

· 作物水肥高效利用 ·

文章编号: 1672-3317(2023)01-0008-08

黄金梨树氮素营养状况对不同水氮用量的响应

刘亚南^{1,2}, 白美健^{1*}, 李益农¹, 张宝忠¹, 史源¹, 吴现兵³, 史力诚¹

(1.流域水循环重点实验室 中国水利水电科学研究院, 北京 100048;

2.中国农业大学, 北京 100083; 3.河北农业大学, 河北 保定 071000)

摘要:【目的】探究黄金梨树氮吸收对水氮耦合的响应规律。【方法】设定灌水下限和施氮量2个因素, 每个因素设定3个水平, 即灌水下限: 高水(HW: 75%Fc)、中水(MW: 65%Fc)和低水(LW: 55%Fc)(Fc: 田间持水率(体积含水率)); 施氮量: 高氮(HF: 486 kg/hm²)、中氮(MF: 324 kg/hm²)、低氮(LF: 162 kg/hm²), 正交设定9个试验处理, 对照处理为园区常规管理(CK)。测定了果实膨大期和成熟期梨树春梢、叶片和果实全氮量。【结果】果实膨大期, 中水中肥(MWMF)处理梨树春梢和叶片全氮量最高, 较CK分别提高了26.20%和8.66%; 灌水下限对春梢全氮量影响差异不显著, 施氮量和耦合作用对春梢全氮量提高差异显著; 灌水下限、施氮量及耦合作用对叶片全氮量提升差异不显著。成熟期时, 中水中肥(MWMF)处理梨树春梢全氮量最高为0.74 g/kg, 高水中肥(HWMF)处理春梢全氮量最低, 为0.54 g/kg; 高水中肥(HWMF)处理梨树叶片全氮量最高为1.83 g/kg, 高水低肥(HWLF)处理全氮量最低为1.70 g/kg; 水氮耦合方案下果实全氮量较CK显著提高, 其中, 低水高肥(LWHF)处理果实全氮量最高, 为0.82 g/kg, 较CK提高了52.70%; 灌水下限和水氮耦合作用对春梢全氮量的影响差异不显著, 施氮量对春梢全氮量影响差异显著; 灌水下限、施氮量和耦合作用对叶片全氮量差异不显著; 灌水下限、施氮量和耦合作用对果实全氮量影响差异显著。2个时期梨树春梢和叶片全氮量均有: 叶片>春梢。梨树春梢、叶片和果实等3个器官全氮量相关性不显著, 春梢全氮量与果实全氮量呈弱正相关, 叶片全氮量与春梢和果实全氮量呈弱负相关。【结论】不同时期3个器官对水氮耦合处理响应规律不一, 适宜的水氮耦合处理能促进各器官对氮的吸收, 各器官全氮量相关性不显著。考虑梨树生长与生产和采收后生长分化, 推荐灌水下限为65%Fc, 施氮量为300~350 kg/hm²。

关键词: 水氮耦合; 黄金梨; 春梢全氮; 叶片全氮; 果实全氮; 相关分析

中图分类号: S274.1; S143

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022175

OSID:



刘亚南, 白美健, 李益农, 等. 黄金梨树氮素营养状况对不同水氮用量的响应[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(1): 8-15.

LIU Ya'nan, BAI Meijian, LI Yinong, et al. Change in Nitrogen Content in Golden Pear Trees in Response to Irrigation and Nitrogen Fertilization[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(1): 8-15.

0 引言

【研究意义】梨是我国主要种植果树之一^[1]。作为梨果的主产区, 京津冀地区始终存在水资源短缺与时空不均^[2-3], 养分不足与施用不合理等问题, 限制植株各器官对水分和养分吸收与利用, 进一步地制约梨果生产与产业发展。氮是植物矿质元素中的核心元素^[4-5], 是植物生长和产量形成的关键因素^[6]; 也是光合色素(包括叶绿素a和叶绿素b)的重要组成部分, 若氮素不足, 光合色素形成受阻, 抑制光合作用和光合产量, 进一步影响作物产量^[7]; 对植物体内起到调

节作用的激素(生长素、赤霉素和细胞分裂素等)也含有氮^[8]。植株营养器官养分量贮存是衡量果树营养状况的主要表征指标, 也是产量与果品提升的重要保障。叶片是树体器官中对土壤养分反应最敏感的, 其养分量可以代表树体对养分的吸收情况^[5]。相关研究表明^[9-12], 适宜提高土壤养分量有助于植株器官对养分的吸收。植株对养分的吸收不仅取决于土壤养分量, 而且还与土壤水分状况相关。灌溉与施肥是保障果树生长发育和生产中水分及养分需求的重要举措, 但传统水肥施用制度、措施与水肥施用观念落后, 造成植株器官养分量低、水肥利用率低, 引起土壤硝态氮残留量大, 甚至造成严重的水土环境污染^[13]。【研究进展】张芳芳等^[14]研究发现红富士生育期内叶片全氮质量分数最高, 果实全氮质量分数最低; 陈艳彬等^[15]研究发现, 叶片叶绿素量与含氮量正向相关。吴小宾^[16]研究发现使用施肥枪施肥能促进植株新生器官吸收

收稿日期: 2022-04-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401403); 国家自然科学基金项目(51822907)

作者简介: 刘亚南(1994-), 男, 博士研究生, 主要从事农业节水及水资源高效利用研究。E-mail: liuyn@iwhr.com

通信作者: 白美健(1974-), 女, 正高级工程师, 主要从事节水灌溉技术研究。E-mail: baimj@iwhr.com

利用养分,提高了氮素吸收利用率;郑丽燕^[17]研究发现小龄茶树的新梢氮、含钾量最高,随着树龄增加,根部氮含钾量逐渐提高;刘秀花等^[18]研究发现在同一灌水量下,随施氮量增加作物吸收量随之增加;任俊杰等^[19]研究发现提高“绿岭”核桃枝条含氮量有助于增加抗冻性;李鑫鑫等^[20-21]研究水肥耦合对作物各器官全氮量影响发现,水氮耦合作用对各器官全氮量影响显著;杨宙等^[22]研究发现水稻产量与分蘖期叶片全氮量正相关;江柱等^[23]研究发现,增施氮肥有效促进根系干物质对养分的吸收。【切入点】综上所述,诸多学者研究针对施肥或灌水方法以及水肥耦合制度对果树生长^[24-25]、产量和品质^[10,26]以及土壤养分^[27-28]等方面展开了研究,但针对京津冀区域成龄黄金梨树各器官全氮量对水氮耦合方案响应规律研究鲜有报道。【拟解决的关键问题】开展成龄黄金梨树水氮耦合试验,重点分析水氮耦合方案对果实膨大期和成熟期黄金梨树春梢、叶片全氮量和成熟期果实全氮量的影响,探明上述指标随灌水下限和施氮量的响应规律,为京津冀地区黄金梨树水、氮施用管理提供一定技术依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在圣泽林生态庄园的梨园内进行。生态庄园位于北京市大兴区安定镇,北纬 39°37'20",东经 116°25'52",属于暖温带半湿润大陆季风气候,多年平均温度 11.2 °C,多年平均降水量 556.4 mm。试验开始前,在试验区内随机选点取土(深度为 160 cm,每层厚度为 20 cm)风干后过筛,经马尔文激光粒度仪测得,试验田块土壤为均质粉砂壤土(国际制),质地均匀。0~100 cm 土层田间持水率为 35%(体积含水率)。果园内设有小型气象站可自动记录温度、风速、相对湿度和太阳辐射等参数。

1.2 试验设计

试验设定灌水下限和施氮量 2 个因素,每个因素设定 3 个水平(见表 1),即灌水下限:低水(LW: 55%*Fc*)、中水(MW: 65%*Fc*)、高水(HW: 75%*Fc*);施氮量:低肥(LF: 162 kg/hm²)、中肥(MF: 324 kg/hm²)、高肥(HF: 486 kg/hm²),正交组合设定 9 个水氮耦合处理,处理如下:低水低肥(LWLF)、低水中肥(LWMF)、低水高肥(LWHF)、中水低肥(MWLF)、中水中肥(MWMF)、中水高肥(MWHF)、高水低肥(HWLF)、高水中肥(HWMF)、高水高肥(HWHF),另设 1 个对照处理(CK),共计 10 个试验处理。其中,CK 不施肥,灌溉由园区管理人员依经验管理。

表 1 试验方案表

| Table 1 Trial protocol table | | | |
|------------------------------|---------------|--|---------------------------|
| 水平 | 灌水下限 | 灌水量/(m ³ ·hm ²) | 施氮量/(kg·hm ²) |
| 低 | 55% <i>Fc</i> | 790 | 162 |
| 中 | 65% <i>Fc</i> | 860 | 324 |
| 高 | 75% <i>Fc</i> | 1 140 | 486 |

注 表内 *Fc* 为田间持水率。

每个试验处理(小区)内定值 15 株黄金梨树,沿滴灌带方向,每 5 株黄金梨树作为一个重复,每个试验方案设定 3 次重复,每个试验小区长 45 m,宽 4 m。植株行间距为 4 m,株间距为 3 m。灌溉水源为地下水,氮肥选用当地常用的尿素(CO(NH₂)₂, N 46%),氮肥随水同时施入。

试验主要设备包括水泵、旋翼湿式水表、施肥泵及各级输配水管道系统和灌水器。灌水器为压力补偿式滴头,内径 20 mm,滴头间距 50 cm,滴头流量为 4 L/h。施肥泵为比例式施肥泵,并配有施肥桶装置,用于溶解肥料,灌水量由安装在首部的水表进行量测。

1.3 灌溉与施肥

水氮耦合田间试验开始前,为保障所有试验小区具有较为均一的土壤水分和养分量进行了大定额的灌水。每个试验小区布设 1 根 Trime 管,用于测定 0~120 cm 土层深度土壤含水率,当水氮耦合方案内 3 个小区土壤含水率的平均值低于试验方案设定的灌水下限时进行灌水(表 1)。

田间试验期间,氮肥分 3 次随水施入,分别为花展叶期(4 月 5 日,40%)、幼果期(5 月 7 日,20%)和果实膨大期(7 月 22 日,40%),施氮量见表 1。

1.4 采样及全氮测定方法

分别于果实膨大期和成熟期在各个试验小区内随机选取一株黄金梨树,并在其上东、南、西、北 4 个方向上各选一枝春梢,并将选定春梢枝条与叶片分离,分别装入准备的试验用袋内^[29]。

成熟期,采摘时在各重复小区内随机选取一株梨树并在其上随机选取一个梨果实,带回实验室^[30]。

将上述样品进行杀青、烘干、研磨等工作,研磨后植株春梢、叶片和果实粉末过 0.5 mm 筛,使用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,凯氏定氮法测定。各方案 3 次重复下春梢、叶片和果实全氮量取均值,作为该方案的春梢、叶片和果实的全氮量。

1.5 数据处理

使用 Microsoft Excel 2019 记录果实膨大期和成熟期春梢、叶片和果实全氮量值,并对数据进行整理与初步处理;使用 SPSS 25 进行两两多重比较,用 Least - significant different (LSD) 方法,分析各试验指标方案间差异;使用 SPSS 25 进行双因素方差分析,

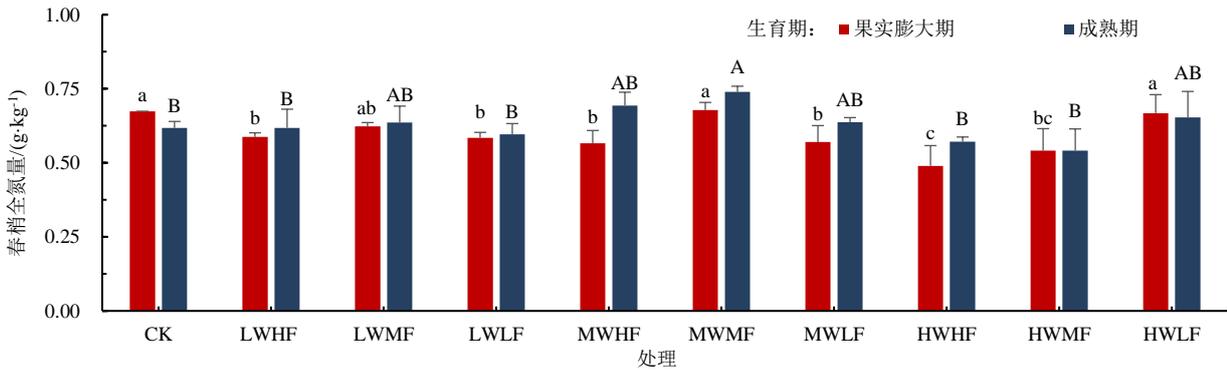
分析灌水下限、施氮量和水氮耦合作用对指标影响差异；使用 Origin 2020 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 春梢全氮量对水氮耦合响应分析

图 1 为果实膨大期和成熟期春梢全氮量值和方差分析结果，表 2 为各指标双因素方差分析结果。整体上，果实膨大期 MWMF 处理春梢全氮量最高，而 HWHF 处理春梢全氮量最低；各方案下春梢全氮量值

从大到小为 MWMF 处理 > CK > HWLF 处理 > LWMF 处理 > LWHF 处理 > LWLF 处理 > MWLF 处理 > MWHF 处理 > HWMF 处理 > HWHF 处理；LWLF、LWLF、MWHF、MWLF、HWHF 处理与 CK 差异显著 ($P < 0.05$)，其余水氮耦合处理与 CK 差异不显著 ($P > 0.05$)；水氮耦合处理间也存在显著差异，并且 HWHF 处理春梢全氮量显著低于其他水氮耦合处理 ($P < 0.05$)。



注 图内 a 和 A 分别代表不同时期方差分析结果，下同。

图1 果实膨大期和成熟期春梢全氮量

Fig.1 Total nitrogen content in spring shoot at fruit expansion and maturity stage

成熟期 MWMF 处理春梢全氮量最高为 0.74 g/kg，相对于 CK 提高了 37.62%；除 LWLF、HWHF 处理和 HWMF 处理外，其余水氮耦合处理成熟期春梢全氮量值均有提高。成熟期各处理春梢全氮量为 MWMF 处理 > MWHF 处理 > HWLF 处理 > MWLF 处理 > LWMF 处理 > LWHF 处理 > CK > LWLF 处理 > HWHF 处理 > HWMF 处理。除 MWMF 处理外，其他水氮耦合处理下春梢全氮量与 CK 差异不显著 ($P > 0.05$)，LWLF、LWLF、HWHF 处理和 HWMF 处理春梢全氮量与 MWMF 处理差异显著 ($P < 0.05$)。双因素方差分析结果表明 (表 2)，灌水下限和耦合作用对春梢全氮量影响差异不显著 ($P > 0.05$)，而施氮量对春梢全氮量影响差异显著 ($P < 0.05$)。

施氮量低于 250 kg/hm² 灌水量高于 1 100 m³/hm² 的 1/4 椭圆域。果实膨大期春梢全氮量随施氮量变化存在阈值，低于阈值时随着施氮量的提高而逐渐增加，高于阈值后增加缓慢甚至降低。在适宜的水、氮施用范围内，春梢全氮量随水、氮施用量的增加而增加。在不同施氮水平下春梢全氮量随灌水量变化趋势不一：当施氮量低于 250 kg/hm² 时，春梢全氮量随灌水量增加而逐渐提高；当施氮量高于 400 kg/hm² 时，春梢全氮量随灌水量增加呈负相关；当施氮量处于 250~400 kg/hm² 区间时，其值随灌水量的增加呈“Λ”型变化。在不同灌水水平时，当灌水量低于 1 025 m³/hm² 时，随着施氮量增加，全氮量变化趋势为“先增加后降低”，当灌水量高于 1 025 m³/hm² 时，随施氮量增加逐渐降低。

表 2 春梢全氮量双因素方差检验结果

Table 2 Two-factor variance test results of total nitrogen content in spring shoots

| 指标参数 | 春梢全氮量 | | 叶片全氮量 | | 果实全氮量 |
|------|-------|-----|-------|-----|-------|
| | 果实膨大期 | 成熟期 | 果实膨大期 | 成熟期 | 成熟期 |
| 灌水下限 | ns | ns | ns | ns | ** |
| 施氮量 | ** | * | ns | ns | **** |
| 水×氮 | ** | ns | ns | ns | **** |

注 ns 代表不显著；*、**、****分别代表在 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 和 $P < 0.001$ 水平下显著。

图 2 为果实膨大期春梢全氮量随水、氮施用量变化。整体上，果实膨大期梨树春梢全氮量较高值在施氮量为 350 kg/hm² 和灌水量为 900 m³/hm² 椭圆域和

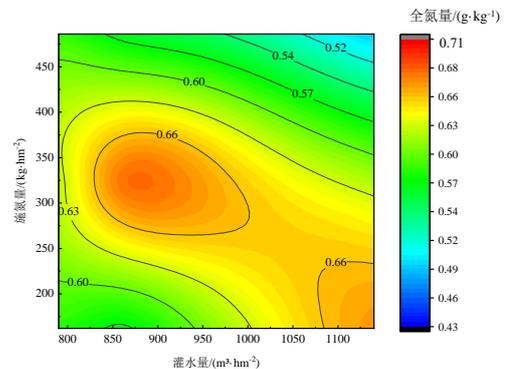


图2 果实膨大期春梢全氮量随水氮施用量

Fig.2 Total nitrogen content in spring shoot with the application of water and nitrogen at the fruit expansion stage

图3为成熟期春梢全氮量值随水、氮施用量变化。整体上，果实成熟期春梢全氮量较大值出现在施氮量为325 kg/hm²和灌水量为900 m³/hm²附近圆域，较小值出现在施氮量为350 kg/hm²和灌水量高于1100 m³/hm²右侧椭圆域。成熟期春梢全氮量随灌水量或施氮量的增加呈“Λ”型变化，即存在灌溉和施氮上限，低于上限时随灌水量或施氮量的增加而增加，高于阈值后随之降低。

2.2 叶片全氮量对水氮耦合响应分析

图4为叶片在果实膨大期和成熟期叶片全氮量及方差分析结果。总体上，水氮耦合方案下叶片全氮量与CK差异不显著($P>0.05$)。果实膨大期，MWMF处理叶片全氮量最高，为1.95 g/kg。各灌水水平下叶片全氮量均为中等施肥水平时最高。成熟期，叶片全氮大小顺序分别为HWMF处理>MWHF处理>

LWMF处理>MWLF处理>CK>LWLF处理>MWMF处理>HWHF处理>LWHF处理>HWLF处理，HWMF处理最大为1.83 g/kg，HWLF处理最小为1.70 g/kg。

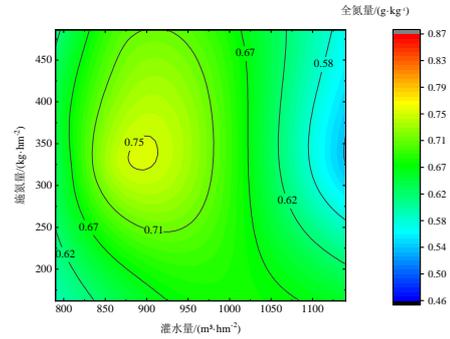


图3 成熟期春梢全氮量随水氮施用量变化

Fig.3 Change of total nitrogen content in spring shoots with the application of water and nitrogen at maturity stage

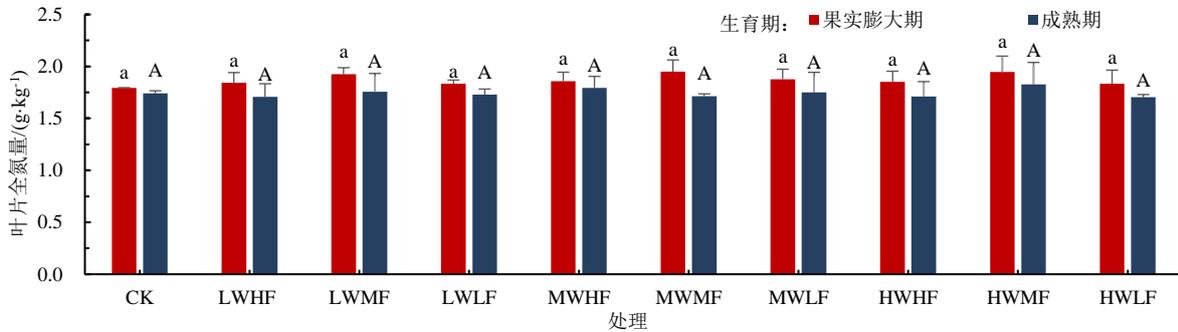


图4 果实膨大期和成熟期叶片全氮量

Fig.4 Total nitrogen content in leaf at fruit expansion and maturity stage

果实膨大期和成熟期叶片全氮量在相同灌水下限时，随着施氮量的增加呈“Λ”型变化，即施氮量对提高叶片养分存在阈值，阈值下随施氮量的增加而提高，超过阈值后随施用量的增加而降低。双因素方差分析结果表明（表2），果实膨大期和成熟期叶片全氮量对灌水下限、施氮量和水、氮耦合作用响应差异不显著($P>0.05$)。

图5给出了叶片果实膨大期全氮量随水、氮施用量变化趋势。整体上，叶片全氮量随水、氮施用量变化大致关于中心对称。灌水量和施氮量对提高叶片全氮量存在阈值，低于灌水阈值时随施用量增加而逐渐增加，高于阈值后，随用量的增加而逐渐降低。

图6给出了成熟期叶片全氮随水、氮施用量变化趋势。整体上，全氮量较大值出现在灌水量为950 m³/hm²和施氮量400 kg/hm²附近圆域，较小值出现在施氮量低于200 kg/hm²和灌水量为900 m³/hm²附近圆域内。成熟期叶片全氮量随灌水量变化在不同施氮量下变化趋势不一，当施氮量低于250 kg/hm²时，随着施氮量的增加而先降低后增加，当施氮量高于250 kg/hm²时，随着灌水量的增加呈“Λ”型变化。果实成熟期该值在各灌水水平下随施氮量呈先增加后降低

趋势。适宜水氮施用量有助于提高叶片对氮肥的利用。

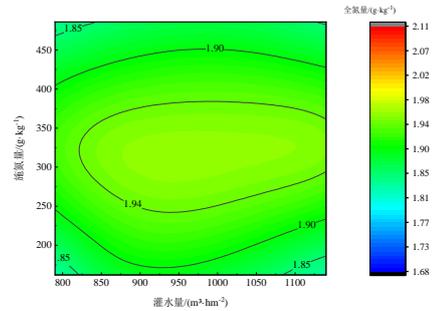


图5 果实膨大期叶片全氮量随水氮施用量变化图

Fig.5 Total nitrogen content in leaf with application of water and nitrogen in growth period

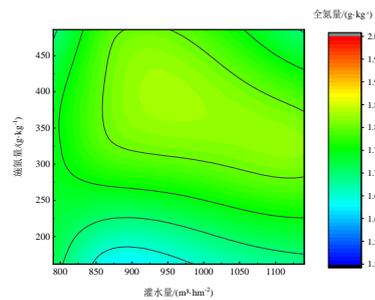


图6 成熟期叶片全氮随水氮施用量变化趋势

Fig.6 Total nitrogen in leaf with application of water and nitrogen at the end of growth period

2.3 果实全氮量对水氮耦合响应分析

图 7 给出了成熟期果实全氮量值及差异性检验结果。各处理全氮值均高于 CK，所有处理与 CK 的全氮量差异显著 ($P < 0.05$)，部分水氮耦合处理间差异显著 ($P < 0.05$)。各处理下果实全氮量为：LWHF 处理 > MWHF 处理 > LWMF 处理 > HWLF 处理 > HWHF 处理 > MWMF 处理 > LWLF 处理 > HWMF 处

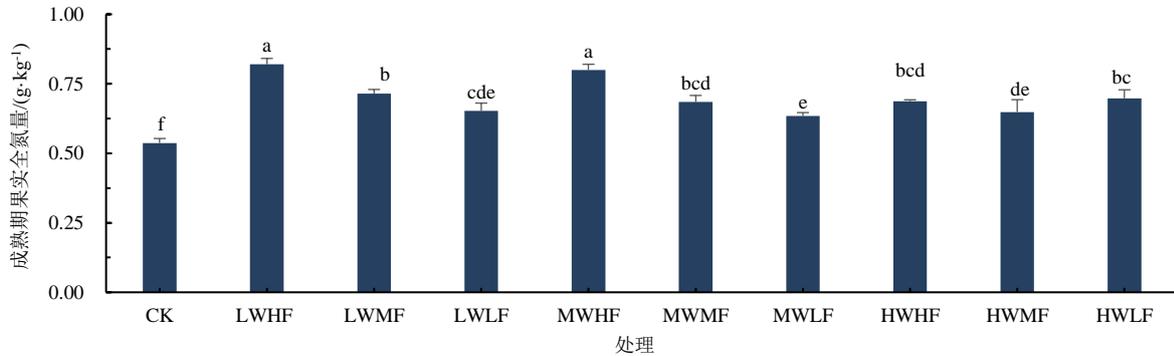


图7 果实全氮量

Fig.7 Total nitrogen content of fruit

图 8 给出了果实全氮量随水、氮施用量变化趋势。果实全氮量随水、氮施用量变化较为复杂，当灌水量低于 $1075 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 时，随着施氮量的增加而增加，当灌水量高于 $1075 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 时随着施氮量的增加先降低后增加。并且图 8 左上方区域相邻梯度等高线距离较其他区域近，这表明该区域果实全氮量对灌水量和施氮量多寡更为明显，受二者投入量的影响大。

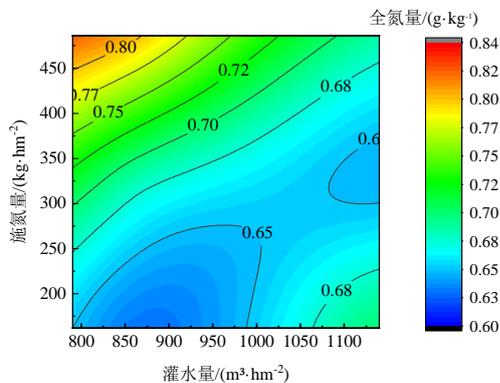


图8 果实全氮量随水氮施用量变化

Fig.8 Changes of fruit total nitrogen content with application of water and nitrogen

2.4 各器官养分相关性分析

表 3 为梨树春梢、叶片和果实全氮量的相关分析。成熟期春梢、叶片和果实的全氮量不具有显著相关性 ($P > 0.05$)，春梢全氮量与果实全氮量正相关，相关系数为 0.31，与叶片全氮量负相关，其系数为 -0.26，叶片全氮量与春梢和果实全氮量负相关，相关系数为 -0.09，可知，春梢全氮量与叶片全氮量相关性高于果实全氮和叶片全氮量。

理 > MWHF 处理 > CK，各处理分别较 CK 提高了 52.70%、48.91%、33.15%、29.92%、28.00%、27.44%、21.42%、20.73%、18.13%。在低水和中水灌溉下，果实全氮量与施氮量正相关；高水灌溉下全氮量与施氮量呈“V”型变化。双因素分析结果表明，成熟期果实全氮量受灌水量、施氮量和水氮耦合作用影响差异显著 ($P < 0.05$)。

表 3 各器官全氮量相关性结果

Table 3 Results of total nitrogen content correlation in each organ

| 指标 | 春梢全氮量 | 叶片全氮量 | 果实全氮量 |
|-------|-------|-------|-------|
| 春梢全氮量 | 1.00 | - | - |
| 叶片全氮量 | -0.26 | 1.00 | - |
| 果实全氮量 | 0.31 | -0.09 | 1.00 |

3 讨论

氮素是构成植株内蛋白质、遗传物质、激素和各种酶的重要物质^[31]，是植株生长的重要元素之一^[32]。植株各器官养分对植株生长发育具有重要作用^[24]，适宜水氮耦合能促进梨树各器官对养分的吸收与利用，各器官氮素营养状况对梨树生长、生产与果实品质的提升具有重要意义。本研究结果表明，梨树春梢全氮量在不同生育期对水氮耦合响应趋势不一：果实膨大期春梢全氮量受施氮量和耦合作用影响差异显著，而成熟期春梢全氮量仅对施氮量多寡影响差异显著 ($P < 0.05$)。在果实膨大期和成熟期，部分水氮耦合处理春梢全氮量低于 CK，这可能因为两方面原因造成，一方面春梢对氮的吸收不仅受施氮量影响显著，同时水氮耦合作用也对春梢全氮量影响差异显著；另一方面，水氮耦合促进了春梢生长量的增加，保障树势和产量形成的同时也消耗了大量的养分，造成了部分水氮耦合方案下春梢全氮量低于 CK。对比果实膨大期和成熟期春梢全氮量（图 1），除 CK 和 HWLF 处理外，其余处理下成熟期均高于果实膨大期，主要因为这 2 种情况都是肥少水多，此时春梢生长和果实膨大以及其他生理过程消耗的养分值高于春梢从土壤中吸收量，由于春梢生长或土壤养分不足，引起成

熟期养分量降低。这表明在植株生长过程中, 通过增施水氮在保障了植株生长发育和果实生产的同时还增加了春梢内的营养储备, 为春梢生长发育、酶与激素形成提供物质, 为再生产提供保障^[33]。

叶片是植物吸收养分最敏感的器官, 是表征植物营养状态的有效指标^[34]。氮素是形成光合色素(包括叶绿素 a 和叶绿素 b)的重要物质, 光合色素多寡是影响光合速率和光合产物的重要因子。本研究结果表明, 果实膨大期, 水氮耦合处理下叶片全氮量较 CK 均有所提高, 增施氮肥有助于叶片全氮量的提高, 但存在阈值, 叶片全氮量随施氮量变化均为中肥处理高于中低肥处理。在果实膨大期和成熟期, 叶片全氮量对水、氮和二者耦合作用响应不显著($P>0.05$)。成熟期叶片全氮量低于果实膨大期叶片全氮值, 这与其他学者研究结果相一致^[35-36], 这种降低是由于叶片中贮藏的养分向其他器官转移, 满足其他器官生长发育需求^[37]。

水氮耦合处理下梨果实全氮量显著高于 CK ($P<0.05$), 这表明水氮耦合处理有助于果实对养分的吸收利用, 这与陆华天等^[38]结论一致。中低灌水水平下, 果实全氮量随施氮量的增加而逐渐增加, 并且中低水平时, 各施氮量下果实全氮量差异显著, 随着施氮量的增加, 果实全氮量增加 ($P<0.05$)。高灌水水平时, 全氮量变化呈“V”型变化, 这与该灌溉水平下, 叶片全氮量存在关系, 由图 4 所示, 高灌溉水平下叶片全氮量随施氮量增加呈先增加后降低的趋势。

4 结论

1) 不同时期不同器官全氮量最高时对应的水氮耦合方案不完全一致。膨大期, 春梢、叶片全氮量最高时对应水氮耦合都为 MWMF 处理; 成熟期, MWMF 处理春梢全氮量最高, HWMF 处理叶片全氮量最高, LWHF 处理果实全氮量最高。

2) 各器官全氮量相关性不显著, 果实与春梢全氮量呈弱正相关, 与叶片几乎不相关; 而春梢与叶片全氮量呈弱负相关。

3) 推荐灌水下限为 65%Fc, 施氮量为 300~350 kg/hm² 为适宜的水氮耦合处理。

参考文献:

[1] 于会丽, 司鹏, 邵微, 等. 海藻酸水溶肥对梨树生长与果实产量及品质的影响[J]. 果树学报, 2019, 36(5): 603-611.
YU Huili, SI Peng, SHAO Wei, et al. Effect of water soluble alginic acid fertilizer on the growth, yield and quality of pear[J]. Journal of Fruit Science, 2019, 36(5): 603-611.

[2] 刘钰, 汪林, 倪广恒, 等. 中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 6-12.
LIU Yu, WANG Lin, NI Guangheng, et al. Spatial distribution

characteristics of irrigation water requirement for main crops in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(12): 6-12.

[3] 宋先松, 石培基, 金蓉. 中国水资源空间分布不均引发的供需矛盾分析[J]. 干旱区研究, 2005, 22(2): 162-166.
SONG Xiansong, SHI Peiji, JIN Rong. Analysis on the contradiction between supply and demand of water resources in China owing to uneven regional distribution[J]. Arid Zone Research, 2005, 22(2): 162-166.

[4] MILLER A J, CRAMER M D. Root nitrogen acquisition and assimilation[J]. Plant and Soil, 2005, 274(1/2): 1-36.

[5] 樊红柱. 苹果树体生长发育、养分吸收利用与累积规律[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006.
FAN Hongzhu. The growth, nutrients uptake, utilization and accumulation in apple tree[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2006.

[6] FRINK C R, WAGGONER P E, AUSUBEL J H. Nitrogen fertilizer: Retrospect and prospect[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1999, 96(4): 1 175-1 180.

[7] 李伏生, 康绍忠, 张富仓. CO₂浓度、氮和水分对春小麦光合、蒸散及水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(3): 387-393.
LI Fusheng, KANG Shaozhong, ZHANG Fucang. Effects of CO₂ enrichment, nitrogen and water on photosynthesis, evapotranspiration and water use efficiency of spring wheat[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(3): 387-393.

[8] 李保珠, 赵翔, 安国勇. 赤霉素的研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(1): 1-5.
LI Baozhu, ZHAO Xiang, AN Guoyong. Recent advances in research of gibberellin[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(1): 1-5.

[9] 蔡依林. 氮肥运筹对土壤肥力及辣椒生长的影响特征[D]. 扬州: 扬州大学, 2021.
CAI Yilin. Effects of nitrogen application on soil fertility and peppers growth[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021.

[10] 袁睿龙. 河北矮砧密植苹果园水肥优化技术研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2020.
YUAN Ruilong. Study on water and fertilizer optimization technology of apple orchard with dwarf stock and close planting in Hebei Province[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2020.

[11] 赵迪. 水氮耦合对蓝莓土壤氮素分布的影响[D]. 贵阳: 贵州大学, 2017.
ZHAO Di. Effects of water and nitrogen coupling on nitrogen distribution in the soil of blueberry[D]. Guiyang: Guizhou University, 2017.

[12] 杜甫, 童旭华, 姬小明, 等. 水肥耦合对植烟土壤理化性质和烤烟产质量的影响[J]. 江西农业学报, 2021, 33(3): 67-74.
DU Fu, TONG Xuhua, JI Xiaoming, et al. Effects of water and fertilizer coupling on physical and chemical properties of tobacco-growing soil and yield and quality of flue-cured tobacco[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2021, 33(3): 67-74.

[13] 刘占军, 祝慧, 张振兴, 等. 我国苹果园施肥现状、土壤剖面氮磷分布特征及减肥增效技术[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(7): 1 294-1 304.
LIU Zhanjun, ZHU Hui, ZHANG Zhenxing, et al. Current status of fertilization, distribution of N and P in soil profiles and techniques for reducing fertilizer application and improving efficiency in China's apple orchards[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(7): 1 294-1 304.

[14] 张芳芳, 韩明玉, 张立新, 等. 红富士苹果对初夏土施¹⁵N-尿素的吸收、分配和利用特性[J]. 果树学报, 2009, 26(2): 135-139.
ZHANG Fangfang, HAN Mingyu, ZHANG Lixin, et al. Studies on the property of absorption and partition of ¹⁵N in Fuji apple trees using ¹⁵N-labelled urea in early summer[J]. Journal of Fruit Science, 2009, 26(2): 135-139.

[15] 陈艳彬, 张永发, 王文斌, 等. 橡胶树叶片氮素营养特性及其对施氮

- 量的响应[J]. 热带作物学报, 2019, 40(5): 831-838.
- CHEN Yanbin, ZHANG Yongfa, WANG Wenbin, et al. Nitrogen nutrition characteristics of rubber tree leaves and its response to nitrogen application rate[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2019, 40(5): 831-838.
- [16] 吴小宾. 施肥枪施肥对桃树氮素吸收分配及其生长特性的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2011.
- WU Xiaobin. Study of fertilization with fertilizer applicator on nitrogen absorption, distribution and growing characteristics of peach tree[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2011.
- [17] 郑丽燕. 福建铁观音茶园钾供应能力及测土配方施肥研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2008.
- ZHENG Liyan. Study on nitrogen and potassium supply capability and soil testing and fertilizer recommendation of tieguanyin tea plantations in Fujian Province[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2008.
- [18] 刘秀花, 卢杰, 齐燕, 等. 水氮耦合对作物氮素吸收利用与迁移转化的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(4): 1-12.
- LIU Xiuhua, LU Jie, QI Yan, et al. The effects of water-nitrogen coupling on uptake and transformation of nitrogen in soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(4): 1-12.
- [19] 任俊杰, 赵爽, 马华冰, 等. ‘绿岭’核桃枝条贮藏营养与晚霜冻害发生程度及树体恢复关系的研究[J]. 河北农业大学学报, 2015, 38(3): 34-40.
- REN Junjie, ZHAO Shuang, MA Huabing, et al. The relationships between nourishment storage in ‘Lüling’walnut shoots with degree of late frost injury and recovery of the trees[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2015, 38(3): 34-40.
- [20] 蔡晓军, 纪祥龙, 邵红英, 等. 水肥耦合对烤烟各器官干重及养分吸收的影响[J]. 湖南农业科学, 2020(2): 37-39, 43.
- CAI Xiaojun, JI Xianglong, SHAO Hongying, et al. Effects of water and fertilizer coupling on dry weight and nutrient absorption of flue-cured tobacco[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2020(2): 37-39, 43.
- [21] 李鑫鑫. 水肥耦合对棉花蒸腾量及养分吸收利用影响研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2020.
- LI Xinxin. Effects of water and fertilizer coupling on transpiration and nutrient absorption and utilization of cotton[D]. Shihezi: Shihezi University, 2020.
- [22] 杨宙, 何虎, 王芬, 等. 不同氮肥水平对杂交早稻生理指标及产量的影响[J]. 江西农业学报, 2017, 29(10): 6-9.
- YANG Zhou, HE Hu, WANG Fen, et al. Effects of different nitrogen fertilizer levels on physiological indexes and yield of hybrid early rice[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2017, 29(10): 6-9.
- [23] 江柱, 张江辉, 白云岗, 等. 膜下咸水滴灌水肥盐调控对棉花盐离子、养分吸收及干物质分配的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(2): 59-67.
- JIANG Zhu, ZHANG Jianghui, BAI Yungang, et al. The impact of mulched drip fertigation with saline water on uptake of ions and nutrients by cotton[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(2): 59-67.
- [24] 石美娟, 杨凯, 何美美, 等. 磷钾耦合对富士果树生长及果实品质的影响[J]. 北方园艺, 2021(3): 33-41.
- SHI Meijuan, YANG Kai, HE Meimei, et al. Effects of the coupling of phosphorus and potassium on growth and fruit quality of fuji fruit tree[J]. Northern Horticulture, 2021(3): 33-41.
- [25] 宁改星, 马宗桓, 毛娟, 等. 施氮量对荒漠区‘蛇龙珠’葡萄叶片质量的影响[J]. 果树学报, 2019, 36(9): 1 150-1 160.
- NING Gaixing, MA Zonghuan, MAO Juan, et al. Effects of nitrogen application rates on the leaf quality of ‘Cabernet Gernischt’ in desert areas[J]. Journal of Fruit Science, 2019, 36(9): 1 150-1 160.
- [26] 田歌, 李慧峰, 田蒙, 等. 不同水肥一体化方式对苹果氮素吸收利用特性及产量和品质的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(6): 1 867-1 874.
- TIAN Ge, LI Huifeng, TIAN Meng, et al. Effects of different integration of water and fertilizer modes on the absorption and utilization of nitrogen fertilizer and fruit yield and quality of apple trees[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(6): 1 867-1 874.
- [27] 孔祥俊. 黄土高原苹果园养分投入及土壤氮素累积特征[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- KONG Xiangjun. Nutrient input and soil nitrogen accumulation characteristics of apple orchard in loess plateau[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2019.
- [28] 常天然. 两种绿肥种植模式对山地果园土壤水分和养分的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- CHANG Tianran. Effects of two green manure planting patterns on soil moisture and nutrients of mountain orchards in northern shaanxi's loess hilly and gully region[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2019.
- [29] 代智光. 黄土高原涌泉根灌土壤水氮运移特性与苹果树水氮耦合效应研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- DAI Zhiguang. The research on water and nitrogen transport characteristics and the coupling effect of water and nitrogen on apple trees under surge root irrigation in loess plateau[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [30] 张芳芳. 初夏施肥对红富士苹果氮代谢与生长发育的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- ZHANG Fangfang. Effect of fertilization in early summer on nitrogen metabolism and characteristics of growth and development of fuji apple tree[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2009.
- [31] FEIGENBAUM S, BIELORAI H, ERNER Y, et al. The fate of ¹⁵N labeled nitrogen applied to mature citrus trees[J]. Plant and Soil, 1987, 97(2): 179-187.
- [32] 朱清华. 设施油桃生长发育规律及氮素营养特性研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2003.
- ZHU Qinghua. Studies on the rules of growth and development of nectarina and characteristics of N in greenhouse[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2003.
- [33] 邵蕾, 张民, 陈学森, 等. 控释氮肥对土壤和苹果树氮含量及苹果产量的影响[J]. 园艺学报, 2007, 34(1): 43-46.
- SHAO Lei, ZHANG Min, CHEN Xuesen, et al. Effects of controlled release nitrogen fertilizer on yield and nitrogen content of soil and apple tree[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2007, 34(1): 43-46.
- [34] 张慧. 水肥耦合对油茶林地土壤和植株氮磷钾养分的影响[D]. 南昌: 江西农业大学, 2013.
- ZHANG Hui. The coupling effects of water and fertilizer on the N P K nutrients of camellia oleifera soil and plant[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2013.
- [35] 刘和, 杨佩芳, 古润泽, 等. 短枝型苹果叶片及果实内氮磷钾含量研究[J]. 华北农学报, 1997, 12(3): 126-130.
- LIU He, YANG Peifang, GU Runze, et al. A study on the content of N, P, K in the leaves and fruit of spur type apple[J]. Acta Agriculturae Boreall-Sinica, 1997, 12(3): 125-129.
- [36] 王冲. 渭北旱塬苹果园水肥一体化技术研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- WANG Chong. Study of fertigation technology in apple orchard of Weibei dry highland[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2020.
- [37] 梁敬. 太行山低山丘陵区苹果园优化水肥效应研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2019.
- LIANG Jing. Effects of optimal water and fertilizer in apple orchard in Taihang Mountain hilly area[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2019.
- [38] 陆华天. 膜下滴灌葡萄水肥耦合对氮素吸收利用的影响研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2019.
- LU Huatian. Effects of water and fertilizer coupling on nitrogen absorption and utilization under drip irrigation[D]. Shihezi: Shihezi University, 2019.

Change in Nitrogen Content in Golden Pear Trees in Response to Irrigation and Nitrogen Fertilization

LIU Ya`nan^{1,2}, BAI Meijian^{1*}, LI Yinong¹, ZHANG Baozhong¹, SHI Yuan¹, WU Xianbing³, SHI Licheng¹

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 2. China Agricultural University, Beijing 100083, China;

3. Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China)

Abstract: **【Background and objective】** Gold pear is a main fruit in northern China and its production relies on irrigation and fertilization. The purpose of this paper is to study the effects of different combinations of irrigation and nitrogen-fertilization on nitrogen uptake by roots and its translocation in the trees. **【Method】** The experiment was conducted in an orchard; it consisted of three irrigation treatments by keeping the lowest soil water content controlled for irrigation at 75 (HW), 65 (MW) and 55% (LW) of the field capacity, respectively, and three nitrogen treatments by applying 486 kg/hm² (HF), 324 kg/hm² (MF) and 162 kg/hm² (LF), respectively. Standard irrigation and fertilization used by local farmers was taken as the control (CK). In each treatment, we measured nitrogen content in different parts of the tree at different growth stages. **【Result】** At fruit-expansion stage, the total nitrogen content in spring shoots and leaves were the highest in MW+MF, increasing by 26.20% and 8.66% respectively, compared to CK; the total nitrogen content differed significantly in spring shoots but not in leaves between the treatments. At maturity stage, the total nitrogen content in spring shoots was the highest in MW+MF, reaching 0.74 g/kg, and least in HW +MF, dropping to 0.54 g/kg. The total nitrogen content in the leaves in HW+MF was the highest, reaching 1.83 g/kg, and least in HW+LF being 1.70 g/kg. The nitrogen content in fruits in LW+HF was the highest, reaching 0.82 g/kg, a 52.70% increase compared to CK. The treatments did not result in considerable changes in total nitrogen contents in spring shoots and leaves, but significantly changed the total nitrogen contents in shoots and fruits. Correlation analysis did not find correlation between total nitrogen contents in spring shoots, leaves and fruits. The total nitrogen content in spring shoots and fruit were positively but insignificantly correlated, while total nitrogen content in leaves was negatively but insufficiently correlated with the total nitrogen content in spring shoots and fruits. **【Conclusion】** For all treatments we compared, keeping the lowest soil water controlled for irrigation at 65% of the field capacity combined with 300~350 kg/hm² of nitrogen fertilization is optimal for yield and fruit quality of the golden pear in the studied area.

Key words: water-nitrogen coupling; golden pear; spring shoot total nitrogen; leaf total nitrogen; fruit total nitrogen; related analyze

责任编辑：赵宇龙