

滴灌节水减氮对苹果幼树生长与光合特征的影响

周罕觅, 孙旗立, 牛晓丽*, 陈佳庚, 马林爽, 苏裕民, 李纪琛
(河南科技大学 农业装备工程学院, 河南 洛阳 471003)

摘要:【目的】探寻北方半干旱地区滴灌条件下适宜苹果幼树生长的最佳节水减氮水肥管理制度。【方法】设置灌水量与施肥量 2 个因素。其中, 灌水量设置 3 个水平, 分别维持土壤含水率占田间持水率的比例为 75%~90% (W1)、60%~75% (W2)、45%~60% (W3); 施肥量设置 4 个水平, N-P₂O₅-K₂O 施用量分别为 18-12-6 g/株 (F1)、15-12-6 g/株 (F2)、12-12-6 g/株 (F3)、9-12-6 g/株 (F4), 分析不同灌水量与施肥量对苹果幼树生长和光合特征的影响。【结果】2 a 试验中, 不同水肥调控下苹果幼树各生育期植株生长量、基茎生长量和叶面积最大值基本均出现在 F2W2 处理, 轻度水分亏缺与适当降低施肥量有利于苹果幼树生长。苹果幼树叶片叶绿素相对量 (SPAD) 在萌芽开花期开始增加, 在其他生育期均表现为 F1 施肥水平>F2 施肥水平>F3 施肥水平>F4 施肥水平, 在坐果膨大期和成熟期均表现为 W1 灌水水平>W2 灌水水平>W3 灌水水平, 2 a 试验中最大值均出现在 F1W1 处理。Pn 和 Tr 基本上随施肥量和灌水量的增加而增加, 最大的水分利用效率分别出现在 F1W2 处理和 F2W2 处理, 分别相比 F1W1 处理提高了 8.6%和 5.3%。苹果幼树植株生长量、叶面积、SPAD 及光合指标之间均具有较好的相关性。【结论】本试验条件下, F2W2 处理是苹果幼树种植的最佳水肥管理制度, 可为北方半干旱区滴灌条件下的苹果幼树节水减氮研究提供理论依据。

关键词: 滴灌; 节水减氮; 生长特征; 光合特征; 苹果幼树

中图分类号: S274

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2023211

OSID:



周罕觅, 孙旗立, 牛晓丽, 等. 滴灌节水减氮对苹果幼树生长与光合特征的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(11): 49-57.
ZHOU Hanmi, SUN Qili, NIU Xiaoli, et al. Effect of Saving-water Drip Irrigation and Nitrogen Reduction on Growth and Photosynthetic Characteristics of Young Apple Tree[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(11): 49-57.

0 引言

【研究意义】我国是农业大国, 果树种植面积、产量及消费量均位居世界第一^[1]。苹果在我国水果产业中占有重要地位, 产量占世界苹果产量的近 60%, 苹果主产区主要分布在温差大、光照资源丰富、降水适中的北方半干旱地区, 该类地区苹果产量占全国苹果总产量的 80%以上^[2]。目前, 北方半干旱地区苹果种植的灌溉方式粗放、缺乏科学指导^[3]。同时, 苹果种植业普遍存在化肥施用过量的情况, 灌水量与施肥量搭配不合理导致果园土壤酸化、板结、果实品质下降^[4]。因此, 建立科学合理的果树节水减氮制度对于促进苹果生长发育具有重要意义。【研究进展】土壤水分和养分是维持果树生长发育的基础, 水肥调控对果树的生长发育影响较大^[5], 滴灌

水肥一体化技术的节水、节肥效果显著^[6]。滴灌水肥一体化技术对甘蔗的生长发育和产量影响显著, 相同产量水平下可减施氮肥 25%^[7]; 降低施肥量不会改变桃树的氮素分配, 合理的灌溉施肥制度可以促进桃树的养分积累, 增大冠层体积^[8]; 与常规施肥处理相比, 在开花前进行节水减氮处理的苹果叶片净光合速率、叶绿素量和长梢数量均有显著提高^[9]; 滴灌水肥调控下, 减少灌水量可提高矮砧富士苹果幼树的水分利用效率^[10]; 滴灌条件下, 轻度减氮处理可提高苹果幼树的叶片叶绿素相对量 (SPAD)^[11]; 滴灌条件下的水分调控对苹果叶片光合速率、蒸腾速率和水分利用率影响显著, 且轻度干旱胁迫有助于光合速率的提高^[12]。【切入点】苹果幼树生长的优劣直接决定了收获期挂果数量、产量及品质。目前, 国内围绕滴灌节水减氮制度的研究主要集中在设施农业中经济价值较高的作物, 对于苹果的研究也主要集中在成熟果树, 而对苹果幼树的滴灌节水减氮制度研究甚少。【拟解决的关键问题】为此, 设置不同灌水量与施肥量, 研究灌水量与施肥量对苹果幼树生长和光合特征的影响, 探寻北方半干旱地区适宜苹果幼树生长的最佳灌溉施肥组合, 以期

收稿日期: 2023-05-13 修回日期: 2023-06-16 网络出版日期: 2023-11-09
基金项目: 国家自然科学基金项目 (51909079, 52379039); 河南省科技攻关计划项目 (212102110035); 河南科技大学青年骨干教师项目 (13450001)
作者简介: 周罕觅 (1986-), 男, 副教授, 博士, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: zhouhm@163.com
通信作者: 牛晓丽 (1985-), 女, 副教授, 博士, 主要从事作物需水过程与调控研究。E-mail: niuxiaoli88@126.com
©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

为苹果节水减氮高效种植提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区与试验材料概况

本试验于 2021 年 3 月—2022 年 11 月在河南科技大学西苑校区果园试验棚内进行（东经 112°38′，北纬 34°67′）。试验区海拔高度为 172 m，试验地属于北方半干旱地区，年平均气温介于 12~15 ℃，年平均降水量介于 550~600 mm，降水多集中在 7—9 月，年平均蒸发量为 1 200 mm，无霜期为 218 d，年平均日照时间为 2 291.6 h。试验采用桶栽种植的方式，供试苹果树型为“烟富 8 号”苹果幼树（基砧为平邑甜茶），桶栽土壤为褐土，土壤经自然风干、研磨后过 5 mm 筛，去除杂质后混合均匀。填装土壤体积质量控制在 1.4 g/cm³，每桶装土质量均为 30 kg，供试土壤硝态氮量为 15.69 mg/kg，铵态氮量为 6.41 mg/kg，速效磷量为 12.6 mg/kg，速效钾量为 145 mg/kg，pH 值为 7.96，田间质量持水率为 24.1%。

1.2 试验设计

试验设置灌水量与施肥量 2 个因素。其中，灌水量设置 3 个水平，分别维持土壤含水率占田间持水率的比例为 75%~90% (W1)、60%~75% (W2)、45%~60% (W3)；施肥量设置 4 个水平，N-P₂O₅-K₂O 施用量分别为 18-12-6 g/株 (F1)、15-12-6 g/株 (F2)、12-12-6 g/株 (F3)、9-12-6 g/株 (F4)。试验采用完全组合设计，共 12 个处理，每个处理重复 3 次。采用滴灌水肥一体化技术进行灌水和施肥，使用 TDR 土壤水分仪定期测定土壤含水率，试验期间当土壤含水率低于下限值则进行灌水处理（3 个灌水水平下的土壤含水率下限分别为 75%、60%和 45%）。肥料在 3、6、7 月分 3 次随水施用。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 植株生长量和基茎生长量测量

测定基砧部标记点至树顶最高点的高度作为植株生长量，从基砧部标记点开始，采用十字交叉法测量树体直径后取平均值作为基茎生长量。

1.3.2 叶面积测量

植株叶面积采用 Li-3000C（美国 Li-Cor 公司）手持式叶面积仪测定，随机选取上中下各方向的叶片 10 个，测定后取平均值作为单片叶面积，单株叶面积为单片叶面积与叶片数的乘积。

1.3.3 净光合速率和蒸腾速率测定

在苹果坐果膨大期，随机选择某晴天的上午 10:00，使用 Li-6400 型光合测定仪（美国 Li-Cor 公司）对苹果幼树中上部的完整叶片净光合速率（*P_n*）

和蒸腾速率（*T_r*）进行测定。每株苹果幼树选择 3 片叶测定。

1.3.4 SPAD 测定

使用 SPAD-502Plus 仪（日本柯尼卡美公司）测定植株叶片的 SPAD。每棵果树随机选取上中下各方向的 12 片叶子后取平均值，测量位置为叶片叶柄一侧 2/3 处，生长期每 2 周测量 1 次。

1.3.5 叶片瞬时水分利用效率（*WUE*, μmol/mol）

叶片瞬时水分利用效率计算式为：

$$WUE = \frac{P_n}{T_r} \quad (1)$$

1.4 数据处理

采用 Excel 2019 进行数据分析和图表绘制；使用 SPSS 26 软件进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 滴灌节水减氮对苹果幼树生长指标的影响

由表 1 可知，2021—2022 年各生育期植株生长量的最大值均出现在 F2W2 处理（除 2021 年的新梢旺长期外），2 a 中植株生长量最小值均出现在 F4W3 处理。2021 年，F1—F4 施肥水平下 3 个灌水水平的苹果幼树全生育期植株生长总量分别为 226.30、234.05、199.55、165.34 cm，F1、F3、F4 施肥水平分别较 F2 施肥水平减少了 3.3%、14.7%、29.4%；2022 年 F1—F4 施肥水平下 3 个灌水水平的苹果幼树全生育期植株生长总量分别为 204.90、212.45、168.70、136.45 cm，F1、F3、F4 施肥水平分别较 F2 施肥水平减少了 3.6%、20.6%、35.8%。2021 年，W1—W3 灌水水平下 4 个施肥水平的植株生长总量分别为 288.43、305.20、231.61 cm；2022 年，W1—W3 灌水水平下的 4 个施肥水平植株生长总量分别为 272.25、281.25、169.00 cm。

由表 2 可知，F2W2 处理各生育期基茎生长量最大，F4W3 处理最小值。2021 年，F1—F4 施肥水平下 3 个灌水水平的苹果幼树全生育期基茎生长总量分别为 13.29、14.57、11.54、9.27 mm，F1、F3、F4 施肥水平分别较 F2 施肥水平减少了 8.8%、20.8%、36.4%；2022 年，F1—F4 施肥水平下 3 个灌水水平的苹果幼树全生育期基茎生长总量分别为 14.31、16.27、12.49、8.99 mm，F1、F3、F4 施肥水平分别较 F2 施肥水平减少了 12.0%、23.2%、44.7%。2021 年，W1—W3 灌水水平下 4 个施肥水平的基茎生长总量分别为 18.88、19.37、10.42 mm；2022 年分别为 21.10、20.56、10.40 mm。由表 3 可知，苹果幼树各生育期叶面积最大值均出现在 F2W2 处理，最小值均出现在 F4W3 处理。

表 1 水肥调控对苹果幼树各生育期植株生长量的影响

Table 1 Effect of water and fertilizer regulation on plant growth of young apple trees at various growth stages cm							
年份	施肥处理	灌水处理	萌芽开花期	新梢旺长期	坐果膨大期	果实成熟期	全生育期
2021	F1	W1	20.75±1.48bcd	23.40±1.84abc	23.30±2.69abc	9.95±1.34ab	77.40±7.35abcd
		W2	22.65±1.20abc	25.95±2.62a	25.00±2.97ab	10.75±1.77ab	84.35±8.56ab
		W3	19.00±1.56de	19.50±2.12bcde	17.85±3.89bcd	8.20±0.99abc	64.55±8.56cde
	F2	W1	24.15±0.92ab	21.90±1.56abcd	24.55±2.33ab	9.90±1.13ab	80.50±5.94abc
		W2	24.95±1.48a	23.80±2.55ab	27.10±3.25a	11.20±1.41a	87.05±8.70a
		W3	20.00±2.83cd	17.10±4.10def	20.20±2.97abcd	9.20±0.42abc	66.50±10.32bcde
	F3	W1	20.80±0.99bcd	19.95±0.49bcde	20.90±2.83abcd	9.25±1.77abc	70.90±6.08abcde
		W2	20.40±0.57cd	20.95±0.78bcd	21.80±4.95abcd	10.10±2.26ab	73.25±8.56abcde
		W3	16.60±0.42e	15.10±2.97ef	15.75±3.32cd	7.95±1.63abc	55.40±7.50ef
	F4	W1	15.70±0.14e	17.80±0.28def	18.13±2.81bcd	8.00±0.99abc	59.63±3.95def
		W2	16.05±2.62e	18.70±0.42cdef	18.30±5.66bcd	7.50±0.42bc	60.55±9.12def
		W3	11.30±0.85f	14.10±1.27f	13.56±2.04d	6.20±0.28c	45.16±4.45f
2022	F1	W1	19.15±4.45a	28.55±4.6ab	10.05±0.64abc	18.60±2.97a	76.35±12.66ab
		W2	19.75±3.75a	29.95±3.61ab	11.30±2.12ab	18.80±2.12a	79.80±11.6ab
		W3	11.35±3.18bc	21.15±2.62abc	6.15±0.49ef	10.10±1.56cde	48.75±7.85cd
	F2	W1	18.70±4.38a	29.50±5.66ab	10.85±0.35ab	20.05±2.05a	79.10±12.45ab
		W2	20.85±2.33a	31.35±5.44a	12.30±1.41a	22.65±1.34a	87.15±10.54a
		W3	9.70±2.12bc	20.15±2.33bc	6.00±0.99ef	10.35±2.90bcde	46.20±8.34cd
	F3	W1	15.35±2.47ab	24.95±5.02abc	9.10±0.57bcd	13.75±0.78bc	63.15±8.84bc
		W2	15.20±5.66ab	26.75±6.29abc	9.35±0.64bcd	14.50±0.99b	65.80±13.58abc
		W3	8.60±0.99bc	17.90±2.26c	4.75±1.06f	8.50±1.98de	39.75±6.29d
	F4	W1	10.60±0.42bc	22.80±3.96abc	8.00±0.71cde	12.25±0.07bcd	53.65±5.02cd
		W2	8.95±0.49bc	20.85±3.75bc	7.20±0.42de	11.50±0.14bcd	48.50±3.82cd
		W3	6.50±0.57c	16.55±2.19c	4.00±0.71f	7.25±1.48e	34.30±4.95d
显著性分析 (F)							
2021年	施肥		79.637**	17.108*	144.324**	10.040*	166.829**
	灌水		98.440*	29.229*	33.310*	19.146*	85.844*
	施肥×灌水		0.964	1.348	0.857	5.045*	2.431
2022年	施肥		11.095*	54.776**	107.011**	35.306**	33.427**
	灌水		73.186*	21.112*	162.235**	209.434**	167.102**
	施肥×灌水		3.264	7.963*	3.418	13.005**	14.340**

注 *表示显著性差异 ($P<0.05$), **表示极显著差异 ($P<0.01$); 每列数据后字母表示各处理间差异显著 ($P<0.05$), 下同。

表 2 水肥调控对苹果幼树各生育期基茎生长量的影响

Table 2 Effect of water and fertilizer regulation on basal stem growth of young apple trees at various growth stages mm							
年份	施肥处理	灌水处理	萌芽开花期	新梢旺长期	坐果膨大期	果实成熟期	全生育期
2021	F1	W1	1.27±0.16bc	1.65±0.16bc	1.34±0.19abc	0.68±0.06abcd	4.93±0.57bc
		W2	1.42±0.16ab	1.73±0.06ab	1.46±0.16abc	0.72±0.10abc	5.32±0.47ab
		W3	0.70±0.13efg	1.05±0.15de	0.88±0.06def	0.43±0.01def	3.04±0.10def
	F2	W1	1.30±0.23abc	1.74±0.16ab	1.57±0.38ab	0.83±0.14ab	5.44±0.91ab
		W2	1.66±0.26a	1.90±0.17a	1.62±0.33a	0.96±0.30a	6.13±1.07a
		W3	0.73±0.11ef	0.99±0.01de	0.84±0.13def	0.45±0.08cdef	3.00±0.34def
	F3	W1	1.19±0.09bcd	1.48±0.04c	1.17±0.13bcd	0.66±0.10bcd	4.49±0.27bc
		W2	1.23±0.11bcd	1.57±0.03bc	1.08±0.18cde	0.69±0.13abcd	4.57±0.39bc
		W3	0.52±0.04fg	0.90±0.07ef	0.72±0.01ef	0.34±0.04ef	2.48±0.03ef
	F4	W1	0.95±0.19cde	1.42±0.06c	1.08±0.06cde	0.57±0.06bcde	4.02±0.13cd
		W2	0.86±0.19def	1.20±0.04d	0.88±0.05def	0.42±0.06def	3.35±0.04de
		W3	0.34±0.05g	0.69±0.01f	0.60±0.05f	0.28±0.01f	1.90±0.01f
2022	F1	W1	1.94±0.35abcd	1.01±0.30ab	1.37±0.42ab	1.22±0.21bc	5.53±1.27ab
		W2	2.05±0.47abc	0.97±0.11abc	1.46±0.45a	1.25±0.13bc	5.72±1.16ab
		W3	1.15±0.18def	0.64±0.06bcd	0.62±0.06cde	0.65±0.10fgh	3.06±0.40cde
	F2	W1	2.18±0.49ab	1.17±0.41a	1.64±0.40a	1.38±0.09ab	6.36±1.39a
		W2	2.25±0.57a	1.28±0.36a	1.69±0.45a	1.54±0.04a	6.75±1.41a
		W3	1.08±0.13ef	0.66±0.04bcd	0.67±0.06bcde	0.75±0.08efg	3.16±0.32cde
	F3	W1	1.89±0.38abcd	0.83±0.11abc	1.32±0.49abc	1.09±0.06cd	5.12±1.05abc
		W2	1.75±0.40abcde	0.86±0.09abc	1.25±0.37abcd	1.09±0.09cd	4.94±0.95abc
		W3	0.90±0.19f	0.48±0.08cd	0.52±0.04de	0.54±0.01gh	2.43±0.29de
	F4	W1	1.40±0.06bcdef	0.81±0.13abcd	0.97±0.08abcde	0.92±0.04de	4.09±0.30bcd
		W2	1.27±0.03cdef	0.60±0.26bcd	0.50±0.11e	0.79±0.11ef	3.15±0.51cde
		W3	0.63±0.14f	0.32±0.01d	0.36±0.03e	0.44±0.03h	1.75±0.21e
显著性分析 (F)							
2021年	施肥		6.130	10.648*	8.179	8.884	9.711*
	灌水		232.700**	738.107**	25.740*	20.138*	88.347*
	施肥×灌水		1.281	4.908*	19.366**	7.714*	8.373*
2022年	施肥		10.203*	13.620*	13.989*	48.130**	22.050*
	灌水		47.121*	11.487	11.910	293.238**	27.914*
	施肥×灌水		2.031	1.558	7.878*	7.834*	8.294*

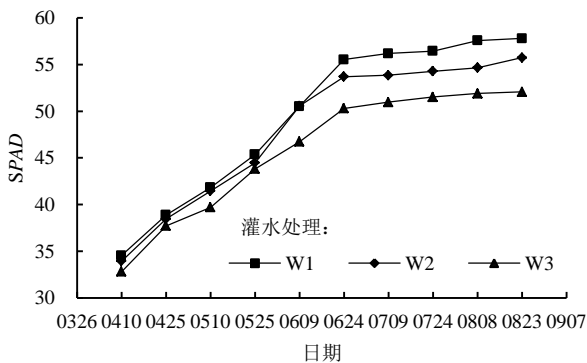
表 3 水肥调控对苹果幼树各生育期叶面积的影响

Table 3 Effect of water and fertilizer regulation on leaf area of young apple trees at various growth stages							m ² /株
年份	施肥处理	灌水处理	萌芽开花期	新梢旺长期	坐果膨大期	果实成熟期	全生育期
2021	F1	W1	0.058±0.016ab	0.092±0.027abc	0.124±0.013abcd	0.185±0.038abc	0.458±0.095abc
		W2	0.061±0.020ab	0.114±0.024ab	0.136±0.023abc	0.194±0.037ab	0.505±0.104ab
		W3	0.045±0.005abc	0.077±0.023abc	0.101±0.012bcde	0.120±0.032bcd	0.342±0.071bcd
	F2	W1	0.060±0.011ab	0.102±0.027abc	0.146±0.025ab	0.197±0.037ab	0.505±0.101ab
		W2	0.065±0.017a	0.116±0.025a	0.154±0.024a	0.216±0.059a	0.551±0.125a
		W3	0.041±0.004abc	0.079±0.024abc	0.096±0.004cde	0.133±0.018bcd	0.348±0.05abcd
	F3	W1	0.044±0.007abc	0.086±0.029abc	0.121±0.018abcd	0.174±0.027abcd	0.425±0.081abcd
		W2	0.049±0.008abc	0.080±0.011abc	0.130±0.027abc	0.180±0.033abcd	0.438±0.079abcd
		W3	0.033±0.006bc	0.060±0.021bc	0.068±0.013e	0.106±0.025cd	0.266±0.066cd
	F4	W1	0.041±0.015abc	0.075±0.011abc	0.093±0.013cde	0.139±0.016abcd	0.347±0.054abcd
		W2	0.035±0.011bc	0.060±0.016bc	0.083±0.018de	0.119±0.036bcd	0.296±0.081cd
		W3	0.026±0.009c	0.055±0.019c	0.068±0.021e	0.100±0.021d	0.247±0.069d
2022	F1	W1	0.043±0.005abcd	0.135±0.045ab	0.165±0.03abc	0.192±0.035ab	0.534±0.115abcd
		W2	0.050±0.004abc	0.141±0.042ab	0.176±0.035ab	0.210±0.037a	0.576±0.119abc
		W3	0.036±0.004bcde	0.094±0.014abc	0.105±0.013bcd	0.127±0.022bc	0.362±0.053cde
	F2	W1	0.053±0.011ab	0.150±0.052a	0.186±0.046a	0.211±0.049a	0.600±0.159ab
		W2	0.061±0.008a	0.151±0.042a	0.195±0.048a	0.218±0.047a	0.624±0.146a
		W3	0.032±0.006cde	0.091±0.026abc	0.114±0.019bcd	0.128±0.029bc	0.363±0.081cde
	F3	W1	0.045±0.014abcd	0.090±0.016abc	0.129±0.013abcd	0.155±0.019abc	0.418±0.03abcd
		W2	0.054±0.006ab	0.106±0.004abc	0.139±0.009abc	0.164±0.021abc	0.462±0.033abcd
		W3	0.026±0.008de	0.070±0.023bc	0.100±0.028cd	0.116±0.03bc	0.310±0.089de
	F4	W1	0.041±0.01abcd	0.093±0.004abc	0.110±0.021bcd	0.145±0.019abc	0.388±0.054bcde
		W2	0.035±0.008bcde	0.070±0.001bc	0.096±0.011cd	0.118±0.022bc	0.318±0.042de
		W3	0.019±0.006e	0.042±0.033c	0.064±0.042d	0.099±0.025c	0.223±0.105e
显著性分析 (F)							
2021年	施肥		31.073**	26.562*	511.891**	34.625**	87.195**
	灌水		9.359	76.642*	38.929*	31.724*	47.155*
	施肥×灌水		1.797	6.019*	6.609*	5.247*	8.258*
2022年	施肥		19.110*	5.258	28.061*	21.220*	16.607*
	灌水		51.329*	323.220**	1 406.083**	284.082**	1 476.879**
	施肥×灌水		20.353**	0.642	1.433	8.928**	2.058

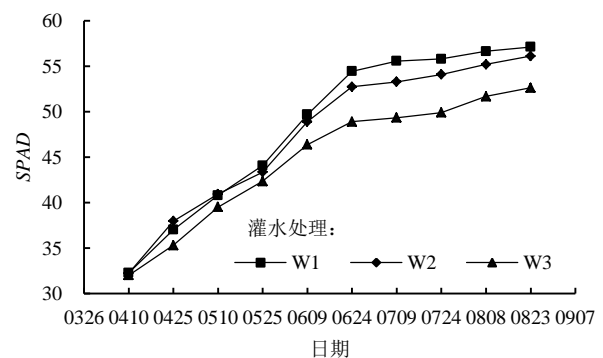
2.2 滴灌节水减氮对苹果幼树生理指标的影响

由图 1 和图 2 可知,随着苹果幼树的生长,SPAD 在生育前期上升较快,在生育后期逐步趋于平稳。2021 年相同灌水量下,SPAD 在萌芽开花期开始增加,在其他生育期表现为 F1 施肥水平>F2 施肥

水平>F3 施肥水平>F4 施肥水平;相同施肥量下,SPAD 表现为 W1 灌水水平>W2 灌水水平>W3 灌水水平。生育期末,F1W1 处理下的 SPAD 最大,为 57.69;F4W3 处理下的 SPAD 最小,为 50.59。2022 年与 2021 年的规律基本一致。



(a) F1 施肥处理



(b) F2 施肥处理

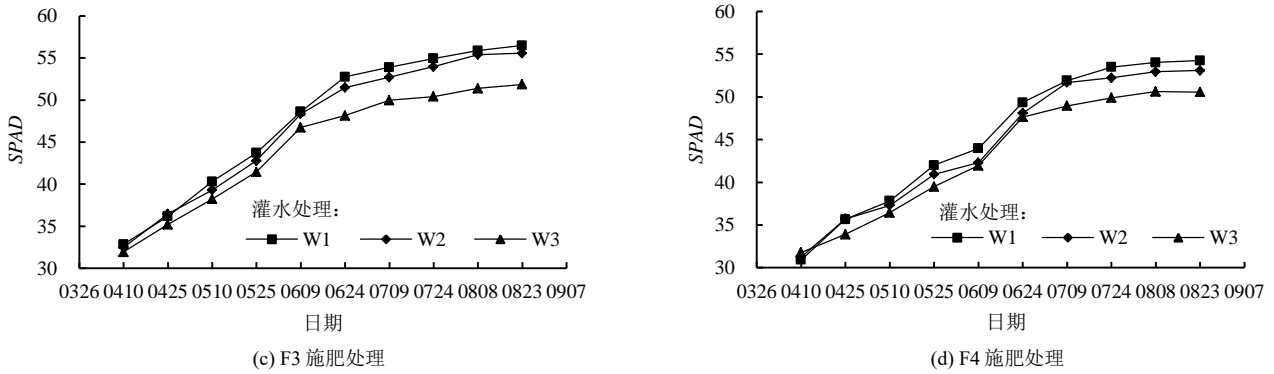


图 1 2021 年水肥调控对苹果幼树不同时期 SPAD 的影响

Fig.1 Effect of water and fertilizer regulation on chlorophyll content (SPAD) of young apple trees at different stages in 2021

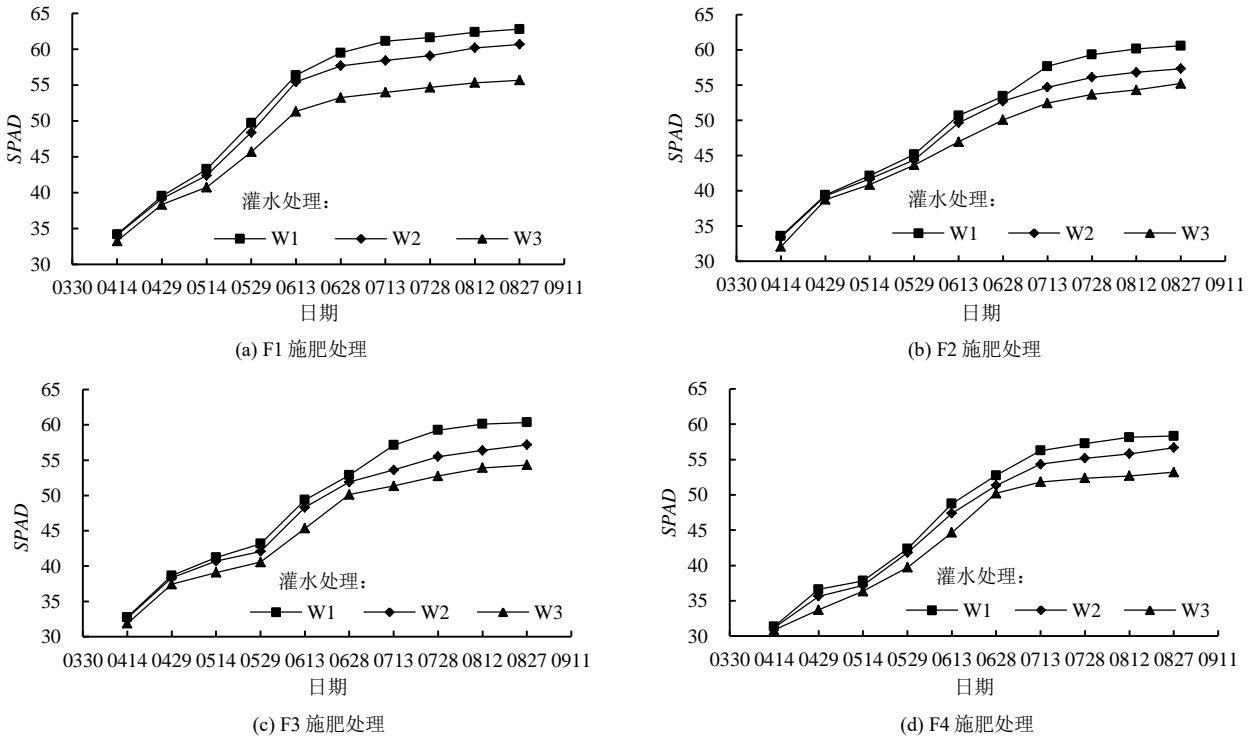


图 2 2022 年水肥调控对苹果幼树不同时期 SPAD 的影响

Fig.2 Effect of water and fertilizer regulation on chlorophyll content (SPAD) of young apple trees at different stages in 2022

由图 3 可知，相同灌水量下， P_n 基本随施肥量的增加而增加，表现为 F1 施肥水平 > F2 施肥水平 > F3 施肥水平 > F4 施肥水平；相同施肥量下， P_n

基本随灌水量的增加而增加，表现为 W1 灌水水平 > W2 灌水水平 > W3 灌水水平；F1W1 处理的 P_n 最大，2021、2022 年分别为 34.63 、 $39.26 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

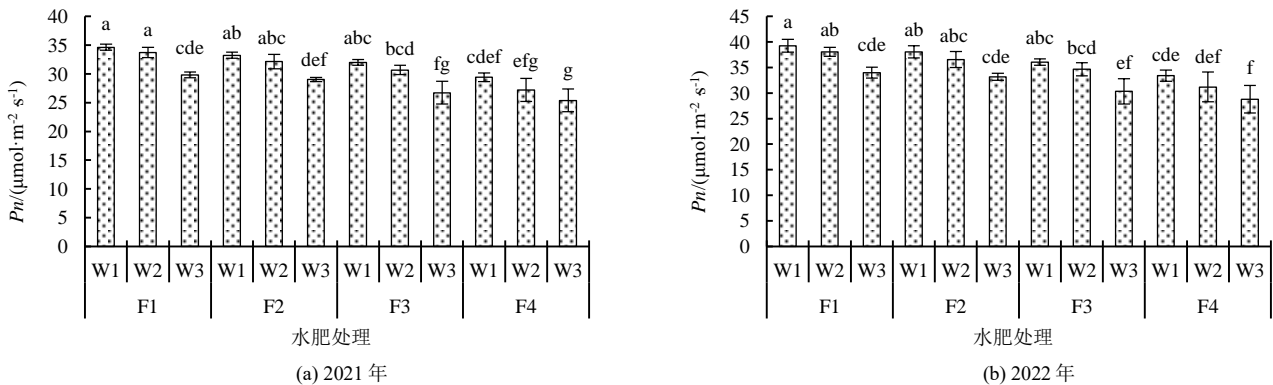


图 3 水肥调控对苹果幼树 P_n 的影响

Fig.3 Effect of water and fertilizer regulation on the net photosynthetic rate of young apple trees

由图 4 可知，相同灌水量下， Tr 基本上随施肥量的增加而增加，表现为 F1 施肥水平 > F2 施肥水

平 > F3 施肥水平 > F4 施肥水平；相同施肥量下， Tr 基本上随灌水量的增加而增加，表现为 W1 灌水水

平>W2 灌水水平>W3 灌水水平; F1W1 处理下的 Tr 最大, 2021、2022 年分别为 7.30、8.60

$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; F4W3 处理下的 Tr 最小, 2021、2022 年分别为 5.76、6.56 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

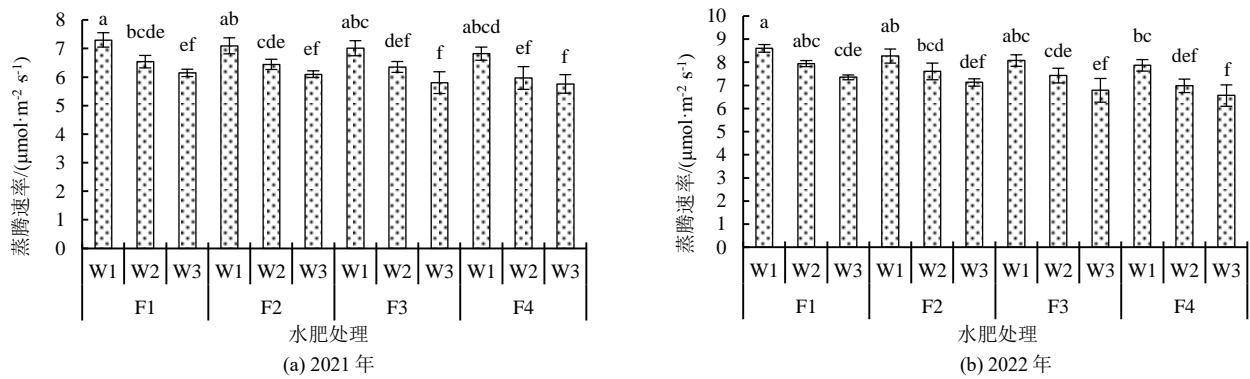


图4 水肥处理对苹果幼树 Tr 的影响

Fig.4 Effect of water and fertilizer treatments on Tr of young apple trees

由图 5 可知, 相同灌水量下, 2021 年 WUE 基本表现为 F1 施肥水平>F2 施肥水平>F3 施肥水平>F4 施肥水平, 2022 年在 W1、W2 灌水水平下, WUE 表现为 F1 施肥水平>F2 施肥水平>F3 施肥水平>F4 施肥水平, 而 W3 灌水水平下则表现为 F2 施肥水平>F1 施肥水平>F3 施肥水平>F4 施肥水平。相同施肥量下, WUE 基本表现为 W2 灌水水平>W3 灌水水平>W1 灌水水平, 2021、2022 年 WUE 最大值分别出现在 F1W2、F2W2 处理, 为 5.16、4.81 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$, 较 F1W1 处理分别提高了 8.6%和 5.3%; 最小值均出现在 F4W1 处理, 2021、2022 年分别为 4.31、4.25 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ 。

2.3 苹果幼树各指标间的相关性

由图 6 可知, 2021 年苹果幼树植株生长量与叶面积、 $SPAD$ 、 Pn 呈显著的线性相关, R^2 分别为 0.921 2、0.607 9、0.789 0。2022 年苹果幼树植株生长量与叶面积呈显著的线性相关, R^2 为 0.924 2, 与 $SPAD$ 、 Pn 呈显著的二次曲线相关, R^2 分别为 0.686 3、0.857 4。2021 年叶面积与 $SPAD$ 呈显著的直线线性相关, R^2 为 0.600 4, 与 Pn 呈显著的二次曲线相关, R^2 为 0.836 7。2021 年 $SPAD$ 与 Pn 呈显著线性相关, R^2 为 0.780 2。2022 年, 叶面积与 $SPAD$ 呈一般的线性相关, R^2 为 0.465 6, 与 Pn 呈显著的二次曲线相关, R^2 为 0.864 5, $SPAD$ 与 Pn 呈显著的线性相关, R^2 为 0.751 7。

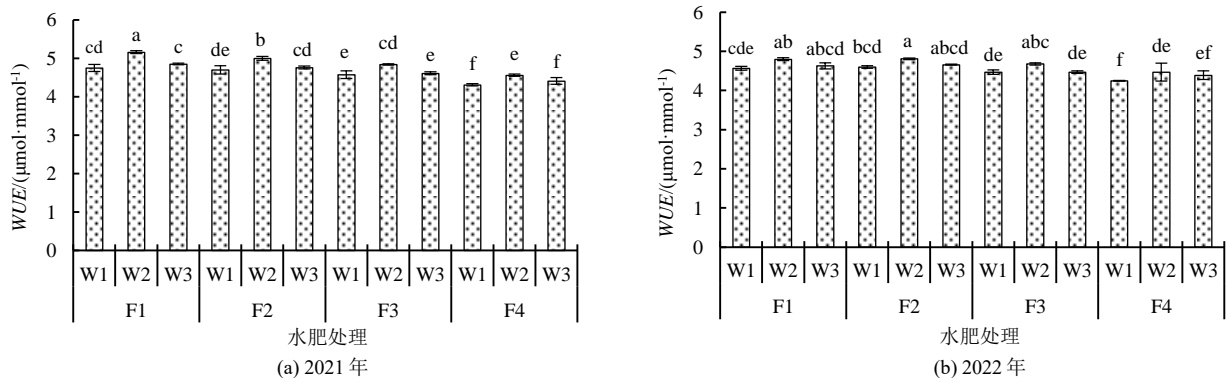
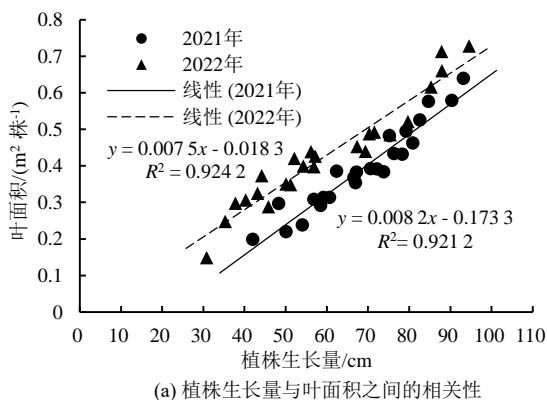
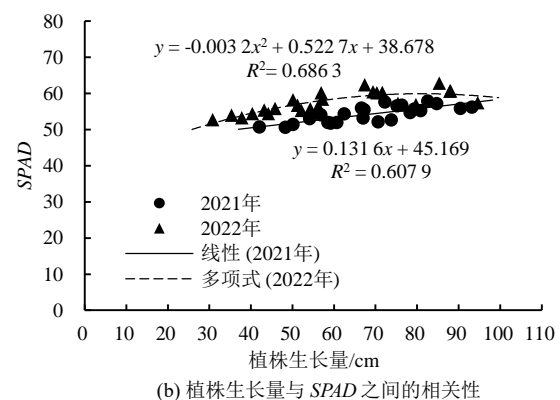


图5 水肥调控对苹果幼树 WUE 的影响

Fig.5 Effect of water and fertilizer regulation on WUE of young apple trees



(a) 植株生长量与叶面积之间的相关性



(b) 植株生长量与 $SPAD$ 之间的相关性

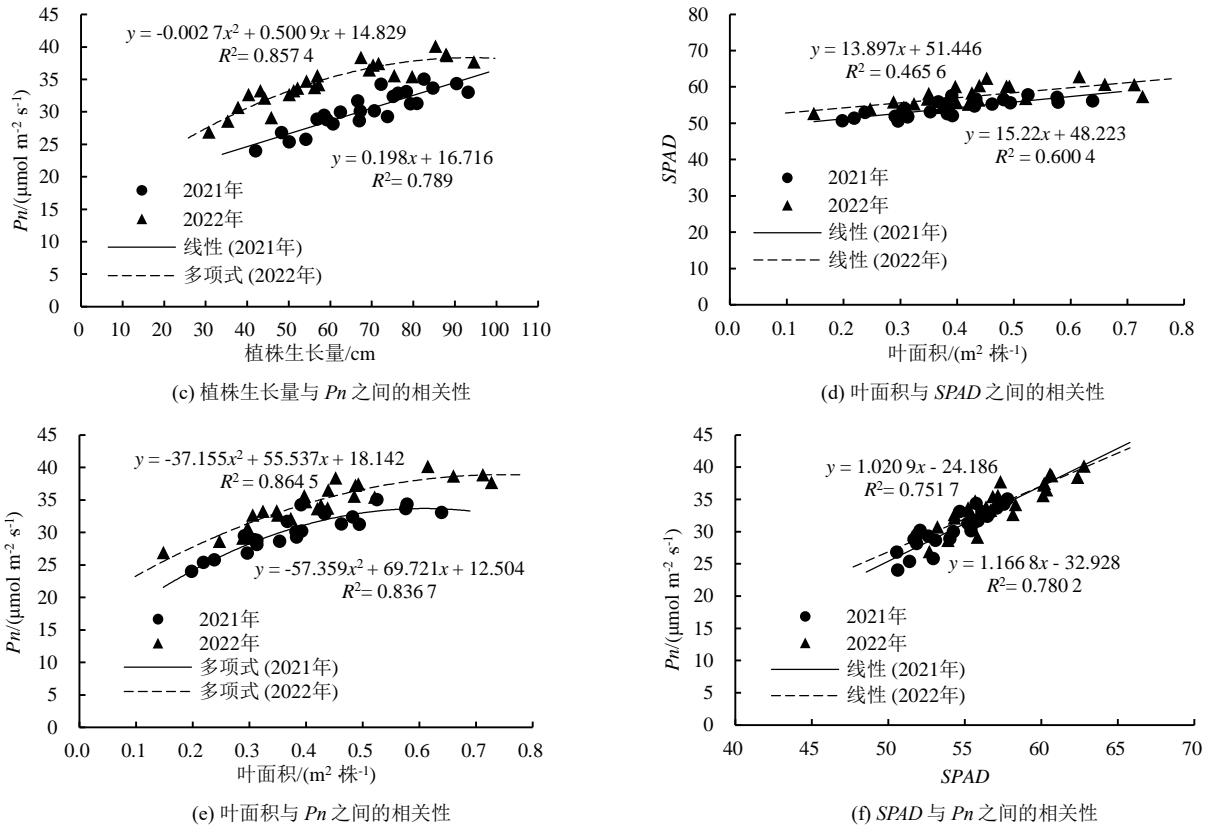


图 6 苹果幼树各指标间的相关性

Fig.6 Correlations among the indicators of young apple trees

3 讨论

作物生长发育与合理的灌溉和施肥制度密切相关^[13]。干旱胁迫可显著降低刺槐幼苗的株高和茎粗，影响光合作用，过量施氮会抑制刺槐幼苗植株的生长^[14]；水分亏缺条件下，随着施氮水平的提高，水稻株高、SPAD、产量均显著提高^[15]。轻度调亏灌溉对核桃树的生长、SPAD 和产量最为有利，可以起到修枝增产的效果^[16]。滴灌条件下，适宜的灌水量对酿酒葡萄新梢及株高生长的促进作用最为显著，能显著提高酿酒葡萄花期和膨大期的 SPAD，但当滴灌量过高时则会引起减产^[17]；水肥耦合条件下，枣树各生育时期 SPAD 均随着施氮量的增加而上升，增施氮肥可有效提高枣树坐果率^[18]。以往研究与本研究结果并不完全一致。本研究表明，滴灌条件下，轻度的水分亏缺和适当地减少施肥量有利于苹果幼树生长；除萌芽开花期外，苹果幼树 SPAD 在其他生育期均表现为 F1 施肥水平>F2 施肥水平>F3 施肥水平>F4 施肥水平，在坐果膨大期和成熟期均表现为 W1 灌水水平>W2 灌水水平>W3 灌水水平，这也与前人^[19]在水肥耦合条件下对 2 年生苹果幼树的研究结果并不完全一致。这可能与种植气候、地理环境等条件的不同有关。

灌水量和施肥量是影响作物光合特性的 2 个重

要因素^[20]。滴灌施肥条件下不同灌水上限对玉露香梨光合特性均有不同程度的影响，灌水量为 60%~80%田间持水率时更适宜玉露香梨的生长^[21]；水肥耦合条件下，提高灌溉水平能够增加小粒咖啡净光合速率和蒸腾速率，但降低了水分利用效率^[22]；滴灌水肥一体化模式下，适宜的施氮量可以显著提高榛树叶片的净光合速率和蒸腾速率^[23]；滴灌水肥耦合条件下，根区交替滴灌与适宜施氮量的耦合能够提高葡萄光合生产能力，有利于产量形成^[24]。本研究表明，灌水量相同时，Pn、Tr、WUE 基本上随施肥量的增加而增加，表现为 F1 施肥水平>F2 施肥水平>F3 施肥水平>F4 施肥水平；施肥量相同时，Pn 和 Tr 基本上随灌水量的增加而增加，表现为 W1 灌水水平>W2 灌水水平>W3 灌水水平；不同水肥处理下，Pn、Tr 的最大值均出现在 F1W1 处理，F1W2 处理与其相比差别不大，这说明轻度缺水处理对 Pn 和 Tr 的影响不大，WUE 基本表现为 W2 灌水水平>W3 灌水水平>W1 灌水水平，说明在一定施肥量区间下，适度的亏缺灌溉更有利于提高苹果幼树 WUE，这与前人^[25]研究结果基本一致。

作物表型指标可以较好地反映其生理特征，对于逆境胁迫条件下研究作物 Pn、Tr、Gs 等生理指标具有重要意义^[26]。前人^[18]研究表明，红富士苹果幼树生长量和叶面积分别与 Pn、Tr、Gs 之间存在较好

的线性关系。本研究表明, 苹果幼树植株生长量、叶面积、*SPAD* 和光合速率之间具有较好的相关性, 这说明水肥调控下的苹果幼树生长和光合等生理指标具有密切联系, 作物的生长指标可以在一定程度上体现其生理特征。

4 结论

1) 苹果幼树各生育期植株生长量、基茎生长量和叶面积最大值基本均出现在 F2W2 处理。

2) 2021、2022 年, 苹果幼树 *WUE* 最大值分别出现在 F1W2 处理和 F2W2 处理, 与 F1W1 处理相比分别提高了 8.6% 和 5.3%。

3) 本试验条件下, F2W2 处理是滴灌条件下苹果幼树种植的最佳水肥调控制度。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 金莹, 牛荣. 中国苹果七大主产区产业竞争力发展研究[J]. 生产力研究, 2021(9): 36-41.
JIN Ying, NIU Rong. Research on the development of industrial competitiveness in the seven major apple production areas in China[J]. Productivity Research, 2021(9): 36-41.
- [2] 屈振江, 周广胜. 中国富士苹果种植气候适宜区的年代际变化[J]. 生态学报, 2016, 36(23): 7 551-7 561.
QU Zhenjiang, ZHOU Guangsheng. Dynamics of decadal changes in the distribution of cultivation regions with climate suitable for the Fuji apple in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(23): 7 551-7 561.
- [3] 矫丽娜, 叶建全, 战海云, 等. 北方半干旱地区农业节水灌溉常用技术及应用研究进展[J]. 安徽农学通报, 2021, 27(9): 124-125.
- [4] 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.
- [5] 赵佐平, 段敏, 同延安. 不同施肥技术对不同生态区苹果产量及品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(5): 158-165.
ZHAO Zuoping, DUAN Min, TONG Yan'an. Effects of different fertilizations on yield and fruit quality of Fuji apple in different ecological regions[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(5): 158-165.
- [6] 许文其, 宋时雨, 杨昊霖, 等. 滴灌水肥一体化技术研究进展[J]. 现代农业科技, 2018(3): 196-197.
XU Wenqi, SONG Shiyu, YANG Haolin, et al. Research progress of drip fertigation technology[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2018(3): 196-197.
- [7] IQBAL Z, CHATTHA M B, SUBHANI M N. Impact of different levels of nitrogen by soil application and fertigation through drip irrigation on growth, yield and quality of sugarcane[J]. Pak. J. Agri. Sci, 2020, 57(3): 829-835.
- [8] CASAMALI B, VAN IERSEL M W, CHAVEZ D J. Nitrogen partitioning in young "julyprince" peach trees grown with different irrigation and fertilization practices in the Southeastern United States[J]. Agronomy, 2021, 11(2): 350.
- [9] 周江涛, 赵德英, 程存刚. 花前滴灌施肥对华红苹果生长和矿质元素的影响[J]. 经济林研究, 2020, 38(4): 109-116.
ZHOU Jiangtao, ZHAO Deying, CHENG Cungang. Effects of fertigation before flowering on growth and mineral element contents of Huahong apple[J]. Non-Wood Forest Research, 2020, 38(4): 109-116.
- [10] 石美娟, 续海红, 郭华, 等. 水分胁迫下水肥耦合对矮砧富士幼树生长及保护酶活性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(1): 146-154, 162.
SHI Meijuan, XU Haihong, GUO Hua, et al. Effects of water and fertilizer coupling on growth and protective enzyme activities of dwarf rootstock Fuji sapling under water stress[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(1): 146-154, 162.
- [11] 张建锴, 曹红霞, 潘小燕, 等. 基于产量和品质的陕北苹果滴灌水量和追施氮量优化研究[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(5): 143-152.
ZHANG Jiankai, CAO Hongxia, PAN Xiaoyan, et al. Optimization of drip irrigation and topdressing nitrogen based on apple yield and quality in Northern Shaanxi[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(5): 143-152.
- [12] 郭华, 秦聪, 石美娟, 等. 苹果幼树生理指标对土壤水分调控的响应研究[J]. 节水灌溉, 2021(6): 43-47.
GUO Hua, QIN Cong, SHI Meijuan, et al. Response of physiological indexes of young apple trees to soil moisture regulation[J]. Water Saving Irrigation, 2021(6): 43-47.
- [13] 李萌. 新疆膜下滴灌棉花灌溉和施肥调控效应及生长模拟研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
LI Meng. Study on effect of irrigation and fertilization regulation and simulation of cotton growth under film-mulched drip irrigation in Southern Xinjiang[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2020.
- [14] SU Bingqian, WANG Lifang, SHANGGUAN Zhouping. Morphological and physiological responses and plasticity in Robinia pseudoacacia to the coupling of water, nitrogen and phosphorus[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2021, 184(2): 271-281.
- [15] ABDON N M, ABDEL-RAZEK M A, ABD EL-MAGEED S A, et al. High nitrogen fertilization modulates morpho-physiological responses, yield, and water productivity of lowland rice under deficit irrigation[J]. Agronomy, 2021, 11(7): 1 291.
- [16] 刘钧尧, 赵经华, 杨文新, 等. 调亏灌溉对滴灌核桃树生长发育及产量的影响[J]. 节水灌溉, 2022(10): 72-78, 85.
LIU Junqiao, ZHAO Jinghua, YANG Wenxin, et al. Effects of regulated deficit irrigation on growth, development and yield of walnut under drip irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2022(10): 72-78, 85.
- [17] 王东, 曹源信, 吉遥芳, 等. 不同滴灌量对红寺堡区酿酒葡萄生长和品质的影响[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(1): 154-161.
WANG Dong, CAO Yuanbei, JI Yaofang, et al. Effects of different drip irrigation on the growth and quality of wine grapes in Hongsibu district[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(1): 154-161.
- [18] 寇睿, 贾生海, 白有帅, 等. 滴灌条件下不同氮肥处理对红枣生长及产量的影响[J]. 中国农村水利水电, 2021(8): 123-126.
KOU Rui, JIA Shenghai, BAI Youshuai, et al. Effects of different nitrogen fertilizer levels on jujube growth indexes and leaf SPAD values under drip irrigation[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(8): 123-126.
- [19] 周罕觅, 张硕, 杜新武, 等. 滴灌条件下水肥耦合对苹果幼树生长与生理特性的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 337-348.
ZHOU Hanmi, ZHANG Shuo, DU Xinwu, et al. Effects of water and fertilizer coupling on growth and physiological characteristics of young apple tree under drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 337-348.
- [20] 李中杰. 不同灌溉技术和灌水量的陕北山地苹果节水增产提质效应研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
LI Zhongjie. Effect of different irrigation techniques and irrigation

- amounts on water saving, yield increase and quality improvement of mountain apple in Northern of Shaanxi[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.
- [21] 王芸芸, 杨凯, 石美娟, 等. 滴灌中不同灌水上限对梨树生理生长、光合特性及品质的影响[J]. 节水灌溉, 2021(1): 77-80.
WANG Yunyun, YANG Kai, SHI Meijuan, et al. Effects of different irrigation quantity upper limit on physiological growth, photosynthetic characteristics and quality of pear trees under drip irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2021(1): 77-80.
- [22] 蒋泽引, 刘小刚, 吴朗, 等. 水肥光耦合对小粒咖啡生长特性及水肥利用的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41(4): 409-416.
JIANG Zeyin, LIU Xiaogang, WU Lang, et al. Effects of water, fertilizer and light coupling on growth characteristics and water and fertilizer utilization of Arabica coffee[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023, 41(4): 409-416.
- [23] 于冬梅, 王克瀚, 张悦, 等. 不同施肥模式对平欧杂种榛叶片光合特性、产量及生长的影响[J]. 果树学报, 2022, 39(10): 1 882-1 890.
YU Dongmei, WANG Kehan, ZHANG Yue, Effects of different fertilization modes on the photosynthetic characteristics, yield and growth in hybrid hazelnut(*Corylus heterophylla*×*C. avellana*)[J]. Journal of Fruit Science, 2022, 39(10): 1 882-1 890.
- [24] 陈丽楠, 刘秀春, 荣传胜, 等. 灌溉方式和施氮量对葡萄光合特性和荧光参数的影响[J]. 北方果树, 2021(5): 13-15.
CHEN Linan, LIU Xiuchun, RONG Chuansheng, et al. Effects of irrigation methods and nitrogen applied rates on grape photosynthetic characters and fluorescence parameter [J]. Northern Fruits, 2021(5): 13-15.
- [25] 刘星, 曹红霞, 廖阳, 等. 滴灌模式对苹果光合特性、产量及灌溉水利用的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(15): 3 264-3 278.
LIU Xing, CAO Hongxia, LIAO Yang, et al. Effects of drip irrigation methods on photosynthetic characteristics, yield and irrigation water use of apple[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(15): 3 264-3 278.
- [26] GOSA S C, LUPO Y, MOSHELION M. Quantitative and comparative analysis of whole-plant performance for functional physiological traits phenotyping: New tools to support pre-breeding and plant stress physiology studies[J]. Plant Science, 2019, 282: 49-59.

Effect of Saving-water Drip Irrigation and Nitrogen Reduction on Growth and Photosynthetic Characteristics of Young Apple Tree

ZHOU Hanmi, SUN Qili, NIU Xiaoli^{*}, CHEN Jiageng, MA Linshuang, SU Yumin, LI Jichen
(College of Agricultural Equipment Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: 【Objective】 Reducing water and fertilizer application is critical to developing sustainable agriculture worldwide. This paper investigates the optimal water-saving drip irrigation and nitrogen-reducing fertilization for cultivation of young apple in arid and semi-arid regions in northwestern China. 【Method】 The two-year experiment consisted of three irrigation treatments by keeping soil water content at 75%~90% (W1), 60%~75% (W2) and 45%~60% (W3) of the field capacity. For each treatment, there were four fertilizations by applying N-P₂O₅-K₂O to each plant at 18-12-6 g (F1), 15-12-6 g (F2), 12-12-6 g (F3), and 9-12-6 g (F4). For each treatment, we measured the growth, photosynthetic traits, and water use efficiency of the trees. 【Result】 F2+W2 combination gave the highest plant growth, basal stem growth, and leaf area, demonstrating that a moderate water deficit and fertilization reduction was beneficial to the tree growth. Leaf *SPAD* started to increase from the budding and flowering stage, with the impact of fertilization on it ranked in the order of F1 > F2 > F3 > F4, and the influence of irrigation ranked in the order of W1 > W2 > W3 at the fruit-set and ripening stages. The F1+W1 combination gave the highest leaf *SPAD*. Photosynthesis and transpiration increased with the increase in fertilization and irrigation amount. Maximum water use efficiency was achieved in F1+W2 and F2+W2, with its value being 5.16 and 4.81 μmol/mmol, respectively, which were 8.6% and 5.3% more than those in F1+W1. Irrigation amount affected tree growth more than fertilization, and strong correlations were found between growth, leaf area, *SPAD*, and photosynthetic traits of the trees. 【Conclusion】 The comparative results show that F2+W2 is optimal for young apple tree under drip irrigation. It indicates that a moderate reduction in irrigation and fertilization did not result in a noticeable effect on tree growth and can be used as an improved agronomic practice for apple production in arid and semi-arid regions in Northern China and areas with similar climates.

Key words: drip irrigation; water saving and nitrogen reducing; growth characteristics; physiological characteristics; young apple trees

责任编辑：韩洋