植物营养与肥料学报 2014,20(4):965 -973
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2014.0419

低氮和干旱胁迫对富士和秦冠生长及氮素利用的影响

康晓育,常 聪,孙协平,张 欣,谢银鹏,马锋旺,邹养军*
(西北农林科技大学园艺学院,陕西杨凌 712100)

摘要:【目的】以富士(Fuji)、秦冠(Qinguan)嫁接在平邑甜茶(*Malus hupehensis* Rehd.)上的当年生盆栽苗为试验材料,采用砂培方法,研究了缺氮胁迫和干旱对富士和秦冠生长情况、光合参数、植株各部位氮磷钾含量及氮素利用效率的影响,分析比较了低氮干旱条件下富士和秦冠生长及氮素利用的差异,以期为果树生产高效肥水利用提供理论指导。**【方法】**试验共设四个处理:正常氮正常水(ZZ)、低氮正常水(DZ)、正常氮干旱(ZG)、低氮干旱(DG)。氮素和水分均设置两个水平,分别为正常氮(6 mmol/L NO_3^--N)、低氮(0.3 mmol/L NO_3^--N)、正常供水(保持盆中砂子相对含水量为饱和含水量的80%～85%)、干旱处理(保持盆中砂子相对含水量为饱和含水量的60%～65%)。**【结果】**富士和秦冠的生物量(茎和叶)、株高茎粗等生长指标以及光合速率、气孔导度、蒸腾速率均为正常氮正常水(ZZ) > 低氮正常水(DZ) > 正常氮干旱(ZG) > 低氮干旱(DG),并且相对应处理下秦冠的以上指标均高于富士;正常供水下,缺氮处理使富士、秦冠的根冠比比正常氮处理均有所增加,富士提高了2.05%,秦冠提高了22.40%。富士和秦冠的氮、磷、钾含量均表现出正常氮正常水(ZZ) > 低氮正常水(DZ) > 正常氮干旱(ZG) > 低氮干旱(DG);氮、钾元素含量在植株各部位的分布顺序依次是叶 > 根 > 茎,磷元素则是根 > 叶 > 茎;光合氮素利用效率(PNUE)和氮素利用效率表现为秦冠处理之间差异极显著,富士处理之间差异不显著;秦冠的PNUE和NUE明显高于富士,在低氮正常水(DZ)处理下,秦冠氮肥利用率比富士高42.07%,在低氮干旱(DG)处理下高64.14%;低氮胁迫下富士和秦冠的NUE显著提高,并且秦冠提高的幅度高于富士。**【结论】**施用氮肥能够显著提高富士与秦冠的干物质量,同等水肥条件下,秦冠生长优于富士;水分亏缺会减少叶片对氮的吸收,干旱条件下适度增施氮肥,可提高果树的抗旱能力;低氮干旱胁迫下秦冠的生长指标、光合指标及氮素利用效率指标均优于富士,表现出较强的抗低氮干旱胁迫的能力。

关键词: 低氮胁迫;干旱;苹果幼苗;生长;氮利用效率
中图分类号: S661.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2014)04-0965-09

How nitrogen and drought stress affect growth and nitrogen use efficiency for Fuji and Qinguan apple seedlings

KANG Xiao-yu, CHANG Cong, SUN Xie-ping, ZHANG Xin, XIE Yin-peng, MA Feng-wang, ZOU Yang-jun*
(*College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

Abstract:【Objectives】 The effects of nitrogen stress and drought on the growth, photosynthetic parameters, nitrogen(N), phosphorus(P), potassium(K) absorption in different parts of apple seedlings and the nitrogen use efficiency were analyzed. **【Methods】** Two cultivars of one-year-old apple seedlings(Fuji and Qinguan grafted *Malus hupehensis* Rehd.) were used in sandy pot culture experiment. Four treatments with two levels of nitrogen and water were designed. Normal nitrogen and normal water(ZZ), low nitrogen and normal water(DZ), normal nitrogen and droughts(ZG), low nitrogen and droughts(DG). Normal nitrogen(6 mmol/L NO_3^--N) and low nitrogen(0.3 mmol/L NO_3^--N); normal water(keep the relative water content as 80%-85%) and drought(keep the relative water content as 60%-65%). For both Fuji and Qinguan the biomass of stems and leaves, plant height and stem

收稿日期: 2013-05-31 **接受日期:** 2014-04-27
基金项目: 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2011KTZB02-02-04);西北农林科技大学推广专项(TGZX2012-11)资助。
作者简介: 康晓育(1987—),女,甘肃天水人,硕士研究生,主要从事果树逆境生理研究。E-mail: kangxiaoyu8@163.com
* 通信作者 E-mail: yangjunzou@126.com

diameter, photosynthetic rate, stomatal conductance and transpiration rate showed the highest results under normal water and N supply supply(ZZ), then descanted in order of low N and normal water(DZ), normal N and drought (ZG) and N and drought stress(DG) treatments. All the indices determined in Qinguan were higher than in Fuji under the same treatments. In normal water supply, the root/shoot ratios of Fuji and Qinguan with N stress treatment were 2.05% and 22.40% higher than normal N supply in Fuji and Qinguan respectively. The N, P, K contents in Fuji and Qinguan seedlings decreased with treatment of ZZ, DZ, ZG and DG. N and K contents in leaves were higher than in roots and stems, P content were increasing in order of root, leaf and stem. The net photosynthetic efficiency of unit leaf area(PNUE) and N efficiency were significantly different between treatments in Qinguan, not significant in Fuji. Under N stress and normal water supply, the PNUE and N efficiency in Qinguan were higher than in Fuji, the N efficiency in Qinguan was 42.07% higher than Fuji under N stress and normal water supply, and 64.14% higher under N stress and drought treatment. The N efficiencies were increased significantly in the two cultivars with the higher increase in Qinguan than in Fuji under N stress treatment. 【Conclusion】Water stress will reduce the absorption of nitrogen by leaf, increase of nitrogen application could improve drought tolerance of fruit trees. The growth index, photosynthetic index and N efficiency of Qinguan were superior to Fuji, and Qinguan showed more tolerant than the low nitrogen supply.

Key words: nitrogen stress; drought; apple seedling; growth; nitrogen use efficiency

土壤水分亏缺和营养不足是限制干旱、半干旱地区作物生长、生存和产量的两大主要因子[1]。土壤水分供应状况不仅直接影响植物生长和生存,也影响植物对养分的吸收和利用[2-3]。氮是果树必需的矿质营养元素,适量施用氮肥不仅能增加果树光合叶面积[4-5],还能促进花芽分化、提高坐果率[6-7]、增加产量[8-9]。如果施氮量过高,不仅会降低肥料利用率[10],还可能引起环境污染[11-12],带来温室效应[13]。Weinbaum 在 20 世纪 90 年代的报道中指出,果树的氮素利用率仅 10%～15%[10]。植物氮素营养利用研究目前仍主要集中在小麦、玉米、水稻等大田作物上[14-16],果树方面研究较少,因此研究和发掘养分利用效率高的品种对解决土壤瘠薄问题和提高氮肥利用效率具有重要意义。本试验采用砂培方法,选择富士、秦冠两个苹果品种嫁接在平邑甜茶上,在营养、水分条件可控制的环境下研究富士和秦冠生长指标、光合参数以及氮素积累的变化情况,低氮干旱条件下富士和秦冠生长及氮素利用的差异,以期为果树生产高效利用肥水提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为当年生的富士(Fuji)和秦冠(Qinguan)嫁接平邑甜茶的盆栽幼苗(口径×高度=38 cm×23 cm;培养介质为河沙,经过清洗、杀菌、风干、过筛、称重装盆)。营养液采用 1/2 Hoagland 营养液(Hoagland and Arnon 1950 改良配方)。

Hoagland and Arnon 1950 改良配方如下:大量元素 0.82 g/L $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$、0.505 g/L KNO_3、0.136 g/L $KH_2PO_4 \cdot 2H_2O$、0.493 g/L $MgSO_4 \cdot 7H_2O$、2.5 mmol/L 铁盐($FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 和 EDTA-Na);微量元素 2.86 mg/L H_3BO_4、1.81 mg/L $MnCl_2 \cdot 4H_2O$、0.22 mg/L $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$、0.08 mg/L $CuSO_4 \cdot 5H_2O$、0.02 mg/L $H_2MoO_4 \cdot H_2O$。

1.2 试验设计

试验于 2012 年 1 月～10 月在西北农林科技大学园艺场温室及旱区作物逆境生物学国家重点实验室进行(34°20′ N, 108°24′ E)。2012 年 7 月,待植株长至 15～20 个功能叶片时,每个品种选取长势均一的植株进行处理。氮素分为正常氮 6 mmol/L NO_3^--N(即 1/2Hoagland 营养液);低氮 0.3 mmol/L NO_3^--N[即去掉 $Ca(NO_3)_2$,并用 KCl、$CaCl_2$ 来平衡钾钙离子]。水分为正常供水(保持盆中砂子相对含水量为饱和含水量的 80%～85%)和干旱(保持盆中砂子相对含水量为饱和含水量的 60%～65%)。共四个处理:1)正常氮正常水(ZZ);2)低氮正常水(DZ);3)正常氮干旱(ZG);4)低氮干旱(DG)。试验开始于 2012 年 7 月 1 日,结束于 2012 年 9 月 1 日,期间每周浇一次营养液,每两天浇一次水。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 植株生长指标测定 在处理结束(9 月 1 日)时,随机取秦冠、富士不同处理各 15 株进行生长指

标测定。株高(pH)用米尺(1 mm)测定(从嫁接处到顶芽)；主干基部直径(BD)用电子游标卡尺(0.01 mm)在距嫁接口向上 3cm 处测定；叶片 SPAD 值用 SPAD－502 Chl meter (Minolta Camera Co., Osaka, Japan)分别测定每个处理各 15 片幼叶(从主干顶部数第 5～6 个叶片)和 15 片老叶(从主干基部数第 3～4 个叶片)。将整株分解为叶片、茎、基茎和根系 4 部分，放入 105℃的烘箱中杀青 15～20 min，然后 75℃烘干至恒重，测定植株生物量。

1.3.2 叶片光合参数和瞬时水分利用效率的测定

在处理结束时，秦冠、富士嫁接苗各选取长势均一的植株 5 株，用 Li-6400XT 便携式光合测量系统(Li-Cor Inc., Lincoln, Nebraska, USA)测定从主干顶部数第 7～8 个成熟叶片的净光合速率(P_n)、气孔导度(g_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和蒸腾速率(E)。将测定光合速率的叶片带回试验室用根系扫描仪 WinRHIZO 扫描叶面积，然后在 105℃下杀青 30 min，75℃下烘干，通过测得的叶面积与干重计算比叶重，利用比叶重将单位叶面积的 P_n 换算为单位质量叶片的 P_n。烘干后的样品粉碎过筛，用自动化学分析仪测定叶片含氮量，叶片 NUE 用单位质量的叶片 P_n/含氮量表示。

测定光合的时间为晴天的上午 9：00～11：00，采用红蓝 LED 光源，光强为 1000 μmol/(m^2 · s) PPFD(photosynthetic photon flux density)。瞬时水分利用效率(WUE_I) = P_n/E。

1.3.3 氮、磷、钾含量测定及氮素利用效率计算

各处理样品烘干后，分别取根、茎、叶干样少量，用自动研磨仪磨碎，称取约 0.2 g 粉末加入到 100 mL 消煮管后，加入 5 mL 浓硫酸，放到消煮炉上 360℃消煮约 4 个小时，每隔一小时加入 10 滴 H_2O_2，消煮直至溶液清亮后取下冷却，随后用蒸馏水定容至刻度线。

氮、磷、钾含量测定：吸取 5 mL 上清液于胶卷盒中，稀释三倍用高分辨自动化学分析仪(型号为 AA3)测量全 N、全 P 含量，吸取 15 mL 上清液原液用原子火焰光度测定仪(Z－2000, Hitachi, Japan)测定全钾含量。

氮素利用指数(NUI)(g^2/mg)：植株体内单位氮含量(氮浓度)所形成的生物产量[17]，即，生物量(g)/氮含量(N, mg/g)，磷钾利用指数同氮素利用指数。

光合氮素利用效率(PNUE)[CO_2 μmol/(g · s)]：每单位面积叶片氮含量的净光合速率，即，净光合速率[μmol/(m^2 · s)]/叶片氮素含量(mg/g)。

氮素利用效率 NUE[18][CO_2 μmol/(mol · s)]：单位摩尔质量的 N 在每单位时间所吸收的 CO_2 μmol 量，即光合氮素利用效率/N 元素的摩尔质量。

1.4 数据分析

试验数据采用 EXCEL 和 ORIGIN 8.5 统计软件进行作图和数据分析。

2 结果与分析

2.1 低氮干旱胁迫对富士、秦冠生物量的影响

表 1 可以看出，四种处理下，富士和秦冠上茎干重、植株总干重均为正常氮正常水(ZZ) > 低氮正常水(DZ) > 正常氮干旱(ZG) > 低氮干旱(DG)；而两者的叶干重为正常氮正常水(ZZ)处理显著高于其他处理，而其他处理间差异不显著，秦冠低氮下根干重高于正常氮；四种处理下秦冠的总生物量均相应的高于富士的生物量。

在正常供水条件下，缺氮处理富士植株总生物量是正常氮处理的 85.82%，秦冠为 94.56%；在轻度干旱处理下，缺氮处理富士植株总生物量是正常氮处理的 87.64%，秦冠是 94.90%。缺氮处理富士、秦冠的根冠比比正常氮处理均有所增加，富士由 0.9292 增加到 0.9483，提高了 2.05%，秦冠由 0.9200 增加到 1.1260，提高了 22.40%，秦冠的增加幅度高于富士。

2.2 低氮干旱胁迫对富士、秦冠光合参数的影响

表 2 看出，四种处理下，富士和秦冠的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率均是正常氮正常水 > 低氮正常水 > 正常氮干旱 > 低氮干旱；处理间胞间二氧化碳浓度差异不大，气孔导度差异显著；四种处理下，秦冠的净光合速率高于富士。

在正常供水条件下，缺氮处理富士净光合速率是正常氮处理的 92.98%，秦冠是 97.25%；在轻度干旱处理下，缺氮处理富士和秦冠分别是正常氮处理的 95.67% 和 96.62%，秦冠耐低氮能力强于富士。

正常氮干旱处理富士瞬间水分利用效率比正常氮正常水提高了 51%，低氮干旱比低氮正常水提高了 73%；秦冠的四种处理差异不明显，平均值为 2.94，富士处理间的瞬间水分利用效率的平均值为 2.62，秦冠比富士高 12.21%。低氮处理对富士和秦冠的瞬间水分利用效率影响差异不大，干旱处理下瞬间水分利用效率升高，富士表现尤其明显。

表1 两个品种不同处理各部位干重(g/plant)

Table 1 Effects of different treatments on the dry matter weight of two cultivars

品种 Cultivar	处理 Treatments	根 Root	上茎 Scion stem	基茎 Rootstock stem	叶 Leaf	整株 Whole plant
富士 Fuji	ZZ	28.01 ±2.91 a	13.72 ±1.08 a	7.74 ±1.44 a	8.68 ±1.18 a	58.16 ±3.17a
	DZ	24.29 ±2.16ab	11.31 ±1.70 a	6.50 ±1.17 a	7.81 ±0.53 b	49.91 ±2.55 b
	ZG	23.31 ±3.96 b	9.42 ±1.59 b	7.56 ±1.25 a	7.35 ±1.55 b	48.16 ±2.26 b
	DG	22.99 ±3.50 b	7.96 ±0.70 b	8.06 ±1.83 a	7.29 ±1.23 b	42.21 ±2.16 c
秦冠 Qinguan	ZZ	28.90 ±1.78a b	13.86 ±1.56 a	7.48 ±1.36 a	10.08 ±0.34 a	60.31 ±2.25 a
	DZ	30.20 ±3.51 a	10.23 ±0.44 b	7.72 ±1.02 a	8.87 ±0.61 b	57.03 ±3.71 a
	ZG	26.94 ±3.56 b	10.11 ±1.42 b	7.40 ±1.43 a	8.34 ±0.44 b	50.70 ±3.34 b
	DG	23.20 ±5.01 b	9.92 ±1.70 b	6.79 ±1.76 a	8.22 ±0.87 b	48.12 ±4.30 b

注(Note): ZZ— 正常氮正常水 Normal nitrogen and normal water; DZ—低氮正常水 Low nitrogen and normal water; ZG—正常氮干旱 Normal nitrogen ang drought; DG—低氮干旱 Low nitrogen and drought; 同一品种同一列数据后小写字母表示差异达0.05 水平显著 Values followed by different letters within a column in the same cultivars are significantly different at 0.05 level.

表2 两个品种不同处理光合参数

Table 2 Effects of different treatments on photosynthetic parameters of two cultivars

品种 Cultivar	处理 Treatment	净光合速率 Pn [CO_2 μmol/(m^2·s)]	气孔导度 g_s [H_2O mol/(m^2·s)]	胞间二氧化碳 C_i (μmol/mol)	蒸腾速率 T_r [H_2O mmol/(m^2·s)]	瞬间水分利用效率 WUE_i(mmol/mol)
富士 Fuji	ZZ	17.40 ±0.21 a	0.54 ±0.03 a	276.07 ±3.17 a	8.68 ±0.33 a	2.00 ±0.09 b
	DZ	16.18 ±0.66 b	0.46 ±0.05 b	272.54 ±7.17 a	8.16 ±0.68 a	1.99 ±0.12 b
	ZG	15.47 ±0.88 b	0.31 ±0.02 c	277.26 ±7.96 a	5.12 ±0.08 b	3.02 ±0.15 a
	DG	14.80 ±1.15 b	0.24 ±0.06 d	255.38 ±6.16 b	4.35 ±0.74 c	3.46 ±0.47 a
秦冠 Qinguan	ZZ	17.92 ±0.68 a	0.45 ±0.04 a	269.51 ±6.24 ab	6.34 ±0.56 a	2.84 ±0.25 a
	DZ	17.42 ±0.78 ab	0.39 ±0.01 b	258.15 ±3.42 b	5.69 ±0.34 a	3.07 ±0.16 a
	ZG	16.29 ±0.94 b	0.35 ±0.01 b	265.80 ±7.90 b	5.50 ±0.50 b	2.98 ±0.38 a
	DG	15.74 ±1.20 b	0.34 ±0.08 c	279.72 ±6.54 a	5.53 ±0.70 b	2.86 ±0.15 a

注(Note): ZZ— 正常氮正常水 Normal nitrogen and normal water; DZ—低氮正常水 Low nitrogen and normal water; ZG—正常氮干旱 Normal nitrogen ang drought; DG—低氮干旱 Low nitrogen and drought; 同一品种同一列数据后小写字母表示差异达0.05 水平显著 Values followed by different letters within a column in the same cultivars are significantly different at 0.05 level.

2.3 低氮干旱胁迫对富士、秦冠生长指标的影响

表3表明,四种处理下,富士和秦冠的生长指标株高、茎粗、SPAD值均表现为正氮正常水>低氮正常水>正常氮干旱>低氮干旱,并且相对应处理下秦冠的株高、茎粗、SPAD值都高于富士;供水不同造成株高的差异显著,茎粗之间差异不显著,并且相对应处理的老叶SPAD值均高于幼叶。

正常供水条件下,植株株高表现为富士缺氮处理是正常氮处理的92.82%,秦冠缺氮处理是正常氮处理的94.24%;幼叶SPAD值,富士缺氮处理是正常氮处理的92.23%,秦冠缺氮处理是正常氮处理的91.69%;老叶SPAD值,富士缺氮处理是正常氮处理的95.41%,秦冠缺氮处理是正常氮处理的96.43%。

在轻度干旱处理下,株高表现为富士缺氮处理是正常氮处理的92.20%,秦冠缺氮处理是正常氮处理的95.23%;幼叶SPAD值表现为富士缺氮处理是正常氮处理的91.70%,秦冠缺氮处理是正常氮处理的96.28%;老叶SPAD值表现为富士缺氮处理是正常氮处理的95.41%,秦冠缺氮处理是正常氮处理的98.21%。

正常供水条件下,秦冠和富士的株高、SPAD值

缺氮处理与正常氮处理提高值之间差异不明显;而轻度干旱处理下,秦冠的株高、SPAD 值缺氮处理与正常氮处理增加值明显高于富士,显示出秦冠在干旱胁迫下,利用氮的能力高于富士。

表 3　两个品种不同处理株高、茎粗和 SPAD 值

Table 3　Effects of different treatments on the shoot height, trunk diameter and SPAD value of two cultivars

品种 Cultivar	处理 Treatment	株高(cm) Shoot height	茎粗 (mm) Trunk diameter	幼叶 SPAD 值 Young leaf SPAD value	老叶 SPAD 值 Old leaf SPAD value
富士 Fuji	ZZ	112.02 ±5.71 a	7.79 ±0.59 a	52.34 ±3.72 a	54.47 ±2.40 a
	DZ	103.98 ±7.48 a	7.69 ±0.40 a	48.27 ±3.08 ab	51.97 ±2.96 ab
	ZG	100.61 ±12.03 ab	7.66 ±1.55 a	44.26 ±3.38 b	48.61 ±2.62 b
	DG	92.76 ±10.23 b	7.09 ±0.75 a	40.59 ±5.18 b	45.89 ±4.26 b
秦冠 Qinguan	ZZ	121.18 ±6.77 a	8.53 ±0.30 a	55.70 ±2.44 a	58.54 ±3.87 a
	DZ	114.20 ±7.05 ab	8.32 ±0.71 ab	51.07 ±3.66 ab	56.45 ±2.97 ab
	ZG	106.55 ±7.65 b	7.63 ±0.41 b	48.94 ±3.99 b	50.42 ±2.76 b
	DG	101.46 ±5.98 b	7.53 ±0.58 b	47.12 ±2.92 b	49.52 ±2.79 b

注(Note): ZZ— 正常氮正常水 Normal nitrogen and normal water; DZ—低氮正常水 Low nitrogen and normal water; ZG—正常氮干旱 Normal nitrogen ang drought; DG—低氮干旱 Low nitrogen and drought; 同一品种同一列数据后小写字母表示差异达 0.05 水平显著 Values followed by different letters within a column in the same cultivars are significantly different at 0.05 level.

2.4　低氮干旱胁迫对富士、秦冠氮、磷、钾含量及氮积累量的影响

由表 4 可知, 四种处理下,富士和秦冠的磷元素、钾元素含量均表现出正氮正常水 > 低氮正常水 > 正常氮干旱 > 低氮干旱,植株不同部位磷元素含量由高到低依次为根系、叶片、茎,而钾元素含量在叶片中最多,茎中最少。磷、钾在各部位中的含量与氮素水平呈正相关的关系,正常氮处理富士、秦冠各部位磷钾含量均是比低氮处理的要高,说明低氮条件不利于苹果植株对磷、钾元素的吸收与利用。

表 4　两个品种不同处理磷、钾含量

Table 4　Effects of different treatments on P and K content of two cultivars

品种 Cultivar	处理 Treatment	磷含量 P content (mg/g)			钾含量 K content(mg/g)		
		叶 Leaf	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	根 Root	茎 Stem
富士 Fuji	ZZ	3.88 ±0.03 a	5.42 ±0.53 a	1.96 ±0.32 a	13.71 ±1.49 a	7.23 ±0.09 a	4.89 ±0.24 a
	DZ	3.38 ±0.26 b	5.23 ±0.03 a	1.82 ±0.12 a	12.87 ±0.10 a	5.83 ±0.08 b	4.06 ±0.13 b
	ZG	3.2 ±0.22 bc	4.96 ±0.63 ab	1.41 ±0.11 b	10.04 ±0.08 b	5.79 ±0.45 b	3.50 ±0.13 c
	DG	2.86 ±0.21 c	4.23 ±0.30 b	1.39 ±0.01 b	9.98 ±0.08 b	2.88 ±0.04 c	3.48 ±0.17 c
秦冠 Qinguan	ZZ	4.65 ±0.33 a	5.52 ±0.10 a	2.36 ±0.07 a	12.88 ±0.35 a	12.70 ±0.93 a	5.62 ±0.06 a
	DZ	4.2 ±0.13 ab	5.18 ±0.24 ab	2.08 ±0.38 a	11.93 ±0.28 b	9.37 ±1.89 b	4.93 ±0.05 b
	ZG	3.86 ±0.80 b	5.14 ±0.17 b	1.90 ±0.09 b	10.72 ±0.10 c	8.83 ±1.41 b	4.47 ±0.08 c
	DG	3.72 ±0.63 b	3.96 ±0.02 c	1.76 ±0.34 b	6.53 ±0.14 d	6.04 ±0.21 c	3.29 ±0.36 d

注(Note): ZZ— 正常氮正常水 Normal nitrogen and normal water; DZ—低氮正常水 Low nitrogen and normal water; ZG—正常氮干旱 Normal nitrogen ang drought; DG—低氮干旱 Low nitrogen and drought; 同一品种同一列数据后小写字母表示差异达 0.05 水平显著 Values followed by different letters within a column in the same cultivars are significantly different at 0.05 level.

由表 5 可知,四种处理下,富士和秦冠的氮素含量及在植物体内最终积累量均表现出正氮正常水 > 低氮正常水 > 正常氮干旱 > 低氮干旱,四种处理下秦冠根、茎、叶的氮含量均高于富士;正常供水和

干旱处理之间各部位氮素含量均有显著差异,水分促进了植物氮素的吸收;氮元素含量在植株各部位的分布顺序依次是 叶 > 根 > 茎。

表5 两个品种不同处理氮含量及氮素积累量

Table 5 Effects of different treatments on N content and N accumulation of two cultivars

品种 Cultivar	处理 Treatment	氮含量 N content (mg/g)			氮素积累量 N accumulation(mg/plant)		
		叶 Leaf	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	根 Root	茎 Stem
富士 Fuji	ZZ	25.54 ±0.38 a	14.67 ±0.98 a	6.43 ±0.26 a	221.80 ±21.35	410.88 ±48.01	88.22 ±9.19
	DZ	24.82 ±1.67 a	13.34 ±0.74 a	6.23 ±0.25 a	193.94 ±16.51	324.10 ±36.50	70.44 ±10.24
	ZG	19.6 ±0.35 b	11.15 ±0.05 b	4.88 ±0.25 b	143.96 ±13.26	260.03 ±33.45	45.97 ±5.86
	DG	17.15 ±0.47 c	10.48 ±0.30 b	4.43 ±0.18 b	124.98 ±10.26	240.85 ±26.93	35.26 ±2.61
秦冠 Qinguan	ZZ	25.83 ±0.64 a	16.46 ±0.29 a	7.61 ±0.06 a	260.24 ±26.54	475.57 ±32.28	105.46 ±12.00
	DZ	24.68 ±1.01 a	14.19 ±0.28 a	7.28 ±0.17 a	218.86 ±19.36	428.53 ±35.10	74.49 ±3.32
	ZG	21.99 ±0.38 b	11.68 ±0.42 b	5.07 ±0.06 b	183.40 ±15.23	314.76 ±33.21	51.23 ±6.86
	DG	21.52 ±0.65 b	10.49 ±0.79 b	4.99 ±0.61 b	176.84 ±13.56	243.46 ±25.36	49.48 ±5.94

注(Note): ZZ— 正常氮正常水 Normal nitrogen and normal water; DZ—低氮正常水 Low nitrogen and normal water; ZG—正常氮干旱 Normal nitrogen ang drought; DG—低氮干旱 Low nitrogen and drought; 同一品种同一列数据后小写字母表示差异达0.05 水平显著 Values followed by different letters within a column in the same cultivars are significantly different at 0.05 level.

2.5 低氮干旱胁迫对富士、秦冠氮、磷、钾利用指数的影响

由表6可知,两种水分处理富士、秦冠各部位氮素利用指数均是低氮处理高于正常氮处理;并且同等处理条件下秦冠的氮素利用指数均高于富士。正常供水条件下,秦冠叶片的 NUI 低氮处理比正常氮提高了27%,富士提高了8%,秦冠提高量是富士的3.3倍;秦冠根部 NUI 低氮处理比正常氮提高了64%,富士提高了21%,秦冠提高量是富士的3倍;茎的 NUI 提高量相差不大。干旱条件下,秦冠叶片的 NUI 低氮处理比正常氮提高了27%,富士提高了10%,秦冠提高量是富士的2.7倍;秦冠茎 NUI 低氮

表6 两个品种不同处理氮磷钾的利用指数 (g^2/mg)

Table 6 Effects of different treatments on the use index of N, P, K of two cultivars

品种 Cultivar	处理 Treat	氮素利用指数 NUI			磷利用指数 PUI			钾利用指数 KUI		
		叶 Leaf	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	根 Root	茎 Stem
富士 Fuji	ZZ	0.34 a	1.91 b	1.80 ab	1.87 a	6.62 a	5.82 a	0.81 ab	2.21 b	2.44 b
	DZ	0.36 a	2.32 a	2.26 a	1.85 a	4.65 b	6.43 a	0.66 b	4.02 a	3.44 a
	ZG	0.30 a	1.75 b	1.29 b	1.90 a	4.30 b	4.52 b	1.12 a	2.49 b	1.91 b
	DG	0.33 a	2.06 b	1.57 b	1.96 a	4.63 b	4.18 b	0.57 b	2.60 b	1.78 b
秦冠 Qinguan	ZZ	0.41 b	1.76 b	2.15 a	2.98 a	7.29 a	7.63 a	0.74 a	4.00 b	2.84 a
	DZ	0.52 a	2.88 a	2.31 a	2.29 b	5.48 b	7.25 a	0.69 a	5.22 a	2.94 a
	ZG	0.33 c	1.90 b	1.62 b	2.92 a	5.21 b	5.15 b	0.83 a	3.35 b	2.49 a
	DG	0.42 b	1.99 b	2.03 a	2.50 ab	4.51 c	7.11 a	0.82 a	3.98 b	2.83 a

注(Note): NUI—Nitragen use index; PUI—Phosphorous use index; KUI—Potassic use index; ZZ—正常氮正常水 Normal nitrogen and normal water; DZ—低氮正常水 Low nitrogen and normal water; ZG—正常氮干旱 Normal nitrogen ang drought; DG—低氮干旱 Low nitrogen and drought; 同一品种同一列数据后小写字母表示差异达0.05 水平显著 Values followed by different letters within a column in the same cultivars are significantly different at 0.05 level.

处理比正常氮提高了 25%,富士提高了 21%,提高量差异不大,但是秦冠根系的 NUI 提高量低于富士。表明干旱和低氮双重胁迫下,秦冠、富士叶片的 PUI 和 KUI 和氮素处理水平呈正相关,即正常氮处理高于低氮处理;根、茎的 PUI 和 KUI 与 NUI 的变化趋势一致,说明低氮处理下元素利用指数高。

2.6　低氮干旱胁迫对富士、秦冠光合氮素利用效率 PNUE 和氮素利用效率 NUE 的影响

由图 1(B)图可以看出秦冠、富士光合氮素利用效率 PNUE 均表现出低氮正常水 > 低氮干旱 > 正氮正常水 > 正常氮干旱,并且秦冠处理之间差异及其显著,富士差异不明显。秦冠的光合氮素利用效率 PNUE 明显高于富士,尤其是在低氮处理下,表明低氮胁迫显著提高了秦冠的 PNUE。

通过图 1(A)和(B)的对比,在低氮正常水处理,叶片氮含量差异不大的情况下,秦冠的光合氮素利用效率明显高于富士的,说明秦冠和富士对氮素的吸收能力相差不多,但是秦冠的利用能力却比富士高。

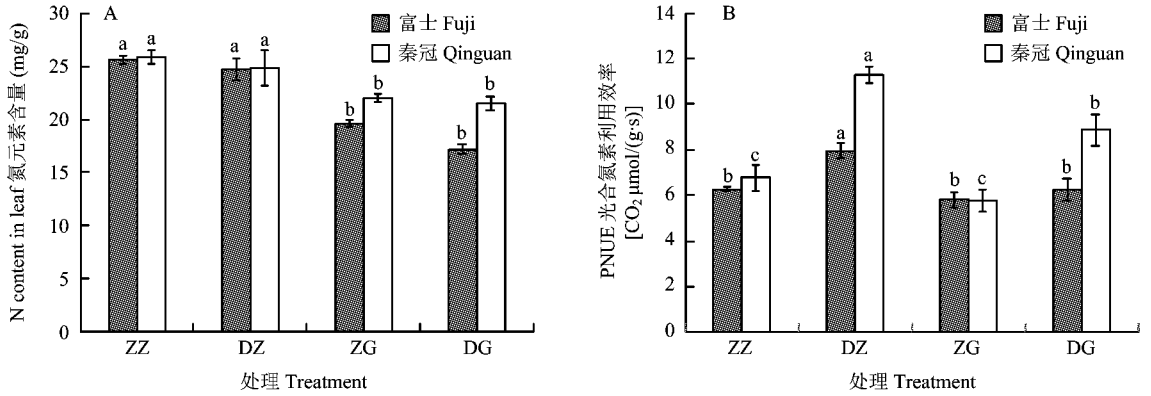

图 1　两个品种不同供氮供水条件下叶片氮元素含量与光合氮素利用效率

Fig. 1　Effects of different N and water supply conditions on the N content in leaf and PNUE of two cultivars

本试验结果(图 2)表明秦冠、富士氮素利用效率(NUE)均表现出低氮正常水 > 低氮干旱 > 正常氮正常水 > 正常氮干旱,这与图 1(B)光合氮素利用效率一致,并且秦冠处理之间差异及其显著,富士差异不明显。每个处理下,秦冠的氮素利用效率(NUE)明显高于富士,尤其是在低氮处理下,在低氮正常水处理下,秦冠 NUE 比富士高 42.07%,在低氮干旱水处理下,秦冠 NUE 比富士的提高了 64.14%。

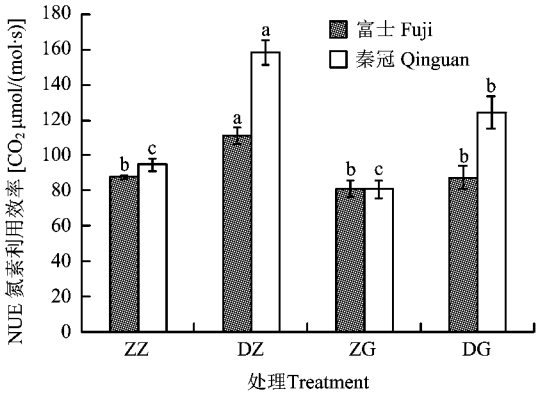

图 2　两个品种不同供氮供水条件下的氮素利用效率

Fig. 2　Effects of different N and water supply conditions on the NUE of two cultivars

3　讨论

本研究结果表明富士和秦冠的茎和叶的生物量表现为正常氮正常水 > 低氮正常水 > 正常氮干旱 > 低氮干旱,与氮素和水分供应量呈一致,与前人研究施用氮肥能够显著增加作物植株干物质量的结果一致[19-20],并且试验结果表明相同处理下秦冠的生物量高于富士,即同等水肥条件下,秦冠生长优于富士,这与秦冠比富士抗旱相一致[21]。

秦冠低氮下根干重高于正常氮的根干重,表明适量低氮胁迫促进了秦冠根系生长,一定程度提高了根冠比。前人的试验也表明缺氮介质中生长的平邑甜茶实生幼苗主根和侧根伸长生长快[22],这些变化应当与缺氮后导致碳水化合物向根系转运有关[23]。

植物氮素营养状况的好坏,直接影响光合速率和生长发育,并最终影响产量和光能利用率,在一定

范围内,光合速率与叶片含氮量成正相关[24]。本研究通过表2净光合速率和表5中叶片氮含量比较,光合速率与叶片含氮量也成正相关,和前人研究结果一致。并且适宜水分条件下适量施用氮肥能提高叶片的光合速率[25-26]。

水分和养分间存在相互作用和相互影响的关系,水分亏缺时会减少叶片对氮的吸收,导致最大光合作用能力受到抑制。但适度干旱条件下增施氮肥,能增大叶面积并使植物较早达到最大光合面积,从而保持较强的光合能力,同化更多的光合产物,有利于后期干物质的积累。

本试验所有结果表明,低氮干旱胁迫对秦冠、富士生长的影响程度不同,低氮对秦冠生长指标、光合参数影响小于富士,低氮更大程度地提高了秦冠氮素利用效率,初步表明秦冠耐瘠薄干旱能力强于富士。

参考文献:

[1] Monclus R, Dreyer E, Villar M *et al*. Impact of drought on productivity and water use efficiency in 29 genotypes of *Populus deltoids* × *Populus nigra*[J]. New Phytologist, 2006, 169: 765-777.

[2] Song C J, Ma K M, Qu L Y *et al*. Interactive effects of water, nitrogen and phosphorus on the growth, biomass partitioning and water-use efficiency of *Bauhinia faberi* seedlings[J]. Journal of Arid Environments, 2010, 74(9): 1003-1012.

[3] Wu F Z, Bao W K, Zhou Z Q *et al*. Carbon accumulation, nitrogen and phosphorus use efficiency of *Sophora davidii* seedlings in response to nitrogen supply and water stress[J]. Journal of Arid Environments, 2009, 73: 1067-1073.

[4] 来改英, 王贵荣. 不同氮肥水平对小麦后期叶片光合速率的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2003, 23(1): 32-35.
Lai G Y, Wang G R, Wang H F. The effect of nitrogenous fertilizer on the rate photosynthesis of later period of wheat leaves [J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science), 2003, (1): 32-35.

[5] 李文庆, 束怀瑞. 氮素在果树上的生理作用[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2002, 33(1): 96-100.
Li W Q, Zhang M, Shu H R. The physiological effects of nitrogen on fruit trees[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science), 2002, 33(1): 96-100.

[6] 崔振岭, 石立委, 徐久飞, 等. 氮肥施用对冬小麦产量、品质和氮素表观损失的影响研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2071-2075.
Cui Z L, Shi L W, Xu J F *et al*. Effects of N fertilization on winter wheat grain yield and its crude protein content and apparent N losses[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(11): 2071-2075.

[7] Saenz J L, Dejong T M, Weinbaum S A. Nitrogen stimulated increases in peach yield are associated with extended fruit development period and increased fruit sink capacity[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1997, 122(6): 772-777.

[8] 彭福田. 氮素对苹果果实发育与产量、品质的调控[D]. 山东泰安: 山东农业大学博士学位论文, 2001.
Peng F T. Nitrogen regulation of fruit development, yield and fruit quality[D]. Taian, Shandong: PhD dissertation of Shandong Agricultural University, 2001.

[9] Vanangamudi K, Subramanian K S, Baskaran M. Influence of irrigation and nitrogen on the yield and quality of chili fruit and seed[J]. Seed Research, 1990, 18(2): 114-116.

[10] Weinbaum S A, Johnson R S, DeJong T M. Causes and consequences of overfertilization in orchards[J]. Hort Technology, 1992, 2(1): 112-121.

[11] Hasegawa H. Crop ecology, management and quality[J]. Crop Science, 2003, 43: 921-926.

[12] Mancus P. Nitrogen fertilizer dependency and its contradictions: a theoretical exploration of social-ecological metabolism[J]. Rural Sociology, 2007, 72: 269-288.

[13] Yu K, Patrick WH Jr. Redox range with minimum nitrous oxide and methane production in a rice soil under different pH[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67: 1952-1958.

[14] Le Gouis J, Béghin D, Heumez E *et al*. Genetic differences for nitrogen uptake and nitrogen utilisation efficiencies in winter wheat[J]. European Journal of Agronomy, 2000, 12(3): 163-173.

[15] 黄高宝, 张恩和, 胡恒觉. 不同玉米品种氮素营养效率差异的生态生理机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(3): 293-297.
Huang G B, Zhang E H, Hu H J. Eco-physiological mechanism on nitrogen use efficiency difference of corn varieties[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2001, 7(3): 293-297.

[16] 陈新平, 周金池. 冬小麦, 夏玉米不同品种(系)之间的氮营养效率的差异[J]. 中国农业大学学报, 2000, 5(1): 80-83.
Chen X P, Zhou J C, Wang X R *et al*. Difference in nitrogen efficiency among different winter wheat and summer corn varieties [J]. Journal of China Agricultural University, 2000, 5(1): 80-83.

[17] Good A G, Shrawat A K, Muench D G. Can less yield more? Is reducing nutrient input into the environment compatible with maintaining crop production? [J]. Trends in Plant Science, 2004, 9(12): 597-605.

[18] Siddiqi M Y, Glass A D M. Utilization index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants[J]. Journal of Plant Nutrition, 1981, 4(3): 289-302.

[19] Ghoname A A, Dawood M G, Riad G S *et al*. Effect of nitrogen forms and biostimulants foliar application on the growth, yield and chemical composition of hot pepper grown under sandy soil

conditions[J]. Research Journal of Agriculture and Biological Sciences, 2009, 5(5): 840-852.

[20] Raese J T, Drake S R, Curry E A. Nitrogen fertilizer influences fruit quality, soil nutrients and cover crops, leaf color and nitrogen content, biennial bearing and cold hardiness of 'Golden Delicious'[J]. Journal of Plant Nutrition, 2007, 30(10): 1585-1604.

[21] Liu B, Cheng L, Ma F *et al*. Growth, biomass allocation, and water use efficiency of 31 apple cultivars grown under two water regimes[J]. Agroforestry Systems, 2012, 84(2): 117-129.

[22] 范伟国, 杨洪强. 人工基质培养条件下营养亏缺对湖海棠实生纪苗根构型的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(1): 161-166.

Fan W G, Yang H Q. Nutrient deficiency affects root architecture of uoung seedlings of *Malus hupehensis* (Pamp) Rehd. under artificial medium cultivation[J]. Scientai Agricultura Sinica, 2007, 40(1): 161-166.

[23] López-Bucio J, Cruz-Ramírez A, Herrera-Estrella L. The role of nutrient availability in regulating root architecture[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2003, 6(3): 280-287.

[24] Hampson C R, Azarenko A N, Potter J R. Photosynthetic rate, flowering, and yield component alteration in hazelnut in response to different light environments[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1996, 121(6): 1103-1111.

[25] DeJong T M, Day K R, Johnson R S. Partitioning of leaf nitrogen with respect to within canopy light exposure and nitrogen availability in peach (*Prunus persica*)[J]. Trees, 1989, 3(2): 89-95.

[26] Gou L, Yan J, Han C *et al*. Effects of nitrogen rates on photosynthetic characteristics and yield of high-yielding cotton in Xinjiang[J]. Plant Nutrition and Fertitizer Science, 2003, 10(5): 488-493.