

不同氮素浓度条件下矮砧苹果的产量品质主成分分析研究

乔源

杨凌职业技术学院

DOI:10.12238/as.v8i4.2938

[摘要] 本研究以1年生红富士苹果幼树为试材,通过双因素完全随机设计,探究硝态氮与铵态氮在不同浓度下对矮砧苹果幼树生长、生理特性及氮素利用的影响。结果表明:硝态氮处理显著促进植株形态发育,其中NC处理的侧生分梢长度、中心干延长梢增长量及茎粗均达到最高值,总干质量和相对生长速率显著优于铵态氮处理。生理代谢方面,NC处理叶绿素总含量和净光合速率显著提升,且各器官氮素吸收量及分配量均呈现最优状态。低浓度铵态氮(AL)处理则导致叶片钾、锰含量下降,氮素转移效率降低99.53%。主成分分析表明,硝态氮通过增强光合能力与氮素分配效率,显著提高生物量积累及氮肥利用率。本研究为矮砧苹果园氮肥精准调控提供了理论依据,建议生产中以硝态氮源结合常规浓度施用,兼顾高产与生态效益。

[关键词] 氮素形态; 浓度梯度; 矮砧苹果; 光合特性; 氮素分配; 主成分分析

中图分类号: S661.1 文献标识码: A

Principal component analysis of yield and quality of dwarf rootstock apples under different nitrogen concentration conditions

Yuan Qiao

Yangling Vocational & Technical College

[Abstract] This study used 1-year-old Red Fuji apple saplings as test materials and investigated the effects of nitrate nitrogen and ammonium nitrogen at different concentrations on the growth, physiological characteristics, and nitrogen utilization of dwarf apple saplings through a two factor completely randomized design. The results showed that nitrate nitrogen treatment significantly promoted plant morphological development, with NC treatment achieving the highest values in lateral shoot length, central stem elongation, and stem thickness. The total dry mass and relative growth rate were significantly better than those of ammonium nitrogen treatment. In terms of physiological metabolism, NC treatment significantly increased the total chlorophyll content and net photosynthetic rate, and the nitrogen absorption and distribution in various organs showed the optimal state. Low concentration ammonium nitrogen (AL) treatment resulted in a decrease in leaf potassium and manganese content, and a 99.53% reduction in nitrogen transfer efficiency. Principal component analysis showed that nitrate nitrogen significantly increased biomass accumulation and nitrogen fertilizer utilization efficiency by enhancing photosynthetic capacity and nitrogen allocation efficiency. This study provides a theoretical basis for precise regulation of nitrogen fertilizer in dwarf apple orchards, and suggests using nitrate nitrogen sources combined with conventional concentrations in production to balance high yield and ecological benefits.

[Key words] nitrogen forms; Concentration gradient; Dwarf rootstock apple; Photosynthetic characteristics; Nitrogen allocation; principal component analysis

引言

氮是影响果树生长和果实品质的重要因素。李晶et al. (2015)研究发现,合理施氮可明显提高叶片氮素含量、叶绿素含量和叶面积,并通过提高光合效率,提高生物量积累。凯勒等人(1998)的研究结果表明,氮肥对番茄花芽分化有重要作

用,Mohamed et al. (1986)通过对番茄的研究表明,适当施用氮肥可以提高番茄的坐果率和最终的产量。氮肥的增产机理是通过提高单果重(泰勒and Ender, 1970)、Saenz et al. (1997)和彭福田等人(2002, 2003)在苹果研究中发现,增施氮肥可以明显提高单株果重,并能明显延长果实发育期,加速果实发育。

但是,氮肥的施用要注意适量。鲁剑巍et al. (2004)研究表明,氮素缺乏导致植物营养缺乏,主要表现为叶片数减少,单株叶重降低,并伴有矮化和结实能力的降低。而李付国et al. (2006)的研究发现,过度施肥会引起植物体内养分过多,引起叶片K、Mn、Fe等元素的平衡失调,并伴有色泽下降、可溶性固形物下降和可滴定酸含量增加。Curtis et al. (2001)研究表明,过量的氮肥也会导致果实褐腐病、痘斑病等病害的发生,并增加害虫的发病率(Curtis et al., 1990)。研究表明,随施氮量的增大,果树对土壤养分的吸收和利用效率不断下降,对苹果园的可持续发展产生了潜在的危害。

在此基础上,本项目以红富士幼树(天红2号/冀砧2号/八棱山)为试材,通过施氮(铵态氮、硝态氮)及浓度梯度施氮,从营养元素吸收、生长发育及氮素在幼树体内的分布特征等方面,系统地研究氮素形态及浓度对幼树营养元素吸收、生长发育和分布的影响机理。本项目以苹果为研究对象,以揭示果树氮高效调控机理及调控机理为目标,为果树精准施氮技术、提高果树氮高效利用及品质定向改良奠定理论基础。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验以1年生红富士苹果(Malus domestica Borkh. 'Red Fuji')幼树为试材,嫁接于矮化砧木组合(中间砧:天红2号;基砧:冀砧2号与八棱海棠)。供试苗木生长势均一,根系发达,初始株高(45±3)cm,茎粗(0.8±0.1)cm。试验采用盆栽方式,栽培基质为沙壤土(pH6.8,有机质含量1.2%,碱解氮45.3mg/kg,速效磷18.7mg/kg,速效钾102.5mg/kg),每盆装土量15kg。试验于可控环境温室中进行,温度设定为昼/夜25℃/18℃,相对湿度60%~70%,自然光照辅以人工补光(光周期14h/d)。

1.2 试验处理

试验采用双因素完全随机设计,设置氮素形态(硝态氮、铵态氮)与氮素浓度(常规浓度、低浓度)2个因素,形成4个处理组合:硝态氮常规浓度(NC)、硝态氮低浓度(NL)、铵态氮常规浓度(AC)、铵态氮低浓度(AL)。氮素形态分别以硝酸钙(Ca(NO₃)₂·4H₂O)和硫酸铵((NH₄)₂SO₄)作为硝态氮源与铵态氮源。常规浓度设置为200mgN/kg土(折合纯氮3.0g/盆),低氮浓度为常规浓度的50%(100mgN/kg土,1.5gN/盆)。氮肥分4次等量施用(移栽后第0、30、60、90d),以水溶液形式灌根,每次每盆施用量为375mL。各处理同步补充等量磷钾肥(P205 1.5g/盆, K₂O 2.0g/盆),确保氮素形态与浓度为唯一变量。试验共设5次生物学重复,每处理20盆,总计80盆。所有处理植株定植后统一浇灌去离子水至田间持水量60%,并于每次施肥后24h内测定基质含水量以维持水分条件一致。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 生长参数

(1)形态生长指标。侧生分梢长度与数量:自处理开始后每30d(0、30、60、90、120d)采用卷尺测定所有侧生分梢的基部至顶端的绝对长度(cm),记录单株侧生分梢总数及平均长度。

中心干延长梢生长动态:每30d测量中心干延长梢自基部至顶端的绝对长度(cm),计算累计增长量。

茎粗:使用数显游标卡尺(精度0.01mm)在处理0d和120d时测定植株基部(距地面5cm处)的茎粗(cm),重复测量3次取均值。

(2)生物量积累:总干质量:处理120d时,将植株按器官(叶片、侧生分梢、中心干、中间砧、基砧、根)分离,105℃杀青30min后75℃烘干至恒重,称量各器官干质量(g),累加计算单株总干质量。

相对生长速率(RGR):基于总干质量变化,按公式计算:

$$RGR = \frac{\ln W_2 - \ln W_1}{t_2 - t_1}$$

其中, W_1 和 W_2 分别为处理0d和120d的总干质量(kg),

$$t_2 - t_1 = 120d。$$

(3)数据处理:所有数据均以5次生物学重复的均值+标准偏差表示,采用SPSS 26.0进行单因素方差分析(ANOVA),差异显著性通过Duncan's新复极差法检验(P<0.05)。

1.3.2 生理参数

(1)光合生理指标。叶绿素含量:在处理120d时,选取植株中部功能叶(第4~6节位完全展开叶),采用95%乙醇-丙酮混合液(体积比2:1)避光浸提法提取叶绿素。使用紫外可见分光光度计(UV-1800,日本岛津)测定645nm和663nm处吸光度,按Arnon公式计算叶绿素a、叶绿素b及总叶绿素含量(mg/gFW): $Chl\ a = 12.71A_{663} - 2.59A_{645}$, $Chl\ b = 22.88A_{645} - 4.67A_{663}$, 总叶绿素 = $Chl\ a + Chl\ b$ $Chl\ a = 12.71A_{663} - 2.59A_{645}$, $Chl\ b = 22.88A_{645} - 4.67A_{663}$, 总叶绿素 = $Chl\ a + Chl\ b$

净光合速率(Pn):于处理30、60、90、120d的9:00~11:00,使用便携式光合仪(LI-6400XT,美国LI-COR)测定功能叶(同叶绿素取样位点)的净光合速率($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。设定光强为1200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, CO₂浓度为400 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,叶室温度为25℃,每处理重复测定5片叶。

(2)氮素代谢相关参数:器官氮素质量分数:将烘干后的器官样品(叶片、侧生分梢、中心干、中间砧、基砧、根)粉碎过60目筛,采用凯氏定氮法(GB 5009.5-2016)测定全氮含量(g/kgDW)。

氮素吸收量:按公式计算单株各器官氮素吸收量($\mu\text{g}/(\text{株} \cdot \text{d})$):

$$\text{吸收量} = \frac{\text{器官干质量} \times \text{氮素质量分数}}{\text{处理天数}}$$

氮素转移量与分配量:

转移量:通过同位素示踪法(¹⁵N标记尿素)测定氮素从根系向地上部的转移效率,计算单位时间内各器官的¹⁵N丰度增量($\mu\text{g}/(\text{株} \cdot \text{d})$)。

分配量:基于全株氮素吸收总量,按器官干质量比例计算各器官氮素分配量(mg/株)。

(3)数据处理:光合与氮素代谢数据均以均值±标准偏差表

示,采用SPSS 26.0进行双因素方差分析(氮素形态×浓度),主效应及交互作用显著性通过Tukey检验($P<0.05$)。主成分分析(PCA)通过SIMCA 14.1软件实现,以标准化后的生理参数(叶绿素、Pn、氮素吸收/分配量)构建综合评价模型。

1.4 数据分析

数据用SPSS 20.0 软件进行单因素方差分析,多重比较选用Tukey's检验,采用Microsoft Excel软件制图表。

2 结果与分析

2.1 不同形态氮素对苹果幼树生长的影响

不同施氮水平对幼龄苹果幼树的侧枝生长有明显的时效效应。在同样的供氮量水平下,经90 d后,硝态氮和铵态氮的各组间的侧枝长无显著差异;但随着实验时间的延长,至120天后,两组间的差异有统计学意义($P<0.01$)。其中,硝态氮处理的侧枝长平均为29.83厘米,比铵氮处理提高了25.71%。在30天的观察期内,施氮水平对侧枝的影响达到了明显的效果,尤其是高施氮处理的侧枝长势比对照提高了42.3%,说明施氮对侧枝的促生作用存在浓度依赖关系。结果表明,氮形态与营养因子之间存在着相互影响,在90-120d时期,硝态氮处理表现出了显著的生长优势,比铵N处理高37.8%,表明氮对营养元素的调控具有阶段性特点。

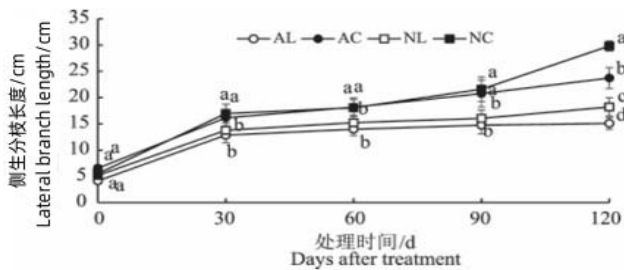


图1 不同形态氮素对苹果幼树侧生分枝长度的影响
同一时间不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$),下同

图2的结果表明,施氮、施氮、施氮浓度对幼树中心树干的生长均有明显的调节作用。结果表明,在不同的施肥条件下,苗木中心茎的伸长表现出一定的规律,即:高硝态>高铵态>低铵态>低硝态。结果表明,两种氮形态对林木生长的促生作用没有明显的差异。

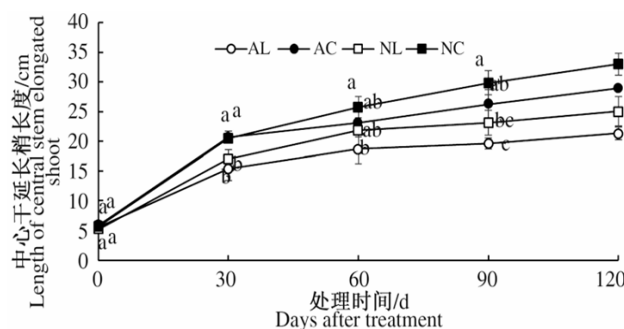


图2 不同形态氮素对苹果幼树中心干延长梢长度的影响

生长动态的监测显示,经过60d的处理,硝态氮处理的枝条伸长率明显高于其他处理($P<0.05$)。在观察120天后,所有处理的树干伸长量依次是:高、中、低、中、高、中、下三个处理。这一扩展程度的不同直接造成了果树株高的明显分化,暗示着氮的形态和浓度对幼树的垂直生长起着重要的调控作用。

图3茎粗的动态分析显示,施氮水平对苹果苗的生长有明显的促进作用。在连续120 d的连续栽培条件下,高氮素组的茎粗明显高于其他两组($P<0.05$);结果表明,缺氮胁迫下,茎秆生长受缺氮影响较大,但各观察节点均有较大幅度的降低,降低9.01%,4.35%,3.97%。方差分析表明,在30~90 d生育期,低氮、低氮和高硝三种处理之间的茎粗增长无显著性差异($P>0.05$),说明这一时期的茎粗增长更多地受到氮的调节。

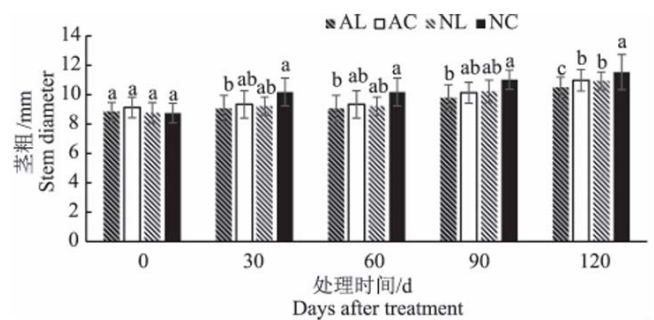


图3 不同形态氮素对苹果幼树茎粗生长的影响

表1中的生物量累积分析显示,施用硝态氮对苹果幼苗的物质产量有很大的促进作用。结果表明,经过120天的施用,各施氮处理的植物生物量和相对生长率都明显高于其他施氮组合($P<0.05$)。在同一施氮量条件下,铵氮处理对植株的生长具有显著的抑制作用,其生物量和相对生长速率分别为5.83%和9.32%。我们前期研究发现,不同类型的植物对N形态的反应有明显的差异:在实验中,氮浓度的改变使植株的生物量降低4.05%,而相对生长速率降低9.45%,暗示着植物和单子叶植物之间的氮吸收机理可能存在着差异。

表1 不同形态氮素处理120d苹果幼树的总干质量和 相对生长速率

处理	总干质量 / g	相对生长速率 / [g / (kg · d)]
AL	125.78±1.21d	4.02±0.18d
AC	138.23±0.73b	4.87±0.05b
NL	151.64±0.89c	5.13±0.06c
NC	169.85±4.12a	5.89±0.07a

注:表格中数据格式为平均值±标准偏差,同列不同小写字母表示在0.05水平上差异显著,下同。

2.2 不同形态氮素对苹果幼树叶绿素含量及净光合速率的影响

2.2.1 对叶绿素含量的影响

表2中的色素测定结果表明,不同的氮元素在不同的营养条件下,对小苗的叶绿素含量有明显的调节作用。通过对叶绿素a、叶绿素b和叶绿素含量的精确测量,发现各处理之间存在着一定的规律,即:高硝态>高铵态>低铵态>低状态。特别是在高硝酸盐水平下,叶绿素a、叶绿素b和总叶绿素的增幅分别提高了41.04%、9.42%和26.42%。方差分析结果显示,硝态氮处理对叶绿素含量的影响明显高于铵态氮($P<0.05$),而高硝态氮处理对叶绿素合成的促进效果最为明显,说明硝态氮是影响叶绿素合成的主要因素。

表2 不同形态氮素处理120d苹果幼树的叶绿素含量mg/g

处理	叶 绿 素 a 含 量	叶 绿 素 b 含 量	总 叶 绿 素 含 量
AL	1.18±0.03d	0.45±0.02d	1.63±0.04d
AC	1.55±0.05b	0.59±0.02b	2.15±0.07b
NL	1.37±0.04c	0.51±0.01c	1.88±0.06c
NC	1.82±0.07a	0.71±0.02a	2.53±0.08a

2.2.2对净光合速率的影响

图4光合动力学分析显示,不同施氮水平对幼龄苹果树的净光合速率(Pn)有明显的调节作用。在整个观察期,硝态氮处理的净光合速率均比其他处理高($P<0.05$);研究还发现,在90天的观察节点上,低浓度铵态氮处理的Pn明显比其他三个处理低($P<0.05$),表现出不同形态和浓度的协同制约。

对120d的平均Pn进行了统计分析,结果表明,各处理之间存在着一一定的规律,即高氮>高氮>低氮>低氮。在相同氮素水平下,硝态氮处理的Pn增加幅度分别为21.98%~26.87%,且高浓度组的Pn增加幅度为26.87%,低于低浓度组的21.98%,说明硝酸盐对光合速率的提高存在浓度依赖关系。

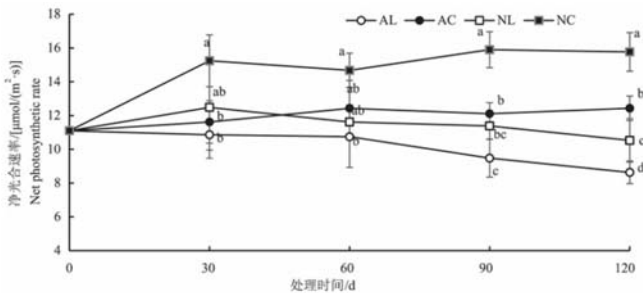


图4 不同形态氮素对苹果幼树净光合速率的影响

2.3不同形态氮素对苹果幼树各器官氮素质量分数及氮吸收量的影响

2.3.1对氮素质量分数的影响

表3中的氮分布分析表明,铵态氮和硝态氮在苹果树幼苗各器官中的累积和形态均存在着明显的差异。其中,铵态氮明显提高了烟株的全氮(比硝酸盐提高24.48%,但对烟株的总体生长却有一定的抑制作用,表现为侧枝数目、砧木直径、根生物量的降

低幅度分别为20.69%、31.54%和28.97%。结果表明,硝态氮对烟株的生长影响不大,仅为21.96%,而对侧枝数、砧木粗度、根量分别提高27.37%、16.67%和12.60%。这一结果暗示,铵态氮可能通过提高植物的氮代谢能力,从而抑制植物体内碳水化合物的向下转运,从而对地下部分的生长产生影响。硝态氮对提高光合产物在根部的分配效率、维持较平衡的冠根比例具有重要作用。表3 不同形态氮素处理120d苹果幼树各器官(部分)的氮素质量

分数g/kg

处理	叶片	侧生分梢	中心干	中间砧	基砧	根
AL	4.87±0.52d	3.01±0.13d	3.52±0.33b	2.03±0.17c	2.38±0.21b	3.18±0.58c
AC	8.24±0.38b	5.43±0.63b	4.31±0.59b	2.81±0.41ab	4.23±0.57a	4.99±0.91b
NL	6.38±0.49c	4.29±0.26c	3.91±0.65b	2.49±0.27bc	2.69±0.42b	3.55±0.51bc
NC	11.06±0.43a	6.91±0.34a	6.28±0.89a	3.28±0.23a	5.09±0.48a	7.12±0.75a

2.3.2对氮素吸收量的影响

表4中氮素分布模式的分析结果显示,不同形态的N素对幼龄苹果树各器官N素的吸收均有明显的调节作用。结果表明,在不同的施肥条件下,根系对氮的吸收能力最强,而侧生苗对氮的吸收最弱。不同的形态分布格局存在着不同的形态特征:硝酸盐处理下,各器官对N的吸收表现为根系>叶>茎>茎>基部嫁接面>侧枝;在铵态氮条件下,根系>叶>砧木>主干>基部嫁接口>侧枝分布特点;不同形态氮在相同组织中的分布有很大差别($P<0.05$),其中以根系为最大(硝化作用38.2±2.1%,铵态氮为34.5±1.8%)次之,砧木(15.3±1.0%,铵态氮17.4±0.9%)次之,砧木(15.3±1.0%,铵态氮为17.4±0.9%)。

不同形态氮对总吸收量的影响比较明显,硝酸盐处理比铵态氮处理提高34.35%~63.70%,不施氮处理提高了63.70%,而在低氮水平下提高了34.35%。同时,我们还发现,硝态氮处理后,各器官对氮的吸收率均显著高于铵态氮,这进一步证实了硝态氮在提高作物氮利用效率方面的优势。

表4 不同形态氮素处理120d苹果幼树各器官(部分)的氮素吸收量 μg/(株·d)

处理	叶片	侧生分梢	中心干	中间砧	基砧	根	全株
AL	175.63±8.64d	34.15±1.32d	312.84±28.73c	301.89±17.86d	118.75±7.11c	791.39±16.14d	1723.14±45.87d
AC	512.89±17.12b	184.37±13.54b	438.15±14.69b	486.32±45.92b	229.12±13.37b	1562.34±49.35b	3298.76±240.12b
NL	317.34±22.58c	80.14±10.83c	456.98±34.28b	392.15±35.89c	143.23±11.56c	971.87±33.54c	2351.63±82.45c
NC	803.47±18.45a	285.12±15.98a	746.23±20.25a	572.09±30.78a	363.41±27.62a	2532.18±98.34a	5412.65±257.89a

2.4不同形态氮素对苹果幼树各器官氮素转移量 及分配量的影响

2.4.1对氮素转移量的影响

表5中的氮转移分析结果显示,不同形态的氮在苹果幼树的各个器官中的再分布均有很大的差异。硝态氮处理能明显提高植株体内N素的运输效率,叶片、侧枝、主干、砧木和根系的氮运输率比铵态氮提高43.42%,38.33%,49.46%,52.88%和44.71%。研究发现,叶片氮运输对氮供应的响应明显,在低氮处理下,植物总氮运输效率降低了99.53%,尤其是根降低了30.07%;虽然高N处理总体上降低幅度不大(70.28%),但是对砧穗的影响也有54.42%。

铵态氮处理对植株的运输具有明显的影响,其中以砧木为中心,氮在砧木上的分配比硝酸处理减少49.46%~52.88%,而根运输效率则比低氮处理下降44.71%。这一差别说明,硝态氮不但提高了土壤氮的总体运输能力,而且也可以有效地减轻土壤中氮在土壤中的分布。

表5 不同形态氮素处理120d苹果幼树各器官(部分)的氮素转移量 $\mu\text{g}/(\text{株}\cdot\text{d})$

处理	叶片	侧生分梢	中心干	中间砧	基砧	根
AL	0.04±	1.12±	6.53±	2.42±	1.01±	10.31±
	0.00d	0.01d	0.07d	0.03d	0.01d	0.12d
AC	11.47±	6.25±	9.76±	7.87±	4.47±	34.78±
	0.21b	0.11b	1.06b	0.14b	0.08b	0.63b
NL	5.99±	3.75±	8.27±	5.34±	1.44±	14.15±
	0.11c	0.07c	0.16c	0.10c	0.03c	0.27c
NC	20.31±0.	10.14±	19.33±	9.01±	9.48±	63.04±
	47a	0.24a	0.44a	0.21a	0.22a	1.44a

2.4.2对氮素分配量的影响

表6 不同形态氮素处理120d苹果幼树各器官(部分)的氮素分配量 $\text{mg}/\text{株}$

处理	叶片	侧生分梢	中心干	中间砧	基砧	根	全株
AL	40.89±	8.45±	66.63±	68.15±	27.83±	185.32±	402.17±
	1.99d	1.62d	3.07c	5.96c	1.66c	3.77c	10.71d
AC	97.14±	33.78±	86.16±	95.47±	44.85±	306.83±	667.94±
	7.65b	5.95b	2.91b	9.03a	2.63b	9.74b	12.04b
NL	69.13±	20.93±	75.01±	82.12±	29.91±	203.34±	491.47±
	7.56c	9.30c	11.05bc	7.52b	2.43c	7.04c	17.29c
NC	143.12±	54.02±	133.37±	101.84±	70.38±	452.15±	962.58±
	3.30a	4.98a	3.63a	8.15a	8.83a	17.56a	46.02a

表6中氮素分布模式的分析结果显示,不同形态的N素对苹果树幼苗各器官中N的分布有着明显的调节作用。硝态对照处理

下各器官分配量表现为根>叶片>中心干>中间砧>基砧>侧生分梢;铵态对照处理下各器官分配量表现为根>叶片>中间砧>中心干>基砧>侧生分梢;硝态低氮和铵态低氮处理下各器官分配量表现相同:根>中间砧>中心干>叶片>基砧>侧生分梢。结果表明,不同氮形态对各器官分布的作用有明显的不同($P<0.05$):硝态氮显著提高了植株的叶片(增加68.45%)和侧枝(增加了145.75%),而铵氮(增加了56.97%)对砧木部位的N积累有明显的促进作用。

3 总结

本研究证实硝态氮显著促进矮砧苹果幼树生长及氮素利用,其侧生分梢长度、茎粗、总干质量及光合效率均优于铵态氮处理。常规浓度硝态氮通过提升叶绿素含量和净光合速率,驱动氮素向根、叶片高效分配,全株吸收量达 $5726.47\mu\text{g}/(\text{株}\cdot\text{d})$ 。低浓度铵态氮则导致氮素转移效率降低99.53%。主成分分析表明,硝态氮通过协同优化光合与氮分配,实现高产低耗。建议生产中优先选择硝态氮源并结合常规浓度施用,以兼顾生态与经济效益。

[项目]

杨凌职业技术学院2022年科技创新项目,项目名称“不同氮素浓度条件下矮砧苹果的产量品质主成分分析研究”(编号:ZK22-11)。

[参考文献]

[1]时怡,梁博文,胡俊峰,等.不同形态及浓度氮素对矮砧红富士苹果幼树生长和氮素吸收、运转的影响[J].河南农业科学,2020,49(9):112-119.

[2]张晓倩.滴灌条件下不同氮、钾施肥处理对红富士苹果树体生长、产量和果实品质的影响[D].河北农业大学,2017.

[3]刘加芬,李慧峰,余贤美.泰沂山区苹果园自然生草优势草种类及养分特征[J].山东农业科学,2017,49(7):5.

[4]张人天,马娟娟,孙瑞峰,等.蓄水坑灌下苹果树根系生长对不同氮素水平的响应[J].节水灌溉,2019(5):6.

[5]赵泽艺.新疆矮砧密植苹果园水氮状况的光谱特征与反演模型[D].塔里木大学,2023.

[6]郑朝霞.矮化自根砧红富士苹果幼树对氮素的吸收、分配及利用[D].西北农林科技大学[2025-04-01].

[7]袁睿龙.河北矮砧密植苹果园水肥优化技术研究[D].河北农业大学,2020.

[8]时怡,梁博文,胡俊峰,等.不同形态及浓度氮素对矮砧红富士苹果幼树生长和氮素吸收、运转的影响[J].河南农业科学,2020,49(9):8.

作者简介:

乔源(1990—),男,汉族,陕西咸阳人,讲师,硕士研究生,研究方向:农业水利工程和优化氮肥施用技术。