988,(1): 43-46.  
Liu J T. A study on the nitrogen dynamics within the ecosystem of a cotton field by using isotope <sup>15</sup>N [J]. Rural Eco-Environ., 1988,(1): 43-46.
- [12] 周静,崔健,王国强,马友华. 我国南方牧草生态系统氮素平衡与循环特征研究[J]. 土壤,2008,40(3): 386-391.  
Zhou J, Cui J, Wang G Q, Ma Y H. Nitrogen balance and cycling in pasture ecosystem in south China [J]. Soils, 2008, 40

- (3): 386-391.
- [13] 葛晓光,王晓雪,付亚文,刘秀茹. 长期定位施氮条件下菜园氮素循环的研究[J]. 中国蔬菜,1999,(1): 13-17.  
Ge X G, Wang X X, Fu Y W, Liu X R. Studies on nitrogen cycle under experiment of long-term, fixed position nitrogen application in vegetable field [J]. China Veget., 1999(1): 13-17.
- [14] 董文旭,胡春胜,张玉铭. 华北农田土壤氨挥发原位测定研究[J]. 中国生态农业学报,2006,114(13): 46-48.  
Dong W X, Hu C S, Zhang Y M. In situ determination of ammonia volatilization in field of North China [J]. Chin. J. Eco-Agric., 2006, 114(13): 46-48.
- [15] Ingwersen J, Stange C F, Ju X T, Streck T. Shortcomings in the commercialized barometric process separation measuring system [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2008, 72: 135-142.
- [16] 葛顺峰,姜远茂,彭福田,等. 运用气压过程分离法测定旱地苹果园土壤硝化-反硝化作用[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2010,41(3): 330-333.  
Ge S F, Jiang Y M, Peng F T *et al.* Measurement of nitrification and denitrification in upland apple orchard using Barometric process separation [J]. J. Shandong Agric. Univ. (Nat. Sci.), 2010, 41(3): 330-333.
- [17] Ladha J K, Pathak H, Krupnik T J *et al.* Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: Retrospects and prospects [J]. Adv. Agron., 2005, 87: 85-156.
- [18] 张爱平,杨世琦,杨淑静,等. 不同供氮水平对春小麦产量、氮肥利用率及氮平衡的影响[J]. 中国农学通报,2009,25(17): 137-142.  
Zhang A P, Yang S Q, Yang S J *et al.* Effect of N rates on yield of spring wheat, fertilizer N recovery and N balance [J]. Chin. Agric. Sci. Bull., 2009, 25(17): 137-142.
- [19] 曹兵,金雪霞,蔡贵信,等. 低量施氮对小青菜生长和氮素损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2005,11(4): 519-523.  
Cao B, Jin X X, Cai G X *et al.* Effects of low rate nitrogen application on *Brassica chinensis* growth and N losses [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2005, 11(4): 519-523.
- [20] 朱兆良. 氮素管理与粮食生产和环境[J]. 土壤学报,2002,39(增刊): 3-11.  
Zhu Z L. Nitrogen management in relation to food production and environment in China [J]. Acta Pedol. Sin., 2002,39(Sup.): 3-11.
- [21] 庄舜尧,孙秀廷. 肥料氮在蔬菜地中的去向及平衡[J]. 土壤,1997,(2): 80-83.  
Zhuang S Y, Sun X T. Fate and balance of N fertilizer in vegetable fields [J]. Soils, 1997, (2): 80-83.
- [22] Cai G X, Chen D L, Ding H *et al.* Nitrogen losses from fertilizers applied to maize, wheat and rice in the North China Plain [J]. Nutr. Cycl. Agroecosyst., 2002, 63: 187-195.
- [23] Tian G M, Cao J L, Cai Z C *et al.* Ammonia volatilization from wheat field top dressed with urea [J]. Pedosphere, 1998, 8(4): 331-336.
- [24] 葛顺峰,姜远茂,彭福田,等. 春季有机肥和化肥配施对苹果园土壤氨挥发的影响[J]. 水土保持学报,2010,24(5): 199-203.  
Ge S F, Jiang Y M, Peng F T *et al.* Effect of chemical fertilizers application combined with organic manure on ammonia volatilization in spring in apple orchard [J]. J. Soil Water Conserv., 2010, 24(5): 199-203.
- [25] He Z L, Alva A K, Calvert D V, Banks D J. Ammonia volatilization from different fertilizer sources and effects of temperature and soil pH [J]. Soil Sci., 1999, 164(10): 750-758.
- [26] Duan Z H, Xiao H L. Effects of soil properties on ammonia volatilization [J]. Soil Sci. Plant Nutr., 2000, 46(4): 845-852.
- [27] Delaune R D, Patrick W H. Urea conversion to ammonia in water logged soil [J]. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1970, 34: 603-607.
- [28] Neeteson J J, Carton O T. The environmental impact of nitrogen in field vegetable production [J]. Acta Hort., 2001, 563: 21-28.
- [29] Ryden J C, Lund L J. Nature and extent of directly measured denitrification loss from some irrigated vegetable crop production units [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1980, 40: 505-511.
- [30] Breuer L, Kiese R, Butterbach-Bahl K. Temperature and moisture effects on nitrification rates in tropical rain forest soils [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2002, 66: 834-844.
- [31] Kiese R, Papen H, Zumbusch E *et al.* Nitrification activity in tropical rain forest soils of the Coastal Lowlands and Atherton Tablelands, Queensland, Australia [J]. J. Plant Nutr. Soil Sci., 2002, 165: 682-685.
- [32] Ingwersen J, Butterbach-Bahl K, Gasche R *et al.* Barometric process separation: new method for quantifying nitrification, denitrification, and nitrous oxide sources in soil [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1999, 63: 117-128.
- [33] 刘新宇,巨晓棠,张丽娟,等. 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[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(2): 296-303.  
Liu X Y, Ju X T, Zhang L J *et al.* Effects of different N rates on fate of N fertilizer and balance of soil N of winter wheat [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(2): 296-303.
- [34] 郭天才,宋晓,冯伟,等. 高产麦田氮素利用、氮平衡及适宜施氮量[J]. 作物学报,2008,34(5): 886-892.  
Guo T C, Song X, Feng W *et al.* Utilization and balance of nitrogen and proper application amount of nitrogen fertilizer in winter wheat in high yielding regions [J]. Acta Agron. Sin., 2008, 34(5): 886-892.