植物营养与肥料学报 2015,21(4): 1088 - 1094 doi: 10.11674/zwyf.2015.0430
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http://www.plantnutrifert.org

不同氮水平下不同中间砧苹果幼树的生长及氮吸收、利用、分配特性

李 晶[1,2], 姜远茂[1*], 魏 靖[2], 崔艳秋[2], 魏绍冲[1], 任怡华[1],
彭 玲[1], 季萌萌[1], 徐海港[1]

(1 山东农业大学园艺科学与工程学院,国家苹果工程技术研究中心,山东泰安 271018;
2 山东省济宁市蔬菜工作指导站,山东济宁 272019)

摘要:【目的】苹果矮砧密植栽培是苹果产业发展的方向,目前我国矮化苹果栽培仍套用乔砧苹果管理技术,偏施氮肥,施肥不足和超量并存,易造成矮砧苹果树体早衰或过旺生长。因此急需研究不同类型中间砧苹果在不同施氮量下树体生长及氮素吸收、利用、分配规律,为苹果矮化中间砧高产高效栽培配套技术提供理论依据。**【方法】**采用盆栽方法,以 1 年生宫藤富士不同中间砧(SH_{28}、SH_{38}、CG_{24})幼树为试材,利用稳定性同位素^{15}N 标记技术研究了不施氮肥(N_0)、适宜施氮肥(N_{100})和过量施氮肥(N_{200})三个氮素水平下幼树的生长差异及氮吸收、利用和分配特性。**【结果】**不同类型中间砧幼树在不同施氮水平下树体生物量和氮利用率差异显著,在不施氮肥(N_0)、适宜施氮肥(N_{100})和过量施氮肥(N_{200})三个氮素水平下,矮化效果最弱的 SH_{28} 中间砧幼树在高量氮时,树体生物量和^{15}N 利用率显著增加;矮化效果明显的 SH_{38} 和 CG_{24} 中间砧幼树在适宜供氮条件下生物量和^{15}N 利用率最大,高氮素供应反而不利于树体生长和^{15}N 利用率的提高。在不同供氮水平下,^{15}N 在不同类型中间砧各部位的分配差异显著。SH_{28} 中间砧在高氮量供应时,^{15}N 更多分配到地上部;CG_{24} 在不施氮肥和适宜施氮条件下更多^{15}N 分配到地上部,高量施氮条件下更多分配到根系;SH_{38} 在适宜施氮条件下^{15}N 较多地分配到根系,不施氮和高量施氮条件下更多的分配到地上部。**【结论】**中间砧品种、施氮水平及其交互作用均对树体生长和^{15}N 利用产生显著影响,其影响显著程度由高到低分别为:中间砧品种 > 施氮水平 > 施氮水平和中间砧品种的交互作用。施氮水平和中间砧品种的交互作用对根冠比和氮分配的影响较施氮水平和中间砧品种更为显著。随着中间砧矮化程度的增强,氮对树体生长的促进作用减小,树体对氮的响应度和响应速率也相应减弱。

关键词: 苹果; 中间砧; 生长; 氮; 吸收; 利用; 分配
中图分类号: S661.1.06 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)04-1088-07

Effects of different N rates on growth and absorption, allocation and utilization of urea-^{15}N of young apple trees with different interstocks

LI Jing[1,2], JIANG Yuan-mao[1*], WEI Jing[2], CUI Yan-qiu[2], WEI Shao-chong[1], REN Yi-hua[1],
PENG Ling[1], JI Meng-meng[1], XU Hai-gang[1]

(*1 College of Horticulture Science and Engineering of Shandong Agricultural University/National Engineering Researh Center for Apple, Tai'an, Shandong 271018, China; 2 Vegetable Workstation of Jining, Jining, Shandong 272019, China*)

Abstract:【Objectives】 Efficient and intensive dwarf and dense planting are the popular trend of apple industry, however, the matching fertilization technology specific for different stocks and scions with different growth characteristics is absent in China. In efficient or over fertilization of nitrogen often leads to premature senescence and excessive vegetative growth, stunting the extension of the dwarf and dense planting tachnology. So there is urgent need to identify the relationship between the apple tree growth and the absorption, allocation and utilization

收稿日期: 2014-03-24 **接受日期:** 2014-10-16 **网络出版日期:** 2015-04-21
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: 李晶(1983—),女,山东济宁人,博士,主要从事果树营养生理研究。E-mail: heavenlyking1010@163.com
* 通信作者 Tel: 0538-8249778, E-mail:ymjiang@sdau.edu.cn

of nitrogen. 【**Methods**】 Pot experiment was carried out and one-year old interstock apple trees, *M. hupehensis* Rehd. (Gongteng Fuji/SH_{28}, Gongteng Fuji/SH_{38} and Gongteng Fuji/CG_{24}) were used as materials. Three levels of ^{15}N stable isotopes: no nitrogen(N_0), proper nitrogen(N_{100}) and over-dose nitrogen(N_{200}), were designed to test the growth and absorption, allocation and utilization of the stocks. 【**Results**】 There were significant differences in biomass and ^{15}N utilization rates of young apple trees among the N treatments. The highest biomass and ^{15}N utilization were obtained in the over-N input level(N_{200}) for SH_{28}, which are less dwarfed, those were in proper N treatment(N_{100}) for SH_{38} and CG_{24}, which are fully dwarfed, and the negative effect in over-dose nitrogen treatment. Significant differences of ^{15}N distribution could be seen among different types of interstocks of apple trees under different N treatments. For less dwarfed SH_{28}, the ^{15}N was partitioned more to the aboveground part in over-N input treatment, for fully dwarfed SH_{38}, more ^{15}N was partitioned to aboveground part in no N and proper N input levels, and more to the roots in over N input treatment. For CG_{24}, more ^{15}N was partitioned to roots in the proper N treatment, which is significantly higher than in no N and over N treatments. 【**Conclusions**】 All the interstock morphology, N input levels and their interaction significantly affects the growth and ^{15}N utilization of young apple trees. The effect degrees are found in order of interstock morphology > N application level > interaction of the two factors. The effects of interaction of interstock varieties and N levels on the root-shoot ratio and ^{15}N distribution are significantly higher than those of interstock varieties and N application levels. With the increase of the dwarfing potential, the promoting effect to the growth, the response rate and time of nitrogen are all decreased.

Key words: apple tree; interstock; growth; nitrogen; absorption; utilization; distribution

我国苹果的栽培面积、产量均居世界首位[1,2]。随着对苹果矮化密植集约化栽培可以早果丰产,能从有限的土地上获得高产量和高品质果实[3],便于机械化管理[4],苹果矮化密植集约化栽培的的重要性日益显现,已成为我国现代苹果产业发展的方向。我国65%的果树种植在丘陵薄地,土壤有机质普遍较低,短期内全面提高较困难[5-6],成为精品果生产的限制因素[7]。矮化中间砧是我国矮砧苹果密植栽培的主要利用方式之一,目前有关矮化中间砧苹果栽培技术研究滞后于生产,水肥管理技术仍多套用乔砧苹果管理技术,造成中间砧苹果过旺生长与早衰现象共存[8]。我国苹果正处于大规模更新换代的关键时期,在新建果园推广苹果矮砧集约高效栽培技术模式,可逐步实现我国矮砧苹果的高效标准化生产,改变我国苹果产业单产低、果品总体产量较差的现状[2]。因此生产上急需通过研究不同中间砧苹果在不同施氮量下树体生长及氮素吸收、利用、分配规律以明确不同中间砧苹果的氮营养特性,为苹果矮化中间砧高产高效栽培配套技术提供理论依据。

1　试验材料与方法

1.1　试材与处理

试验于2011年在山东农业大学园艺实验站完成。供试土壤为黏质壤土,有机质10.13 g/kg、碱解氮76.63 mg/kg、速效磷27.28 mg/kg、速效钾184.99 mg/kg、硝态氮37.95 mg/kg、铵态氮16.17 mg/kg、pH 6.7。试材为1年生的宫藤富士中间砧幼树(*M. hupehensis* Rehd.),矮化中间砧为SH_{28}、SH_{38}、CG_{24},基砧为平邑甜茶,中间砧长度为20 cm,每砧穗组合选取9株生长势一致、无病虫害的植株,设置施氮水平分别为0、100和200 kg/hm^2(以下简称N_0,N_{100},N_{200}),以46%尿素为氮源,于2011年6月1日每品种设置3个处理,各处理均取3株,单株重复,重复3次。每株各施入1 g^{15}N-尿素(上海化工研究院生产,丰度10.22%)。施肥后立即浇水,进行常规管理,各处理生长条件和其他栽培管理保持一致。于2011年9月8日破坏性采样。各处理均取3株,单株重复,重复3次。

1.2　计算及统计方法

^{15}N计算公式:

Ndff% = [样品中的^{15}N丰度% - 自然丰度(0.365%)]/[肥料中^{15}N的丰度% - 自然丰度(0.365%)] × 100;

总氮量(g) = 干物重(g) × N%;

^{15}N吸收量(mg) = 总氮量(g) × Ndff% × 1000;

氮肥分配率(%) = 各器官从^{15}N吸收氮量(mg)/^{15}N总吸收氮量(mg) × 100;

氮肥利用率(%) = ^{15}N吸收量(g)/施氮量(g) × 100;

所有数据均采用DPS7.05软件进行单因素方

差法分析，LSD 法进行差异显著性比较，应用 Microsoft Excel 2003 进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 施氮水平对不同中间砧苹果幼树生长的影响

中间砧品种和施氮水平对树体生长均存在显著影响（表1）。不施氮肥 N_0 条件下，SH_{28} 中间砧树体生物量是 CG_{24} 的 138.60%；氮供应适宜的 N_{100} 条件下，SH_{28} 中间砧树体生物量是 CG_{24} 的 163.20%；高氮 N_{200} 条件下，SH_{28} 中间砧树体生物量是 CG_{24} 的 235.96%，表明中间砧品种对树体生长影响显著。不同氮水平下不同中间砧幼树生物量均表现为 SH28 > SH38 > CG24，表明中间砧矮化效果由强到弱分别为：CG24 > SH38 > SH28。从 N0 到 N100，SH28 中间砧树体生物量升高至其 N0 处理的 149.16%；从 N100 到 N200，SH28 中间砧树体生物量继续增高至其 N100 处理生物量的 134.96%，表明施氮水平对不同中间砧树体生长的影响存在显著差异。除 SH_{28} 中间砧幼树随着施氮量增加树体生物量显著增加，SH_{38} 和 CG_{24} 苹果幼树均表现为在适宜供氮条件下生物量最大，继续增加氮素供应反而不利于生长，表明单纯通过增加氮肥用量不能促进矮化效果较强中间砧苹果的生长，适宜氮条件下才能促进生长。

表1 不同施氮水平树体的生物量（g，FW）

Table 1 Biomass of dwarfed interstock combination trees under different N application levels

氮素水平 N rate	树体鲜重 Fresh weight（g）		
	SH_{28}	SH_{38}	CG_{24}
N_0	137.71 ± 6.78 aC	131.02 ± 2.33 aB	99.36 ± 6.11 bB
N_{100}	204.41 ± 8.71 aB	182.41 ± 6.10 bA	125.25 ± 4.46 cA
N_{200}	277.23 ± 15.09 aA	184.25 ± 6.89 bA	130.49 ± 6.72 cA

注（Note）：$n=3$. 不同小、大写字母表示品种间、同一品种不同氮水平间差异达 5% 显著水平 Different small letters mean significant difference among cultivars, capital letters mean significant difference among different N rates at the 5% level.

2.2 施氮水平对不同中间砧苹果幼树根系生长和根冠比的影响

表2表明，不施氮肥（N_0）条件下，SH_{28} 中间砧树体生物量与 SH_{38} 无显著差异，但 SH_{28} 中间砧树体的根系生物量为 SH_{38} 中间砧树体的 121.06%，根冠比为 SH_{38} 中间砧树体的 123.81%，表明在低氮条件下 SH_{28} 对根系生长的促进作用较 SH_{38} 更为显著。CG_{24} 较低的根系鲜重和根冠比表明低氮条件下 CG_{24} 树体根系的生长相对于 SH_{28} 和 SH_{38} 较弱。从 N_0 到 N_{100}，SH_{28} 中间砧树体根冠比降低至其 N_0 处理的 80.77%，但根系生物量显著升高至 N_0 处理的 128.83%，表明 N_{100} 处理对地上部生长的促进作用较根系更为显著；SH_{38} 中间砧树体根系生物量升高至其 N_0 处理的 160.44%，根冠比升高至其 N_0 处理的 123.81%，表明 N_{100} 条件下对其根系生长的促进作用较地上部更为显著。从 N_{100} 到 N_{200}，SH_{28} 和 SH_{38} 中间砧树体均表现为根冠比显著降低，表明 N_{200} 高氮条件下对地上部生长的促进作用较根系更为显著；而 CG_{24} 对根系生长的促进作用较地上部更为显著。

表2 不同氮水平中间砧树体根系生长和根冠比

Table 2 Root growth and root shoot ratio of dwarfed interstocks under different N application levels

中间砧类型 Interstock type	根系生物量 Fresh root weight（g，FW）			根冠比 Root shoot ratio		
	N_0	N_{100}	N_{200}	N_0	N_{100}	N_{200}
SH_{28}	71.19 ± 5.19 cA	88.16 ± 2.38 bA	100.77 ± 1.73 aA	0.52 ± 0.02 aA	0.42 ± 0.01 bB	0.37 ± 0.02 cB
SH_{38}	58.81 ± 3.73 bB	94.36 ± 3.45 aA	63.17 ± 4.70 bB	0.42 ± 0.06 bB	0.52 ± 0.01 aA	0.34 ± 0.02 cB
CG_{24}	41.24 ± 2.97 bC	54.74 ± 3.39 aB	57.60 ± 2.16 aB	0.41 ± 0.01 abB	0.38 ± 0.04 bB	0.44 ± 0.01 aA

注（Note）：$n=3$. 不同小、大写字母表示品种间、同一品种不同氮水平间差异达 5% 显著水平 Different small letters mean significant difference among cultivars, capital letters mean significant difference among different N rates at the 5% level.

2.3　施氮水平对不同中间砧苹果幼树^{15}N 利用率的影响

巨晓棠等[9]和钟茜等[10]对一年生作物的研究结果表明氮肥利用率随着氮肥施用量的增加而降低,本次试验结果与其差异显著。图 1 表明,不同中间砧幼树 N_{100}处理^{15}N 利用率均高于 N_0 处理,SH_{28}中间砧树体^{15}N 利用率随施氮水平的增加而升高,CG_{24}和 SH_{38}处理在 N_{200}高氮水平利用率最低,对矮

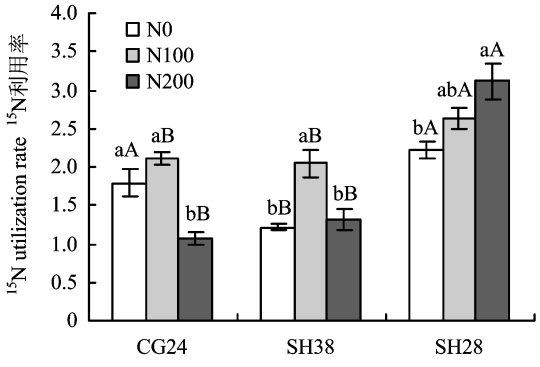

图 1　施氮水平对不同矮化中间砧^{15}N 利用率的影响

Fig. 1　Effects of N application levels on^{15}N utilization rate of different dwarfed interstocks

[注(Note): n =3. 不同小、大写字母表示品种间、同一品种不同氮水平间差异达5% 显著水平 Different small letters mean significant difference among cultivars, capital letters mean significant difference among different N rates at the 5% level.]

化效果最弱的 SH_{28}树体在不同施氮水平^{15}N 利用率均显著高于 CG_{24}和 SH_{38}。

2.4　施氮水平对不同中间砧苹果幼树^{15}N 分配率的影响

表 3 表明,不同氮水平下不同中间砧树体的氮素营养在各器官分配规律差异显著,且主要体现在地上部和根系上。从 N_0 到 N_{100}处理,SH_{28}中间砧树体地上部^{15}N 分配率显著升高,根系^{15}N 分配率显著降低,与前人研究认为低氮胁迫条件下植株会将更大比例的同化氮分配到根部[12],促进根系生长以增加氮吸收量促进树体生长,施加氮肥或土壤速效氮含量高时植物根/茎比下降[13-14]的研究结果一致。SH_{38}幼树 N_{100}处理地上部^{15}N 分配率显著降低,根系^{15}N 分配率显著增高,这与前人研究认为氮胁迫条件下,树木根/茎比增加[15]的结论相反,但与 Agren 等[14]和 Aphalo 等[16]的研究结果一致。从 N_{100}到 N_{200},CG_{24}幼树根系^{15}N 分配率显著升高,地上部^{15}N 分配率显著降低,表明高氮水平下其对其根系生长的促进作用增强,更多的氮素营养分配根系;SH_{38}和 SH_{28}幼树随着施氮水平的升高,对地上部生长促进作用的逐渐增强,更多的氮素营养运输至地上部用于叶片和新梢生长,根系^{15}N 分配率显著降低,地上部^{15}N 分配率显著提高,与吴楚等[13]和 Gower 等[15]的研究结论一致。

表 3　施氮水平对不同中间砧树体各器官^{15}N 分配率的影响(%)

Table 3　Effects of different N rates on ratio of ^{15}N – urea partition of different organs

中间砧 Interstock	氮素水平 N rate	地上部 Shoot	中间砧 Interstock	根系 Root
CG_{24}	N_0	62.77 ± 1.74 aB	14.94 ± 0.78 aA	22.29 ± 0.98 bB
	N_{100}	61.90 ± 1.53 aA	15.62 ± 0.74 aA	22.48 ± 1.16 bB
	N_{200}	52.02 ± 2.18 bB	17.16 ± 2.32 aA	30.82 ± 1.51 aA
SH_{28}	N_0	50.02 ± 2.14 cC	10.45 ± 0.82 aB	39.53 ± 2.60 aA
	N_{100}	63.25 ± 1.14 bA	9.01 ± 0.24 aB	27.74 ± 0.96 bA
	N_{200}	72.16 ± 2.98 aA	8.04 ± 1.04 aB	19.80 ± 2.44 cB
SH_{38}	N_0	72.81 ± 3.21 aA	7.30 ± 0.95 aC	19.89 ± 2.26 bB
	N_{100}	61.44 ± 0.61 bA	7.71 ± 0.60 aB	30.85 ± 0.64 aA
	N_{200}	77.96 ± 0.66 aA	7.11 ± 0.83 aB	14.93 ± 1.49 bB

注(Note): n =3. 不同大、小写字母表示品种间、同一品种不同氮水平间差异达 5% 显著水平 Different capital letters mean significant difference among cultivars, small letters mean significant difference among different N rates at the 5% level.

3　讨论

中间砧幼树生长受多因素影响,进行施氮水平和中间砧品种双因素方差分析(表 4),比较 F 值大小可知中间砧品种对树体生长和^{15}N 利用率的影响最显著,其次为施氮水平,施氮水平和中间砧品种的

表 4 施氮水平和中间砧品种对树体生长和氮利用、分配影响的双因素方差值

Table 4 Two-factor analysis on the variance of growth and absorption, allocation and utilization of nitrogen affected by nitrogen levels and interstocks

项目 Item	树体生物量 Tree biomass	根冠比 Root to shoot	^{15}N 利用率 ^{15}N use efficiency	地上部^{15}N 分配率 Shoot^{15}N distribution	根系^{15}N 分配率 Root^{15}N distribution
中间砧 Interstock	247.08**	9.53	56.23*	16.81	10.60
施氮水平 N level	179.96**	8.16	11.43	9.30	11.96
施氮水平×中间砧品种 N×Interstock	36.61*	33.85*	11.41	26.99*	31.37*

注(Note)：** 表示相关性达 0.01 极显著水平 Significance at 0.01 level；* 表示相关性达 0.05 显著水平 Significance at 0.05 level.

交互作用对树体生长的影响最小,对根冠比和^{15}N 分配的影响较施氮水平和中间砧品种更为显著。

中间砧致矮机理研究认为,矮化中间砧茎皮中 IAA 转运蛋白 *pin*1 基因表达量显著降低,可能造成 IAA 转运蛋白载体含量减少,IAA 运输能力下降,IAA 在中间砧段茎皮中降解,运输至根系的 IAA 量减少,在限制根系生长,降低根系中的 *IPT*3 基因表达和细胞分裂素合成能力,导致运输到地上部的 CTK 量减少[17-18],减弱地上部生长的同时也会降低细根活力和生长,影响氮素的吸收、利用,即中间砧品种对树体生物量和^{15}N 利用率均存在显著影响的主要原因。氮素信号促进生长的途径和植物激素之间的互作研究发现,促进生长的氮素(硝酸盐)信号中的非特异性信号是由细胞分裂素介导[19],硝酸盐通过快速诱导根中细胞分裂素合成酶基因 *IPT*3 的表达,促进细胞分裂素合成[20],并经木质部导管向地上部转导[19]。根际/根内氮状况信号以及地上部植株氮营养状况信号是通过细胞分裂素途径和生长素信号途径传导,二者互相作用进而控制根的发育与氮吸收系统[21]。因此,施氮和中间砧对树体生长的影响均是通过改变在地上部及根系间细胞分裂素途径和生长素信号途径传导的互相作用而实现,氮肥施用后产生的调节作物生长的氮素信号随着中间砧致矮能力的增强而减弱,可能是本次试验中施氮水平和中间砧品种的交互作用对中间砧幼树生长也存在显著影响(表 4)的主要原因。随着中间砧矮化效果的增强,氮对树体生长的促进作用减弱,即从 N_0 到 N_{100}处理,矮化效果最明显的 CG_{24}中间砧幼树生物量升高幅度最小,而 SH_{28}中间砧幼树生物量升高幅度最大(表 1)。中间砧品种对地上部及根系间细胞分裂素途径和生长素信号途径的影响较施氮水平更为显著,可能是中间砧品种对树体生长和^{15}N 利用率的影响较施氮水平及其交互作用更为显著的主要原因。

本次试验中,矮化效果最弱的 SH_{28}中间砧苹果幼树随着施氮量增加树体生物量和^{15}N 利用率显著增加,可能是由于氮素供应充足的条件下树体地上部生长势(库)的大小才是决定氮素累积能力的最终因素[22]。而矮化效果明显的中间砧苹果幼树表现出在适宜供氮条件下生物量和^{15}N 利用率最大,继续增加氮素供应反而不利于生长和^{15}N 利用率的提高,与烟富 3/M_{26}/平邑甜茶幼树不同氮水平下的年周期生长及氮利用特性[23]的研究结果一致。根冠比变化被认为是作物氮吸收系统对施氮水平的主要适应性响应[24],供氮不足条件下作物会通过促进根系生长[25],增加根系总根长和根表面积,提高氮吸收能力;随着氮素水平的提高,对地上部生长势的促进作用较根系更为显著[26],根冠比呈减小的趋势。烟富 3/M_{26}/平邑甜茶幼树的研究[23]还表明,施氮对矮化效果明显的中间砧苹果幼树生长的影响具有一定滞后性,首先通过根系中 Zr 的大量合成,将更多的氮分配到根部,促进根系快速生长和根冠比升高,随着氮吸收能力的增强和生长期的延长,地上部旺长,根冠比逐渐降低。而本次试验中,矮化效果最弱 SH_{28}中间砧幼树在不施氮肥 N_0 条件下根冠比和根系^{15}N 分配率显著升高,SH_{38}中间砧幼树在 N_{100}氮水平,矮化效果最强的 CG_{24}在 N_{200}高氮水平下分别表现为根冠比和根系^{15}N 分配率的显著升高,不仅是由于 SH_{28}中间砧幼树在氮浓度较低的条件下可更为快速诱导根中生长素含量增高,通过一氧化氮介导的信号途径刺激根的生长[27],促使树体将更多的同化氮分配到根部(表 3),用于促进根系生长[12]和氮素吸收,还可能是随着中间砧致矮程度的增强,在地上部及根系间传导调节作物生长的细胞分裂素和生长素[19-21]信号途径的减弱不仅降低氮

对树体生长促进幅度,而且减弱树体对氮的响应度和响应速率。

因此在生产栽培中,针对 SH_{28} 等矮化效果较弱的中间砧树体氮响应度高、响应速率快的特性,可适当降低氮肥施用量避免过旺生长,在其具有一定生物量的同时采用摘心、拉枝、环剥等减弱营养生长的措施以适时促进营养生长向生殖生长的转化。针对 CG_{24} 等矮化效果强,低氮条件下树势低、对氮响应度低且响应速率迟缓的特性,单纯通过增加氮肥施用量、大量肥料一次性施用的传统施肥方法容易形成前期高氮环境而后期脱肥,难以保持树体稳健生长,树体易早衰,需采用控释肥、水肥一体化等少量多次施肥原则,确保全生育期保持适宜氮浓度,以维持健壮树势。

参 考 文 献:

[1] 陈学森, 韩明玉, 苏桂林, 等. 当今世界苹果产业发展趋势及我国苹果产业优质高效发展意见[J]. 果树学报, 2010, 27(4): 598-604.
Chen X S, Han M Y, Su G L *et al*. Discussion on today's world apple industry trends and the suggestions on sustainable and efficient development of apple industry in China[J]. Journal of Fruit Science, 2010, 27(4): 598-604.

[2] 王金政, 薛晓敏, 路超. 我国苹果生产现状与发展对策[J]. 山东农业科学, 2010(6): 117-119.
Wang J Z, Xue X M, Lu C. Current production status and developing countermeasures in China.[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2010(6): 117-119.

[3] 汪景彦. 苹果矮化密植[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1988.
Wang J Y. Apple dwarf and close planting[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1988.

[4] 王金政. 果树优质高效安全生产十大关键技术[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2008.
Wang J Z. Ten key technology of efficient, high quality and safe production of fruit[M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 2008.

[5] 姜远茂, 张宏彦, 张福锁. 北方落叶果树养分资源综合管理理论与实践[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2007.
Jiang Y M, Zhang H Y, Zhang F S. Concepts & practice of integrate nutrient resource management in northern deciduous fruit[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2007.

[6] 姜远茂, 彭福田, 张宏彦. 山东省苹果园土壤有机质及养分状况研究[J]. 土壤通报, 2001, 32(4): 167-169.
Jiang Y M, Peng F T, Zhang H Y. Status of organic matter and nutrients in Shandong orchard soils[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2001, 32(4): 167-169.

[7] 束怀瑞. 苹果学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
Shu H R. Apple science[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999.

[8] 花蕾, 王永熙, 刘炳辉, 等. 提高渭北苹果品质的生产技术研究[A]. "九五"国家科技攻关计划农业领域优秀论文集[C]. 北京: 中国农业出版社, 2001.
Hua L, Wang Y X, Liu B H *et al*. Research on improving the production technology of Weibei apple quality[A]. "Ninth Five" national science and technology plan of symposium in agriculture sector[C]. Beijing: China Agriculture Press, 2001.

[9] 巨晓棠, 潘家荣, 刘学军, 张福锁. 北京郊区冬小麦/夏玉米轮作体系中氮肥去向研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3): 264-270.
Ju X T, Pan J R, Liu X J, Zhang F S. Study on the fate of nitrogen fertilizer in winter wheat/summer maize rotation system in Beijing suburban[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2003, 9(3): 264-270.

[10] 钟茜, 巨晓堂, 张福锁. 华北平原冬小麦/夏玉米轮作体系对氮素环境承受力分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(3): 285-293.
Zhong Q, Ju X T, Zhang F S. Analysis of environmental endurance of winter wheat/summer maize rotation system to nitrogen in North China Plain[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(3): 285-293.

[11] Cooper H D, Clarkson D T. Cycling of amino-nitrogen and other nutrients between shoots and roots in cereals—a possible mechanism integrating shoot and root in the regulation of nutrient uptake[J]. Journal of Experimental Botany, 1989, 40(7): 753-762.

[12] 李燕婷, 米国华, 陈范骏, 等. 玉米幼苗地上部/根间氮的循环及其基因差异[J]. 植物生理学报, 2001, 27(3): 226-230.
Li Y T, Mi G H, Chen F J *et al*. Genotypic difference of nitrogen recycling between root and shoot of maize seedlings[J]. Plant Physiology Journal, 2001, 27(3): 226-230.

[13] 吴楚, 王政权, 范志强, 孙海龙. 氮胁迫对水曲柳幼苗养分吸收、利用和生物量分配的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2034-2038.
Wu C, Wang Z Q, Fan Z Q, Sun H L. Effects of nitrogen stress on nutrient uptake by *Fraxinus mandshurica* seedlings and their biomass distribution[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(11): 2034-2038

[14] Agren G I, Ingestad T. Root-shoot ratio as balance between nitrogen productivity and photosynthesis[J]. Plant Cell Environment, 1987(10): 579-586

[15] Gower S T, Vogt K A, Grier C C. Carbon dynamics of Rocky Mountain Douglas-fir: Influence of water and nutrient availability[J]. Ecological Monographs, 1992, 62: 43-65

[16] Aphalo P J, Leto T. Effects of light quality on growth and N accumulation in birch seedlings[J]. Tree Physiology, 1997(17): 125-132

[17] 于迟, 张鹤, 李鸿莉, 等. 苹果矮化中间砧 SH40 激素含量及生长素转运蛋白基因 *pinl* 表达[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(2): 80-84.

Yu C, Zhang H, Li H L *et al*. The content of hormone and auxin transport gene *pin1* of SH40 as the interstock of apple[J]. Journal of China Agricultural University, 2012, 17(002): 80-84.

[18] Li H L, Zhang H, Yu C *et al*. Possible roles of auxin and zeatin for initiating the dwarfing effect of M9 used as apple rootstock or interstock[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2012(34): 235-244

[19] Sakakibara H. Nitrate-specific and cytokinin-mediated nitrogen signaling pathways in plant[J]. Journal of Plant Research, 2003, 116(3): 253-257.

[20] Takei K, Sakakibara H, Sugiyama T. Identification of genes encoding adenylate isopentenyltransferase, a cytokinin biosynthesis enzyme, in Arabidopsis thaliana[J]. The Journal of Biological Chemistry, 2001, 276(28): 26405-26410.

[21] Kiba T, Kudo T, Kojima M, Sakakibara H. Hormonal control of nitrogen acquisition: roles of auxin, abscisic acid, and cytokinin[J]. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(4): 1399-1409.

[22] Cooper H D, Clarkson D T. Cycling of amino-nitrogen and other nutrients between shoots and roots in cereals-a possible mechanism integrating shoot and root in the regulation of nutrient uptake[J]. Journal of Experimental Botany, 1989, 40(7): 753-762.

[23] 李 晶, 姜远茂, 魏绍冲, 等. 不同施氮水平对烟富3/M_{26}/平邑甜茶幼树当年及翌年氮素吸收、利用、分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2): 407-413.
Li J, Jiang Y M, Wei S C *et al*. Effects of different N rates on the absorption, allocation and utilization of urea-^{15}N in M. *hupehensis Rehd.* (Yan Fu3/M26) in the current year and next year[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(2): 407-413.

[24] 米国华, 陈范骏, 张福锁. 作物养分高效的生理基础与遗传改良[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2012.
Mi G H, Chen F J, Zhang F S. Physiological basis and genetic improvement of nutrient use efficiency in crops[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2012.

[25] 王 艳, 米国华, 张福锁. 氮对不同基因型玉米根系形态变化的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(3): 69-71.
Wang Y, Mi G H, Zhang F S. Effect of nitrate levels on dynamic changes of root morphology in different maize inbred lines[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2003, 11(3): 69-71.

[26] 姜琳琳, 韩立思, 韩晓日, 等. 氮素对玉米幼苗生长、根系形态及氮素吸收利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 247-253.
Jiang L L, Han L S, Han X R *et al*. Effects of nitrogen on growth, root morphological traits, nitrogen uptake and utilization efficiency of maize seedlings[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(1): 247-253.

[27] Zhao D Y, Tian Q Y, Li L H, Zhang W H. Nitric oxide is involved in nitrate-induced inhibition of root elongation in *Zea mays* L[J]. Annals of Botany, 2007, 100(3): 497-503.