

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.10.035

滴灌条件下水肥耦合对苹果幼树生长与生理特性的影响

周罕觅 张 硕 杜新武 牛晓丽 王升升 解晓琳

(河南科技大学农业装备工程学院, 洛阳 471003)

摘要:为探明半干旱区苹果树科学合理的灌溉和施肥制度,进行了滴灌条件下北方半干旱地区水肥耦合效应对苹果幼树生长与生理特性影响的试验,灌水设4个水平,施肥设3个水平,其中灌水处理为田间持水率的75%~90%(W1)、65%~80%(W2)、55%~70%(W3)和45%~60%(W4),施肥处理为N、P₂O₅、K₂O与风干土质量比分别为0.9、0.3、0.3 g/kg(F1),0.6、0.3、0.3 g/kg(F2),0.3、0.3、0.3 g/kg(F3)。结果表明:不同水肥耦合处理下苹果幼树各生育期植株生长量、叶面积和干物质量最大值均出现在F1W2处理,最小值均出现在F3W4处理,植株生长量和叶面积在萌芽开花期、新梢生长期、坐果膨大期和成熟期较F1W1处理分别增加了6.9%、6.2%、11.0%、2.7%和9.3%、5.8%、5.0%、3.3%,生长指标一定程度上可以反映作物的生理特性。随着苹果幼树的生长,不同水肥耦合处理对苹果幼树叶片的SPAD的影响越来越大,苹果幼树全生育期耗水量随灌水量和施肥量的增加呈递增的趋势,在F1W2处理下水分生产率均达到最大值(2.43 kg/m³),且与F1W1处理相比增加了14.6%,耗水量却减少了12.2%。苹果幼树净光合速率、蒸腾速率和气孔导度的最大值均出现在F1W1处理,F1W2处理与其相比分别降低了4.2%、9.7%和4.2%,但水分利用效率提高了5.9%,最大值也出现在F1W2处理。综上,F1W2水肥处理为最佳的水肥耦合模式,是最佳的灌溉和施肥制度。

关键词: 苹果; 滴灌; 水肥耦合; 生长特性; 生理特性

中图分类号: S274.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2021)10-0337-12

OSID:



Effects of Water and Fertilizer Coupling on Growth and Physiological Characteristics of Young Apple Tree under Drip Irrigation

ZHOU Hanmi ZHANG Shuo DU Xinwu NIU Xiaoli WANG Shengsheng XIE Xiaolin

(College of Agricultural Equipment Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: In order to explore the scientific and reasonable irrigation and fertilization system for apple trees in semi-arid region, the effects of water and fertilizer coupling effect on the growth and physiological characteristics of young apple trees in northern semi-arid region under drip irrigation were studied. Four irrigation levels and three fertilization levels were set, among which irrigation treatment was 75%~90% (W1), 65%~80% (W2), 55%~70% (W3) and 45%~60% (W4) of field water holding capacity. The mass ratios of N, P₂O₅, K₂O to air-dried soil were 0.9 g/kg, 0.3 g/kg, 0.3 g/kg (F1), 0.6 g/kg, 0.3 g/kg, 0.3 g/kg (F2) and 0.3 g/kg, 0.3 g/kg, 0.3 g/kg (F3), respectively. The results showed that: under different water and fertilizer coupling treatments, the maximum value of plant growth, leaf area and dry matter weight of young apple trees at each growth stage appeared in F1W2 treatment, and the minimum value appeared in F3W4 treatment. Compared with F1W1 treatment, plant growth and leaf area were increased by 6.9%, 6.2%, 11.0%, 2.7% and 9.3%, 5.8%, 5.0% and 3.3%, respectively, at germination and flowering stage, shoot growth stage, fruit setting and maturity stage. The growth index could reflect the physiological characteristics of crops to some extent. With the growth of the trees, different water and fertilizer coupling treatments had more and more influence on the SPAD value of apple trees' leaves. Water consumption of apple trees during the whole growth period was increased with the increase of irrigation amount and fertilizer amount. Water productivity of apple trees

收稿日期: 2021-07-02 修回日期: 2021-08-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51909079,51709263)和河南省科技攻关计划项目(212102110035)

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: 杜新武(1975—),男,教授,博士,主要从事农业工程理论与技术研究,E-mail: du_xinwu@sina.com

under F1W2 treatment reached the maximum of 2.43 kg/m^3 , and increased by 14.6% compared with that of F1W1 treatment and water consumption was decreased by 12.2%. The maximum value of net photosynthetic rate, transpiration rate and stomatal conductance of young apple trees appeared in F1W1 treatment, and that of F1W2 treatment were decreased by 4.2%, 9.7% and 4.2%, respectively, but water use efficiency was increased by 5.9%, and the maximum value also appeared in F1W2 treatment. In conclusion, F1W2 water and fertilizer treatment reached the best water and fertilizer coupling mode and was the best irrigation and fertilization system.

Key words: apple; drip irrigation; water and fertilizer coupling; growth characteristics; physiological characteristics

0 引言

我国水资源十分紧缺,人均水资源量仅 2100 m^3 , 仅为世界人均水平的 28%, 农业灌溉用水效率为 0.548, 灌水利用效率低也是导致水资源紧缺的主要原因之一^[1]。目前在大田生产中, 化肥利用率平均仅为 30%, 化肥在实际生产中损失非常严重^[2]。造成我国水肥利用率低的主要原因包括过量灌溉和过量施肥, 以水促肥, 以肥调水, 两者相辅相成, 合理的灌溉和施肥制度是获得作物高产、高效的必由之路。

滴灌是节水灌溉主要技术之一, 滴灌和施肥一体化条件下水分与肥料对作物的生长发育是相互的, 而同一作物在不同的水肥供应条件下生长情况又大不相同, 水肥之间存在一定的耦合效应^[3-5]。水肥耦合效应的核心是强调影响作物生长的水、肥两大因素之间的有机联系, 利用二者之间的耦合效应进行水肥及作物的综合管理, 提高作物的生产力和水肥利用效率。近些年国内外学者对水肥耦合效应进行了一些研究, 但主要集中在小麦、玉米、番茄和黄瓜等粮食或蔬菜作物上^[6-11], 而水肥耦合效应对果树的影响研究报道较少。因此, 本文探讨滴灌条件下北方半干旱地区水肥耦合效应对苹果幼树生长和生理特性的影响, 寻求科学合理的灌溉和施肥制度, 以保障北方半干旱地区果树产业健康发展。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2019 年 3—10 月在河南省洛阳市河南

科技大学农业工程实验中心田间试验遮雨棚内进行(北纬 $34^{\circ}66'$, 东经 $112^{\circ}37'$), 该区域属于半湿润半干旱地区, 海拔 172 m, 年平均气温 $12 \sim 15^{\circ}\text{C}$, 年平均降水量为 600 mm 左右, 降雨多集中在 7—9 月, 年平均蒸发量为 1200 mm, 无霜期为 218 d, 年平均日照时数为 2291.6 h。

试验采用桶栽方式, 供试土壤为褐土, 每桶装土 30 kg (土壤自然干燥后磨细过 5 mm 筛), 装土容重 1.31 g/cm^3 , 土壤理化性质为: 硝态氮质量比 16.4 mg/kg, 铵态氮质量比 8.3 mg/kg, 有效磷质量比 13.2 mg/kg, 速效钾质量比 198 mg/kg, pH 值 8.03, 田间持水率 24.1% (质量含水率)。供试果树为 4 年生红富士苹果树 (基砧为黄海棠), 苹果幼树于 2019 年 3 月 20 日开始水肥处理。

1.2 试验设计

试验采用滴灌方式进行, 设灌水和施肥 2 因素, 其中灌水设 4 个水平, 施肥设 3 个水平, 试验进行完全组合设计, 共 12 个处理, 3 次重复, 选取 36 株长势和大小均一的桶栽苹果树。试验处理如表 1 所示, 氮、磷、钾肥分别为尿素、磷酸氢二铵和硫酸钾, 肥料一次性随水施入。采用称量法和取土烘干法控制其土壤水分含量。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 植株生长量和叶面积测定

用卷尺直接测定苹果树植株高度, 从基砧部开始至树体最高点, 每个生育期最后一天测定一次, 两次测定的差值即为该生育期的植株生长量 (cm)。各生育期为: 萌芽开花期 (3 月 20 日—4 月 18 日)、新梢生长期 (4 月 19 日—5 月 18 日)、坐果膨大期 (5 月 19 日—6 月 17 日)、成熟期 (6 月 18 日—7 月 17 日)。

表 1 试验处理

Tab. 1 Experimental treatments

施肥处理	灌水处理			
	W1 (充分灌水)	W2 (轻度亏缺)	W3 (中度亏缺)	W4 (重度亏缺)
F1 (高肥, $\text{N}, \text{P}_2\text{O}_5, \text{K}_2\text{O}$ 与风干土质量比分别为 0.9, 0.3, 0.3 g/kg)				
F2 (中肥, $\text{N}, \text{P}_2\text{O}_5, \text{K}_2\text{O}$ 与风干土质量比分别为 0.6, 0.3, 0.3 g/kg)	(75% ~ 90%) F_s	(65% ~ 80%) F_s	(55% ~ 70%) F_s	(45% ~ 60%) F_s
F3 (低肥, $\text{N}, \text{P}_2\text{O}_5, \text{K}_2\text{O}$ 与风干土质量比分别为 0.3, 0.3, 0.3 g/kg)				

注: F_s 为田间持水率, “~”前为灌水下限, “~”后为灌水上限。

单片叶面积采用手持叶面积仪(LI-3000C型, LI-COR, 美国), 每个生育期最后一天测定, 测定时随机选取树体不同方位的 10 片叶子取平均值, 单片叶面积乘以叶片总数即为植株叶面积($\text{m}^2/\text{株}$)。

1.3.2 干物质量测定及耗水量和水分生产率计算

将苹果树整株放入 105°C 干燥箱杀青后干燥至质量恒定, 百分之一天平测定其干物质量。

作物耗水量计算式为^[12]

$$ET = P_r + U + I - D - R - \Delta W \quad (1)$$

式中 ET ——作物耗水量

P_r ——降水量

U ——地下水补给量

I ——灌水量 R ——径流量

D ——深层渗漏量

ΔW ——生育期土壤水分变化量

由于采用遮雨棚及桶栽种植, 故 P_r 、 U 、 R 和 D 均忽略不计, 式(1)简化为

$$ET = I - \Delta W \quad (2)$$

作物水分生产率(kg/m^3)表示为作物单位水量消耗所能获得的产量, 反映了作物产出量与其耗水量间的关系, 可定义为^[13-14]

$$CWP = D_m / ET \quad (3)$$

式中 CWP ——水分生产率

D_m ——干物质量

1.3.3 叶绿素含量和光合特性测定及水分利用效率计算

采用便携式叶绿素仪(SPAD-502型, Knicoa Minolta, 日本)测定叶绿素含量(SPAD), 测定时每

株随机选取 10 片苹果叶取平均值。

光合特性的测定采用光合测定仪(LI-6400型, LI-COR, 美国), 在苹果需水关键的坐果膨大期(6月10日)10:00测定, 每个处理选取 5 片叶子取平均值。测定指标包括: 光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)和气孔导度(G_s)。

叶片瞬时水分利用效率(WUE , $\mu\text{mol}/\text{mmol}$)计算公式为

$$WUE = P_n / T_r \quad (4)$$

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 对数据进行整理和作图, 采用 SPSS Statistics 19.0 统计软件进行方差分析和显著性检验。

2 结果与分析

2.1 水肥耦合对苹果幼树不同生育期植株生长量的影响

水肥处理对苹果幼树不同生育期植株生长量的影响如表 2 所示, 其中不同灌水处理对苹果幼树成熟期植株生长量产生了显著影响($P < 0.05$), 对其他生育期均产生了极显著影响($P < 0.01$); 不同施肥处理对苹果幼树各生育期植株生长量均产生了显著影响($P < 0.05$); 水肥交互作用对苹果幼树萌芽开花期和成熟期植株生长量产生了极显著影响($P < 0.01$), 对新梢生长期产生了显著影响($P < 0.05$), 对坐果膨大期影响不显著; 灌水、施肥处理以及水肥交互作用对苹果幼树全生育期植株生长量均产生了极显著影响($P < 0.01$)。

表 2 水肥处理对苹果幼树不同生育期植株生长量的影响

Tab. 2 Effects of water and fertilizer treatments on growth of young apple tree at different growth stages cm

施肥处理	灌水处理	萌芽开花期	新梢生长期	坐果膨大期	成熟期	全生育期
F1	W1	(10.2 ± 0.8) ^{ab}	(14.5 ± 0.9) ^{ab}	(11.8 ± 1.3) ^{ab}	(7.4 ± 1.1) ^{ab}	(43.8 ± 4.2) ^{ab}
	W2	(10.9 ± 1.4) ^a	(15.4 ± 1.0) ^a	(13.1 ± 1.1) ^a	(7.6 ± 1.1) ^a	(47.0 ± 4.7) ^a
	W3	(8.6 ± 1.60) ^{abc}	(14.0 ± 0.5) ^{abc}	(10.8 ± 1.6) ^{abc}	(6.9 ± 0.8) ^{ab}	(40.1 ± 4.5) ^{abc}
	W4	(6.9 ± 0.8) ^{cd}	(12.6 ± 0.3) ^{bcd}	(9.1 ± 0.9) ^{bcd}	(5.7 ± 0.4) ^{abcd}	(34.2 ± 2.7) ^{bcd}
F2	W1	(8.4 ± 1.4) ^{abc}	(14.0 ± 0.6) ^{abc}	(10.4 ± 0.9) ^{abc}	(6.7 ± 1.2) ^{abc}	(39.4 ± 4.1) ^{abc}
	W2	(8.8 ± 1.3) ^{abc}	(15.0 ± 0.6) ^a	(11.3 ± 1.9) ^{abc}	(7.2 ± 1.7) ^{ab}	(42.3 ± 5.4) ^{ab}
	W3	(7.7 ± 1.7) ^{bcd}	(13.4 ± 0.5) ^{abcd}	(9.8 ± 0.9) ^{bc}	(4.9 ± 1.1) ^{bcd}	(35.7 ± 4.2) ^{bc}
	W4	(7.1 ± 1.6) ^{cd}	(12.0 ± 0.5) ^{cde}	(8.9 ± 1.1) ^{cd}	(4.3 ± 0.9) ^{cd}	(32.1 ± 4.1) ^{cd}
F3	W1	(7.6 ± 1.0) ^{bcd}	(14.0 ± 0.4) ^{abc}	(9.8 ± 0.8) ^{bc}	(5.8 ± 1.1) ^{abcd}	(37.2 ± 3.3) ^{abc}
	W2	(7.2 ± 0.9) ^{bcd}	(12.3 ± 1.6) ^{cd}	(9.4 ± 0.7) ^{bc}	(5.6 ± 1.4) ^{abcd}	(34.4 ± 4.7) ^{bcd}
	W3	(6.7 ± 1.0) ^{cd}	(11.5 ± 1.5) ^{de}	(8.9 ± 0.4) ^{cd}	(3.9 ± 0.4) ^d	(30.9 ± 3.2) ^{cd}
	W4	(5.1 ± 1.0) ^d	(10.1 ± 1.0) ^e	(6.4 ± 1.1) ^d	(3.8 ± 0.5) ^d	(25.4 ± 3.5) ^d
F	灌水	106.589 ^{**}	64.992 ^{**}	259.133 ^{**}	17.126 [*]	120.340 ^{**}
	施肥	42.120 [*]	27.477 [*]	34.951 [*]	46.356 [*]	274.284 ^{**}
	灌水 × 施肥	9.770 ^{**}	5.779 [*]	4.159	9.892 ^{**}	17.119 ^{**}

注: * 表示差异显著($P < 0.05$), ** 表示差异极显著($P < 0.01$); 同列数字后不同字母表示 $P < 0.05$ 水平差异显著, 下同。

从表2可以看出,灌水量相同时,苹果幼树植株生长量随施肥量的增加而增加,由大到小依次为F1、F2、F3;施肥量相同时,在F1和F2施肥处理下,苹果幼树植株生长量由大到小依次为W2、W1、W3、W4,在F3施肥处理下,苹果幼树植株生长量由大到小依次为W1、W2、W3、W4,这说明在施肥量达到一定条件时,轻度的水分亏缺处理反而更有利于苹果幼树植株的生长,但在低肥条件下植株生长量依旧表现为随灌水量的增加而增加。不同水肥处理下苹果幼树各生育期植株生长量最大值均出现在F1W2处理,萌芽开花期、新梢生长期、坐果膨大期、成熟期分别为10.9、15.4、13.1、7.6 cm,较高水高肥的F1W1处理分别增加了6.9%、6.2%、11.0%、2.7%,最小值均出现在F3W4处理,分别为5.1、10.1、6.4、3.8 cm,最大值、最小值差值分别为5.8、5.3、6.7、3.8 cm,由大到小依次为坐果膨大期、萌芽开花期、新梢生长期、成熟期,这说明不同水肥处理对苹果幼树坐果膨大期和萌芽开花期植株生长量影响最大,也说明了苹果幼树坐果膨大期和萌芽开花

期较其他生育期需水需肥敏感。在F1、F2和F3条件下,各灌水处理苹果幼树全生育期植株生长总量分别为165.1、149.5、127.8 cm,F2和F3分别比F1减少了9.4%和22.6%;在W1、W2、W3和W4条件下,各施肥处理苹果幼树全生育期植株生长总量分别为120.3、123.7、106.7、91.7 cm,W2和W1处理差异不大,比W1处理增加了2.8%,W3和W4处理分别比W1处理减少了11.3%和23.8%。

2.2 水肥耦合对苹果幼树不同生育期叶面积的影响

水肥处理对苹果幼树不同生育期叶面积的影响如表3所示,其中不同灌水处理对苹果幼树各生育期(萌芽开花期、新梢生长期、坐果膨大期、成熟期)叶面积均产生了极显著影响($P < 0.01$);不同施肥处理对苹果幼树萌芽开花期和坐果膨大期叶面积产生了显著影响($P < 0.05$),对新梢生长期叶面积产生了极显著影响($P < 0.01$),对成熟期叶面积影响不显著;水肥交互作用对苹果幼树萌芽开花期和坐果膨大期叶面积产生了极显著影响($P < 0.01$),对其他生育期叶面积影响不显著。

表3 水肥处理对苹果幼树不同生育期叶面积的影响

Tab.3 Effects of water and fertilizer treatments on leaf area of young apple tree at different growth stages

施肥处理		灌水处理	萌芽开花期	新梢生长期	坐果膨大期	成熟期
F1		W1	(1.18 ± 0.09) ^{abc}	(1.71 ± 0.14) ^a	(2.01 ± 0.22) ^{ab}	(2.12 ± 0.16) ^a
		W2	(1.29 ± 0.14) ^a	(1.81 ± 0.15) ^a	(2.11 ± 0.16) ^a	(2.19 ± 0.25) ^a
		W3	(1.00 ± 0.13) ^{bcde}	(1.52 ± 0.15) ^{abc}	(1.68 ± 0.13) ^{bcde}	(1.74 ± 0.12) ^{bc}
		W4	(0.87 ± 0.13) ^{def}	(1.31 ± 0.17) ^{bcde}	(1.47 ± 0.19) ^{defg}	(1.61 ± 0.14) ^{bcd}
F2		W1	(1.11 ± 0.11) ^{abcd}	(1.53 ± 0.16) ^{ab}	(1.80 ± 0.13) ^{abcd}	(1.94 ± 0.22) ^{ab}
		W2	(1.19 ± 0.11) ^{ab}	(1.60 ± 0.12) ^{ab}	(1.87 ± 0.10) ^{abc}	(1.96 ± 0.18) ^{ab}
		W3	(0.93 ± 0.11) ^{def}	(1.34 ± 0.09) ^{bcde}	(1.58 ± 0.16) ^{cdefg}	(1.71 ± 0.01) ^{bc}
		W4	(0.80 ± 0.12) ^{ef}	(1.16 ± 0.20) ^{de}	(1.32 ± 0.16) ^{fg}	(1.35 ± 0.17) ^d
F3		W1	(1.00 ± 0.07) ^{bcde}	(1.51 ± 0.11) ^{abcd}	(1.70 ± 0.11) ^{bcde}	(1.86 ± 0.10) ^{ab}
		W2	(0.94 ± 0.08) ^{cdef}	(1.35 ± 0.08) ^{bcde}	(1.61 ± 0.11) ^{cdef}	(1.71 ± 0.01) ^{bc}
		W3	(0.88 ± 0.01) ^{def}	(1.17 ± 0.21) ^{cde}	(1.40 ± 0.11) ^{efg}	(1.49 ± 0.10) ^{cd}
		W4	(0.70 ± 0.08) ^f	(1.03 ± 0.13) ^e	(1.23 ± 0.12) ^g	(1.33 ± 0.05) ^d
F	灌水		276.662 ^{**}	168.083 ^{**}	601.816 ^{**}	98.422 ^{**}
	施肥		19.301 [*]	560.794 ^{**}	55.845 [*]	17.702
	灌水 × 施肥		9.002 ^{**}	3.369	11.462 ^{**}	1.970

从表3可以看出,灌水量相同时,苹果幼树叶面积随施肥量的增加而增加,由大到小依次为F1、F2、F3;施肥量相同时,在F1和F2施肥处理下,苹果幼树叶面积由大到小依次为W2、W1、W3、W4,在F3施肥处理下,苹果幼树叶面积由大到小依次为W1、W2、W3、W4,这说明在施肥量达到一定条件时,轻度的水分亏缺处理反而更有利于苹果幼树叶片的生长,但在低肥条件下叶面积依旧表现为随灌水量的增加而增加。不同水肥处理下苹果幼树各生育期叶面积最大值均出现在F1W2处理,萌芽开花期、新梢生长期、坐果膨大期、成熟期分别为1.29、1.81、

2.11、2.19 m²/株,较高水高肥的F1W1处理分别增加了9.3%、5.8%、5.0%、3.3%,由大到小依次为萌芽开花期、新梢生长期、坐果膨大期、成熟期,这说明轻度的水分亏缺处理有利于苹果幼树叶片的生长,但随着苹果幼树的生长高水高肥的F1W1处理与F1W2处理间的差异越来越小;最小值均出现在F3W4处理,分别为0.70、1.03、1.23、1.33 m²/株,最大值、最小值差值分别为0.59、0.78、0.88、0.86 m²/株,由大到小依次为坐果膨大期、成熟期、萌芽开花期、新梢生长期,这说明水肥处理对苹果幼树叶面积的影响在生育前期和中期越来越大,但在

生育后期(成熟期)趋于稳定。在 F1、F2 和 F3 条件下,各灌水处理苹果幼树全生育期叶面积增长总量分别为 7.66、6.95、6.39 m²/株, F2 和 F3 分别比 F1 减少了 9.3% 和 16.6%; 在 W1、W2、W3 和 W4 条件下,各施肥处理苹果幼树全生育期叶面积增长总量分别为 5.92、5.86、4.94、4.28 m²/株, W1 和 W2 处理差异不大, W2、W3、W4 处理分别比 W1 处理减少了 1.0%、16.6%、27.7%。

2.3 水肥耦合对苹果幼树不同时期叶绿素含量的影响

水肥处理对苹果幼树不同时期叶绿素含量 (SPAD) 的影响如图 1 所示, 其中 4 月 3 日和 4 月 18

日为萌芽开花期, 5 月 3 日和 5 月 18 日为新梢生长期, 6 月 2 日和 6 月 17 日为坐果膨大期, 7 月 2 日和 7 月 17 日为成熟期。不同灌水处理对苹果幼树新梢生长期 SPAD 产生了显著影响 ($P < 0.05$), 对坐果膨大期和成熟期产生了极显著影响 ($P < 0.01$); 不同施肥处理对苹果幼树新梢生长期和坐果膨大期 SPAD 产生了显著影响 ($P < 0.05$), 对成熟期产生了极显著影响 ($P < 0.01$); 水肥交互作用对苹果幼树新梢生长期 SPAD 产生了显著影响 ($P < 0.05$), 对坐果膨大期和成熟期产生了极显著影响 ($P < 0.01$); 灌水、施肥和水肥交互作用对苹果幼树萌芽开花期 SPAD 影响均不显著。

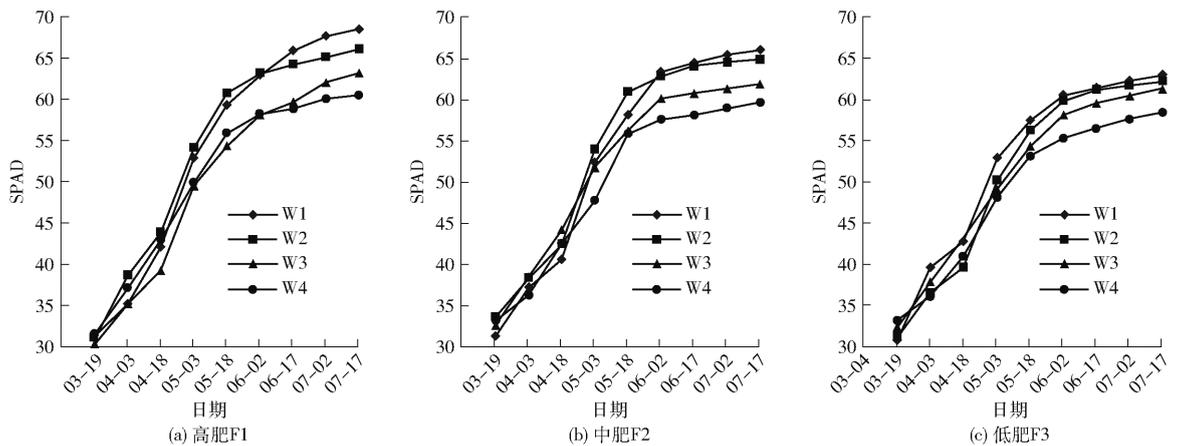


图 1 水肥处理对苹果幼树不同时期叶绿素含量 (SPAD) 的影响

Fig. 1 Effects of water and fertilizer treatments on SPAD of young apple tree at different stages

从图 1 可以看出, 苹果幼树 SPAD 随生育期不断增加, 在萌芽开花期和新梢生长期急剧增加, 随后在坐果膨大期和成熟期增加逐步趋于平缓。灌水量相同时, 苹果幼树在新梢生长期、坐果膨大期和成熟期 SPAD 随施肥量的增加而增加, 由大到小依次为 F1、F2、F3; 施肥量相同时, 在 F1 和 F2 施肥处理下, 新梢生长期 SPAD 由大到小依次为 W2、W1、W3、W4, 在 F3 施肥处理下由大到小依次为 W1、W2、W3、W4, 在坐果膨大期和成熟期各施肥处理 SPAD 由大到小依次为 W1、W2、W3、W4。不同水肥处理下苹果幼树新梢生长期 SPAD 最大值 (57.5) 出现在 F1W2 处理, 坐果膨大期和成熟期 SPAD 最大值均出现在 F1W1 处理, 分别为 64.4 和 68.1; 新梢生长期、坐果膨大期和成熟期 SPAD 最小值均出现在 F3W4 处理, 分别为 50.6、55.9 和 58.0, 与最大值的差值由大到小依次为成熟期、坐果膨大期、新梢生长期, 这说明随着苹果幼树的生长, 不同水肥处理对苹果幼树叶片 SPAD 的影响越来越大。

2.4 水肥耦合对苹果幼树全生育期干物质质量、耗水量和水分生产率的影响

水肥处理对苹果幼树全生育期干物质质量、耗水

量和水分生产率的影响如表 4 所示, 灌水对苹果全生育期干物质质量、耗水量和水分生产率产生了极显著影响 ($P < 0.01$), 施肥对苹果全生育期干物质质量、耗水量产生了显著影响 ($P < 0.05$), 对水分生产率影响不显著; 水肥交互对苹果全生育期干物质质量产生了显著影响 ($P < 0.05$), 对耗水量和水分生产率影响不显著。

从表 4 可以看出, 灌水量相同时, 苹果幼树干物质质量随施肥量的增加而增加, 由大到小依次为 F1、F2、F3; 施肥量相同时, 在 F1 和 F2 施肥处理下, 苹果幼树干物质质量由大到小依次为 W2、W1、W3、W4, 在 F3 施肥处理下, 由大到小依次为 W1、W2、W3、W4, 这说明在施肥量达到一定条件时, 轻度的水分亏缺处理反而更有利于苹果幼树干物质质量的积累, 但在低肥条件下干物质质量依旧表现为随灌水量的增加而增加。不同水肥处理下苹果幼树全生育期干物质质量最大值 (543.27 g/株) 出现在 F1W2 处理, 与高水高肥的 F1W1 处理差异不大, 仅增加了 0.8%。在 F1、F2 和 F3 条件下, 各灌水处理苹果幼树全生育期干物质总量分别为 1 981.32、1 872.36、1 779.53 g/株, F2 和 F3 分别比 F1 减少了 5.5% 和

表4 水肥处理对苹果幼树全生育期干物质质量、耗水量和水分生产率的影响

Tab.4 Effects of water and fertilizer treatments on dry mass, water consumption and crop water productivity (CWP) of young apple trees

施肥处理	灌水处理	干物质量/(g·株 ⁻¹)	耗水量/(L·株 ⁻¹)	水分生产率/(kg·m ⁻³)
F1	W1	(539.05 ± 18.77) ^{ab}	(255.21 ± 11.31) ^a	(2.12 ± 0.02) ^d
	W2	(543.27 ± 26.87) ^a	(224.03 ± 9.19) ^{bcd}	(2.43 ± 0.02) ^a
	W3	(482.88 ± 31.90) ^{bcd}	(203.15 ± 13.86) ^{de}	(2.38 ± 0.01) ^{ab}
	W4	(416.13 ± 21.92) ^{ef}	(178.91 ± 11.00) ^{fgh}	(2.33 ± 0.02) ^{ab}
F2	W1	(508.71 ± 23.33) ^{abc}	(241.02 ± 9.90) ^{ab}	(2.11 ± 0.01) ^d
	W2	(509.20 ± 14.81) ^{abc}	(215.15 ± 8.49) ^{cd}	(2.37 ± 0.02) ^{ab}
	W3	(459.47 ± 24.96) ^{cde}	(192.40 ± 9.21) ^{ef}	(2.39 ± 0.01) ^{ab}
	W4	(394.98 ± 36.70) ^f	(170.42 ± 10.61) ^{gh}	(2.32 ± 0.07) ^b
F3	W1	(504.68 ± 8.49) ^{abc}	(233.76 ± 6.65) ^{bc}	(2.16 ± 0.03) ^{cd}
	W2	(459.52 ± 20.66) ^{cde}	(206.63 ± 3.54) ^{de}	(2.23 ± 0.06) ^c
	W3	(434.82 ± 29.13) ^{def}	(185.31 ± 5.55) ^{efg}	(2.35 ± 0.09) ^{ab}
	W4	(380.51 ± 14.48) ^f	(163.44 ± 7.07) ^h	(2.33 ± 0.01) ^{ab}
F	灌水	232.017 ^{**}	1 321.393 ^{**}	66.725 ^{**}
	施肥	84.744 [*]	19.785 [*]	3.142
	灌水 × 施肥	5.435 [*]	3.357	3.086

10.2%；在 W1、W2、W3 和 W4 条件下，各施肥处理苹果幼树全生育期干物质总量分别为 1 552.44、1 511.99、1 377.17、1 191.62 g/株，W1 和 W2 处理差异不大，W2、W3、W4 处理分别比 W1 处理减少了 2.6%、11.3%、23.2%。

苹果幼树全生育期耗水量随灌水量和施肥量的增加呈递增的趋势，灌水量相同时，由大到小依次为 F1、F2、F3；施肥量相同时，由大到小依次为 W1、W2、W3、W4。在 F1 施肥处理下，苹果全生育期水分生产率由大到小依次为 W2、W3、W4、W1；在 F2 施肥处理下，苹果全生育期水分生产率由大到小依次为 W3、W2、W4、W1；在 F3 施肥处理下，苹果全生育期水分生产率由大到小依次为 W3、W4、W2、W1，这说明苹果幼树在充分供水时水分生产率反而最小。水分生产率最大值(2.43 kg/m³)出现在 F1W2 处理，与高水高肥的 F1W1 处理相比增加了 14.6%。因此，在 F1W2 水肥处理下苹果幼树全生育期干物质质量和水分生产率均达到最大值，且与 F1W1 处理相比分别增加了 0.8% 和 14.6%，耗水量却减少了 12.2%，F1W2 水肥处理为最佳的水肥耦合模式。

2.5 水肥耦合对苹果幼树光合特性及水分利用效率的影响

水肥处理对苹果幼树叶片净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和水分利用效率的影响如图 2 所示(图中不同小写字母表示处理间差异显著, $P < 0.05$)，灌水对苹果坐果膨大期净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和水分利用效率均产生了极显著影响($P < 0.01$)；施肥对苹果幼树气孔导度产生了极显

著影响($P < 0.01$)，对净光合速率和水分利用效率产生了显著影响($P < 0.05$)，对蒸腾速率影响不显著；水肥交互对苹果坐果膨大期净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和水分利用效率的影响均不显著。

从图 2 可以看出，灌水量相同时，苹果幼树净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和水分利用效率基本上随施肥量的增加而增加，由大到小依次为 F1、F2、F3；施肥量相同时，苹果幼树净光合速率、蒸腾速率和气孔导度随灌水量的增加而增加，由大到小依次为 W1、W2、W3、W4，而水分利用效率在 F1 和 F2 施肥处理下，由大到小依次为 W2、W1、W3、W4，在 F3 施肥处理下，由大到小依次为 W1、W2、W3、W4，这说明施肥量达到一定条件时，轻度的水分亏缺处理更有利于提高苹果幼树叶片的瞬时水分利用效率。不同水肥处理下苹果幼树净光合速率、蒸腾速率和气孔导度的最大值均出现在高水高肥的 F1W1 处理，F1W2 处理与其相比，分别降低了 4.2%、9.7% 和 4.2%；水分利用效率最大值出现在 F1W2 处理，比 F1W1 处理提高了 5.9%；不同水肥处理下苹果幼树净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和水分利用效率最小值均出现在 F3W4 处理。

F1、F2 和 F3 条件下，各灌水处理苹果幼树净光合速率总量分别为 90.49、85.58、78.21 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ，F2 和 F3 分别比 F1 减少了 5.4% 和 13.6%；蒸腾速率总量分别为 21.97、20.93、20.76 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ，F2 和 F3 分别比 F1 减少了 4.7% 和 5.5%；气孔导度总量分别为 1 404.46、1 328.45、1 217.63 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ，F2 和 F3 分别比 F1 减少了 5.4% 和 13.3%；水分利用效率总量分别为 16.38、16.30、14.99 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ ，F2 和

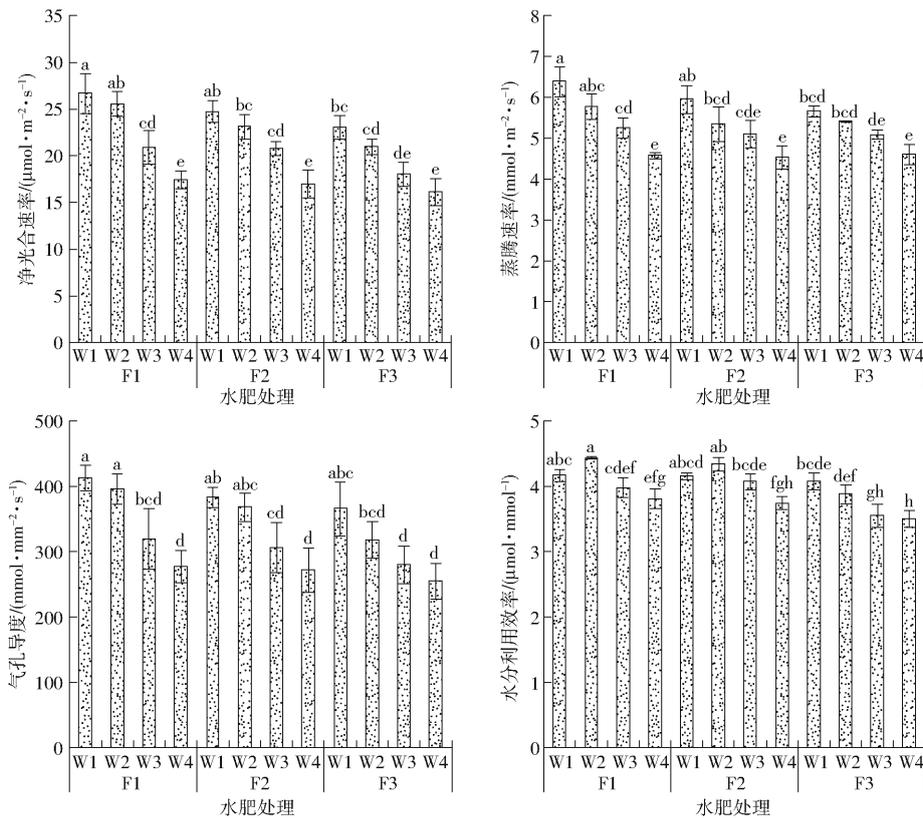


图 2 水肥处理对苹果幼树光合特性及水分利用效率的影响

Fig. 2 Effects of water and fertilizer treatments on photosynthetic characteristics and water use efficiency of young apple tree

F3 分别比 F1 减少了 0.5% 和 8.5%。在 W1、W2、W3 和 W4 条件下,各施肥处理苹果幼树净光合速率总量分别为 74.44、69.62、59.71、50.50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, W2、W3、W4 分别比 W1 减少了 6.5%、19.8%、32.2%;蒸腾速率总量分别为 18.00、16.51、15.44、13.71 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, W2、W3、W4 分别比 W1 减少了 8.3%、14.2%、23.8%;气孔导度总量分别为 1160.71、1080.81、905.30、803.71 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, W2、W3、W4 分别比 W1 减少了 6.9%、22.0%、30.8%;水分利用效率总量分别为 12.40、12.64、11.59、11.04 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$, W2 比 W1 增加了 1.9%, W3 和 W4 分别比 W1 减少了 6.5% 和 11.0%。

2.6 苹果幼树植株生长量与其他指标间的相关关系

苹果幼树植株生长量与净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、生育期耗水量、水分生产率以及水分利用效率间的相关关系如图 3 所示,从图中可以看出,苹果幼树植株生长量与净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、生育期耗水量以及水分利用效率间具有较好的直线线性关系,决定系数 R^2 分别为 0.738 9、0.577 2、0.805 8、0.618 3、0.666 5,这说明不同水肥处理条件下苹果幼树植株的生长与这些指标密切相关。苹果幼树植株生长量与水分生产率间的关系不大, R^2 仅为 0.001。

2.7 苹果幼树叶面积与其他指标间的相关关系

苹果幼树冠层叶面积与净光合速率、蒸腾速率、

气孔导度、生育期耗水量、水分生产率以及水分利用效率间的相关关系如图 4 所示,从图中可以看出,苹果幼树叶面积与净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、生育期耗水量以及水分利用效率间具有较好的直线线性关系, R^2 分别为 0.867 0、0.743 0、0.866 8、0.790 2、0.677 4,这说明不同水肥处理条件下苹果幼树叶面积的生长与这些指标密切相关。苹果幼树叶面积与水分生产率间的关系不大, R^2 仅为 0.046 4。

2.8 苹果幼树净光合速率与其他指标间的相关关系

苹果幼树叶片净光合速率与蒸腾速率、气孔导度、SPAD、生育期耗水量、水分生产率以及水分利用效率间的相关关系如图 5 所示,从图中可以看出,苹果幼树叶片净光合速率与蒸腾速率、气孔导度、SPAD、生育期耗水量以及水分利用效率间具有较好的直线线性关系, R^2 分别为 0.896 9、0.903 0、0.895 7、0.893 5、0.735 7,这说明不同水肥处理条件下苹果幼树叶片净光合速率与这些指标密切相关。苹果幼树叶片净光合速率与水分生产率间的关系不大, R^2 仅为 0.151 9。

2.9 苹果幼树干物质质量与其他指标间的相关关系

苹果幼树干物质质量与植株生长量、叶面积、SPAD、净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、生育期耗水量、水分生产率以及水分利用效率间的相关关系

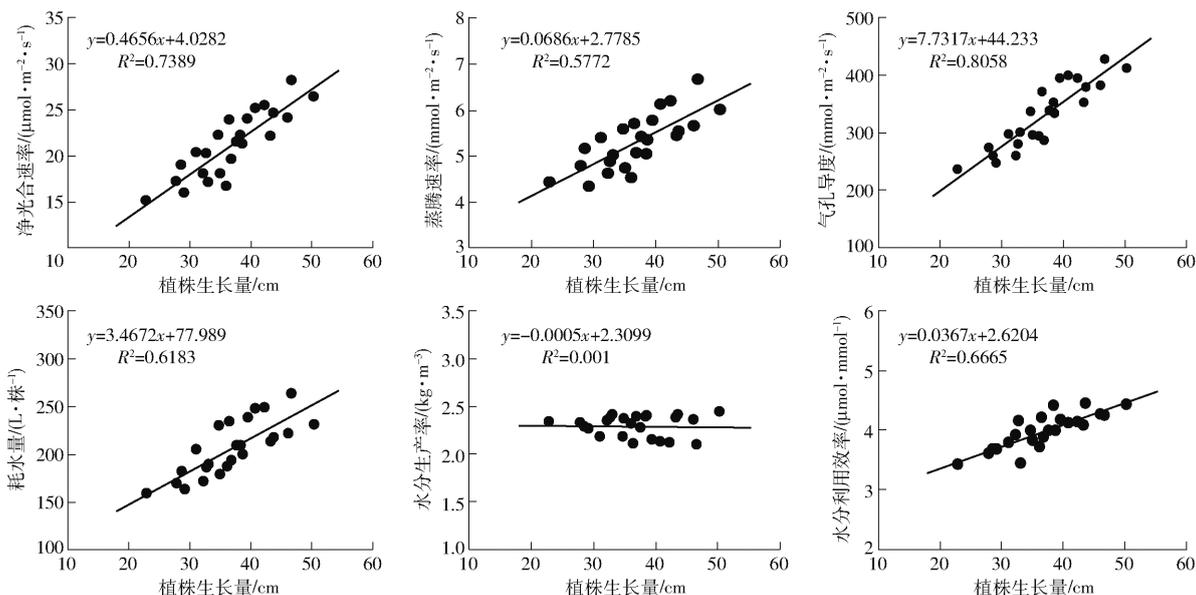


图3 苹果幼树植株生长量与其他指标间的相关关系

Fig. 3 Correlation between growth and other indexes of young apple tree

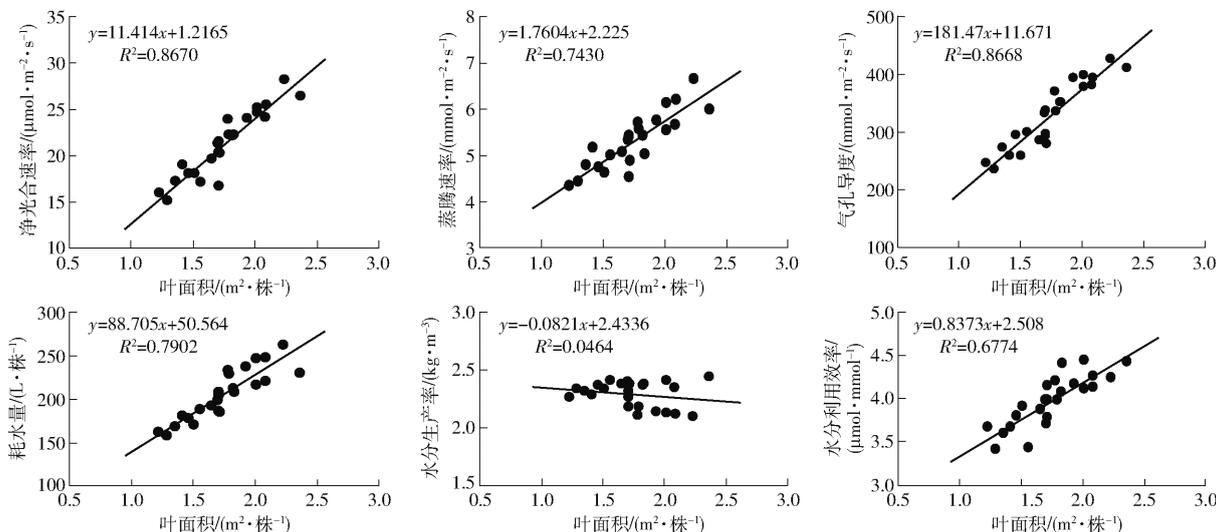


图4 苹果幼树叶面积与其他指标间的相关关系

Fig. 4 Correlation between leaf area and other indexes of young apple tree

如图6所示,从图中可以看出,苹果幼树干物质量与植株生长量、叶面积、SPAD、净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、生育期耗水量以及水分利用效率间具有较好的直线线性关系, R^2 分别为0.8453、0.9197、0.8649、0.8967、0.8010、0.9254、0.8628、0.6701,这说明不同水肥处理条件下苹果幼树干物质量与这些指标密切相关。

3 讨论

灌水量和施肥量是影响作物生长发育的两个关键因素^[15],合理的灌溉和施肥制度可以促进作物的健康生长^[16-17]。前人研究表明,一定程度上增加灌水量和减少施肥量可以促进辣椒植株的生长量和干物质量^[18];灌水和施肥有明显的交互作用,灌水量

和施氮量控制在一定区间可以提高玉米的株高、叶面积和产量^[19];在不同灌水处理下,增加施氮量均能够显著增加水稻株高和叶片SPAD,高的施肥量能够一定程度弥补灌水量减少对植株生长的影响^[20];水肥耦合条件下,小粒咖啡苗木的株高、叶面积和干物质量均随灌水量和施肥量的增加而增加^[21]。本研究表明,灌水量相同时,苹果幼树植株生长量、叶面积、SPAD和干物质量均随施肥量的增加而增加,由大到小依次为F1、F2、F3;施肥量相同时,在F1和F2施肥处理下,苹果幼树植株生长量、叶面积、SPAD和干物质量由大到小依次为W2、W1、W3、W4,在F3施肥处理下,由大到小依次为W1、W2、W3、W4,这说明在施肥量达到一定条件时,轻度的水分亏缺处理反而更有利于苹果幼树植株的

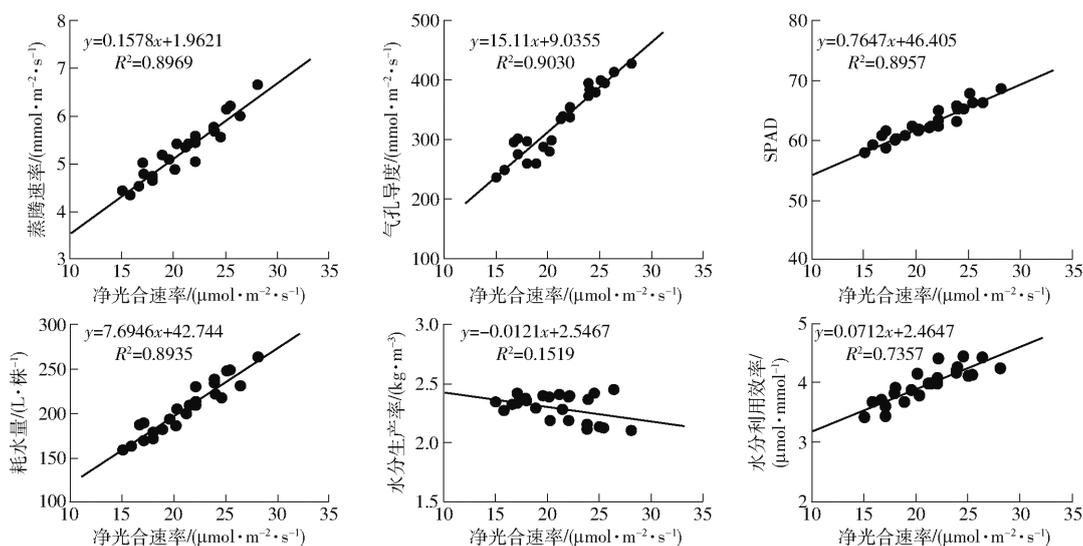


图 5 苹果幼树净光合速率与其他指标间的相关关系

Fig. 5 Correlation between net photosynthetic rate and other indexes of young apple tree

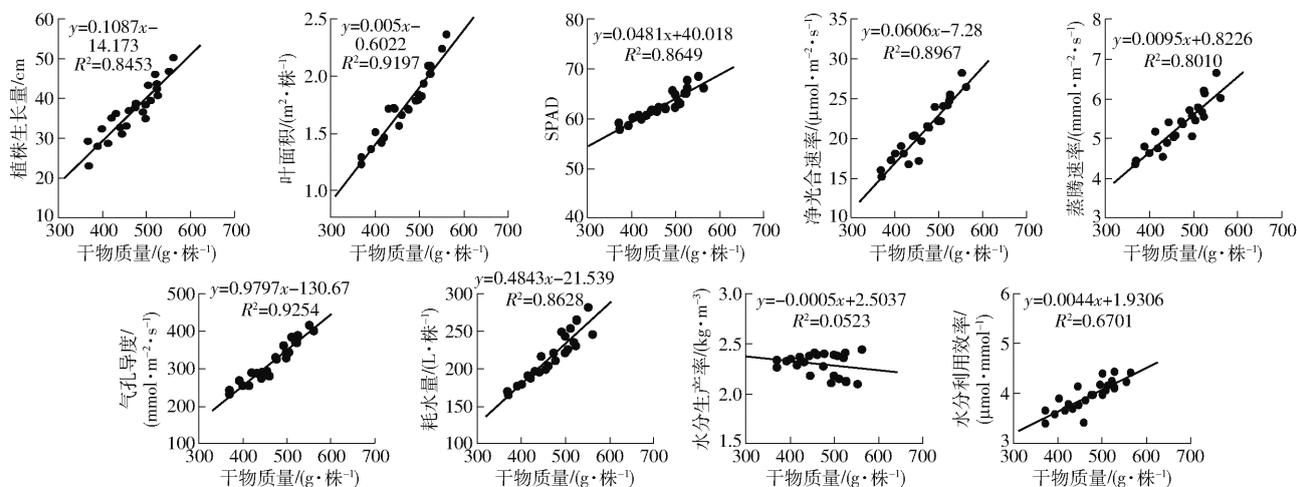


图 6 苹果幼树干物质量与其他指标间的相关关系

Fig. 6 Correlation between dry mass and other indexes of young apple tree

生长和生物量的积累,但在低肥条件下植株生长量、叶面积、SPAD 和干物质量依旧表现为随灌水量的增加而增加,这与前人在水肥耦合条件下对两年生苹果幼树的研究结果并不一致^[22]。

作物水分生产率反映了作物产出量与其耗水量间的关系^[23],作物耗水量和灌水量密切相关,施肥量一定程度也会影响作物的耗水量。前人研究表明,不同水肥条件下温室黄瓜全生育期耗水量随灌水量的增加而增加,生育后期随着灌溉量的增加黄瓜耗水量逐渐趋于平稳^[24];灌水量在一定条件下,施氮量超过 300 kg/hm² 不仅不能增加番茄产量,而且降低了番茄水分生产率^[25];不同水氮耦合条件下灌水量和施肥量对黄金梨水分生产率影响显著,水分生产率随施肥量的增加而增加,随灌水量的增加呈现“U”形变化^[26]。本研究表明,苹果幼树全生育期耗水量随灌水量和施肥量的增加呈递增的趋势,在 F1 施肥处理下,苹果全生育期水分生产率由大到

小依次为 W2、W3、W4、W1;在 F2 施肥处理下,由大到小依次为 W3、W2、W4、W1;在 F3 施肥处理下,由大到小依次为 W3、W4、W2、W1,这说明苹果幼树在充分供水时水分生产率反而最小。

作物光合、蒸腾和呼吸作用是其重要的生理特性,水分和肥料在此过程中起着非常重要的作用^[22]。前人研究表明,不同水肥条件下红枣净光合速率与蒸腾速率、气孔导度之间密切相关,过高或过低的灌水量均不利于红枣光合作用和生长发育,较低的施肥量可以促进其生长^[27];水肥耦合条件下增加灌水量一定程度上可以提高小粒咖啡苗木的水分利用效率,高水中肥耦合能够促进其生长和增加水分利用效率^[21];灌水量和施肥量均对沙土马铃薯水分利用效率影响显著^[28]。本研究表明,灌水量相同时,苹果幼树净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和水分利用效率基本上随施肥量的增加而增加,由大到小依次为 F1、F2、F3;施肥量相同时,苹果幼树净光

合速率、蒸腾速率和气孔导度随灌水量的增加而增加,由大到小依次为 W1、W2、W3、W4,而水分利用效率在 F1 和 F2 施肥处理下,由大到小依次为 W2、W1、W3、W4,在 F3 施肥处理下,由大到小依次为 W1、W2、W3、W4,这说明施肥量达到一定条件时,轻度的水分亏缺处理更有利于提高苹果幼树叶片的瞬时水分利用效率。

作物生长量、叶面积和干物质量是反映植物生理生化的指标,对于深入研究光合效率、蒸腾速率和逆境胁迫等生理指标有重要意义^[29]。前人研究表明,苹果幼树植株生长量、叶面积分别与净光合速率、蒸腾速率和气孔导度呈现较好的直线线性关系^[30]。本研究表明,苹果幼树植株生长量和叶面积分别与净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、生育期耗水量以及水分利用效率间具有较好的直线线性关系,苹果幼树干物质量与植株生长量、叶面积、SPAD、净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、生育期耗水量以及水分利用效率间也具有较好的直线线性关系,这说明不同水肥处理条件下苹果幼树植株的生长、叶面积和干物质量与这些指标密切相关,生长指标一定程度上可以反映作物的生理特性。

4 结论

(1) 苹果幼树植株生长量、叶面积和干物质量随施肥量的增加而增加,轻度的水分亏缺处理反而更有利于苹果幼树植株的生长和生物量的积累,不同水肥处理下苹果幼树各生育期植株生长量、叶面积和干物质量最大值均出现在 F1W2 处理,最小值均出现在 F3W4 处理。植株生长量和叶面积在萌芽开花期、新梢生长期、坐果膨大期、成熟期较高水高

肥的 F1W1 处理分别增加了 6.9%、6.2%、11.0%、2.7% 和 9.3%、5.8%、5.0%、3.3%。全生育期干物质量最大值为 543.27 g/株,与 F1W1 处理相比仅增加了 0.8%。

(2) 灌水、施肥和水肥交互作用对苹果幼树萌芽开花期 SPAD 影响均不显著,不同水肥处理下苹果幼树新梢生长期 SPAD 最大值出现在 F1W2 处理,坐果膨大期和成熟期 SPAD 最大值均出现在 F1W1 处理,最小值均出现在 F3W4 处理,随着苹果幼树的生长,不同水肥处理对苹果幼树叶片的 SPAD 的影响越来越大。

(3) 苹果幼树全生育期耗水量随灌水量和施肥量的增加呈递增趋势,在充分供水时水分生产率反而最小,在 F1W2 水肥处理下苹果幼树全生育期水分生产率均达到最大值(2.43 kg/m³),且与 F1W1 处理相比增加了 14.6%,耗水量却减少了 12.2%,F1W2 水肥处理为最佳的水肥耦合模式。

(4) 苹果幼树净光合速率、蒸腾速率和气孔导度基本上随灌水量和施肥量的增加而增加,轻度的水分亏缺处理更有利于提高苹果幼树叶片的的水分利用效率。不同水肥处理下苹果幼树净光合速率、蒸腾速率和气孔导度的最大值均出现在高水高肥的 F1W1 处理,F1W2 处理与其相比,分别降低了 4.2%、9.7% 和 4.2%;水分利用效率最大值出现在 F1W2 处理,比 F1W1 处理提高了 5.9%。

(5) 不同水肥耦合条件下苹果幼树植株的生长量、叶面积和干物质量密切相关,与 SPAD、净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、生育期耗水量以及水分利用效率间也具有较好的直线线性关系,生长指标一定程度上可以反映作物的生理特性。

参 考 文 献

- [1] 康绍忠. 贯彻落实国家节水行动方案 推动农业适水发展与绿色高效节水[J]. 中国水利, 2019(13): 1-6. KANG Shaozhong. National water conservation initiative for promoting water-adapted and green agriculture and highly-efficient water use[J]. China Water Resources, 2019(13): 1-6. (in Chinese)
- [2] 高祥照. 水肥一体化是现代农业的“一号技术”[J]. 中国农资, 2017(20): 19. GAO Xiangzhao. Integration of water and fertilizer is the “No. 1 technology” of modern agriculture[J]. China Agri-Production News, 2017(20): 19. (in Chinese)
- [3] WANG H, WU L, CHENG M, et al. Coupling effects of water and fertilizer on yield, water and fertilizer use efficiency of drip-fertigated cotton in Northern Xinjiang, China[J]. Field Crops Research, 2018, 219(2): 169-179.
- [4] ZHOU H, NIU X, YAN H, et al. Interactive effects of water and fertilizer on yield, soil water and nitrate dynamics of young apple tree in semiarid region of Northwest China[J]. Agronomy, 2019, 9(7): 360.
- [5] LIU X, LI M, GUO P, et al. Optimization of water and fertilizer coupling system based on rice grain quality[J]. Agricultural Water Management, 2019, 221(8): 34-46.
- [6] 丛鑫, 张立志, 徐征和, 等. 水氮互作对冬小麦水肥利用效率与经济效益的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 315-324. CONG Xin, ZHANG Lizhi, XU Zhenghe, et al. Effects of irrigation and nitrogen interaction on water and fertilizer use efficiency and economic benefits of winter wheat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 315-324. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20210335&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.03.035. (in Chinese)
- [7] MAHARJAN B, ROSEN C J, LAMB J A, et al. Corresponsion to nitrogen management under fully-irrigated vs. water-stressed

- conditions[J]. *Agronomy Journal*, 2016, 108(5): 2089.
- [8] ZHAO He, LIU Hongquan. Progress of coupled water and fertilizer research in winter wheat and summer corn[J]. *World Scientific Research Journal*, 2020, 6(9): 186 - 191.
- [9] 严富来, 张富仓, 范兴科, 等. 水氮互作对宁夏沙土春玉米产量与氮素吸收利用的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2020, 51(7): 283 - 293.
YANG Fulai, ZHANG Fucang, FAN Xingke, et al. Effects of water and nitrogen fertilizer supply on yield and nitrogen absorption and utilization efficiency of spring maize in sandy soil area in Ningxia[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(7): 283 - 293. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200732&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.032. (in Chinese)
- [10] 李欢欢, 刘浩, 庞婕, 等. 水氮互作对盆栽番茄生长发育和养分累积的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(9): 272 - 279.
LI Huanhuan, LIU Hao, PANG Jie, et al. Effects of water and nitrogen interaction on growth and nutrient accumulation of potted tomatoes[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(9): 272 - 279. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190932&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.032. (in Chinese)
- [11] 李静, 张富仓, 方栋平, 等. 水氮供应对滴灌施肥条件下黄瓜生长及水分利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(22): 4475 - 4487.
LI Jing, ZHANG Fucang, FANG Dongping, et al. Effects of water and nitrogen supply on the growth and water use efficiency of cucumber (*Cucumis sativus* L.) under fertigation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(22): 4475 - 4487. (in Chinese)
- [12] OWEIS T Y, FARAHANI H J, HACHUM A Y. Evapotranspiration and water use of full and deficit irrigated cotton in the Mediterranean environment in Northern Syria[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(8): 1239 - 1248.
- [13] 徐迪, 龚时宏, 李益农, 等. 作物水分生产率改善途径与方法研究综述[J]. *水利学报*, 2010, 41(6): 631 - 639.
XU Di, GONG Shihong, LI Yinong, et al. Overview of recent study on improvement approaches and methods for crop water productivity[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(6): 631 - 639. (in Chinese)
- [14] ALI M H, TALUKDER M S U. Increasing water productivity in crop production—a synthesis[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(11): 1201 - 1213.
- [15] 李萌. 南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. Effects of irrigation and fertilization regulation and growth simulation of drip irrigation cotton under mulch in Southern Xinjiang[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020. (in Chinese)
- [16] 周罕觅, 张富仓, ROGER Kjelgren, 等. 水肥耦合对苹果幼树产量、品质和水肥利用的效应[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(12): 173 - 183.
ZHOU Hanmi, ZHANG Fucang, ROGER Kjelgren, et al. Effects of water and fertilizer coupling on yield, fruit quality and water and fertilizer use efficiency of young apple tree[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(12): 173 - 183. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151224&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.024. (in Chinese)
- [17] LI J, ZHANG Z, YAO C, et al. Improving winter wheat grain yield and water-/nitrogen-use efficiency by optimizing the micro-sprinkling irrigation amount and nitrogen application rate[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, 20(2): 606 - 621.
- [18] 高文瑞, 王欣, 李德翠, 等. 不同水肥组合对辣椒植株生长及养分吸收的影响[J]. *中国农学通报*, 2021, 37(9): 49 - 56.
GAO Wenrui, WANG Xin, LI Decui, et al. Different combinations of fertilizer and water: effects on plant growth and nutrient absorption of pepper[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(9): 49 - 56. (in Chinese)
- [19] 孙云云, 刘方明, 高玉山, 等. 吉林西部膜下滴灌水氮调控对玉米生长及水肥利用的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(11): 76 - 82.
SUN Yunyun, LIU Fangming, GAO Yushan, et al. Regulating water and fertilizer application in film-mulched drip irrigation to improve growth and water-fertilizer utilization of maize in Western Jilin[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(11): 76 - 82. (in Chinese)
- [20] 吴宗钊, 原保忠. 水肥耦合对水稻生长、产量及氮素利用效率的影响[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(4): 199 - 207, 215.
WU Zongzhao, YUAN Baozhong. Effect of water and fertilizer coupling on growth, yield and nitrogen use efficiency of rice[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2020, 31(4): 199 - 207, 215. (in Chinese)
- [21] 刘小刚, 徐航, 程金焕, 等. 水肥耦合对小粒咖啡苗木生长和水分利用的影响[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2014, 40(1): 33 - 40.
LIU Xiaogang, XU Hang, CHENG Jinhuan, et al. Coupling effects of water and fertilization on growth and water use of *Coffea arabica* seedling[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences)*, 2014, 40(1): 33 - 40. (in Chinese)
- [22] 周罕觅. 苹果幼树水肥耦合效应及高效利用机制研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2015.
ZHOU Hanmi. Water and fertilizer coupling effects and efficient utilization mechanism of young apple tree[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese)
- [23] 罗振, 辛承松, 李维江, 等. 部分根区灌溉与合理密植对旱区棉花产量和水分生产率的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(9): 3137 - 3146.
LUO Zhen, XIN Chengsong, LI Weijiang, et al. Effects of partial root-zone irrigation and rational close planting on yield and water productivity of cotton in arid area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(9): 3137 - 3146. (in Chinese)

- [24] 王丽学, 李振华, 姜熙, 等. 不同水肥条件对温室黄瓜生长及产量品质的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2019, 50(1): 78-86.
WANG Lixue, LI Zhenhua, JIANG Xi, et al. Effects of different water and fertilizer conditions on growth, yield and quality of greenhouse cucumber[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2019, 50(1): 78-86. (in Chinese)
- [25] LI H, LIU H, GONG X, et al. Optimizing irrigation and nitrogen management strategy to trade off yield, crop water productivity, nitrogen use efficiency and fruit quality of greenhouse grown tomato[J]. Agricultural Water Management, 2021, 265: 106570.
- [26] 刘亚南, 白美健, 张宝忠, 等. 黄金梨产量及水肥生产率对水氮耦合的响应[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(11): 68-75.
LIU Ya'nan, BAI Meijian, ZHANG Baozhong, et al. Impact of different water-nitrogen couplings on yield and water-nitrogen productivity of golden pear[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(11): 68-75. (in Chinese)
- [27] 扁青永, 王振华, 胡家帅, 等. 水肥供应对南疆沙区滴灌红枣生理、生长及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(4): 165-171.
BIAN Qingyong, WANG Zhenhua, HU Jiashuai, et al. Effects of water and fertilizer supply on physiology, growth and yield of drip-irrigation jujube in the Southern Xinjiang sandy area[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(4): 165-171. (in Chinese)
- [28] 张富仓, 高月, 焦婉如, 等. 水肥供应对榆林沙土马铃薯生长和水肥利用效率的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 270-278.
ZHANG Fucang, GAO Yue, JIAO Wanru, et al. Effects of water and fertilizer supply on growth, water and nutrient use efficiencies of potato in sandy soil of Yulin area[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 270-278. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170334&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.034. (in Chinese)
- [29] NAN A, CHRISTINE M P, ROBERT L B, et al. Plant high-throughput phenotyping using photogrammetry and imaging techniques to measure leaf length and rosette area[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 127: 376-394.
- [30] 周罕觅, 牛晓丽, 燕辉, 等. 水肥耦合对苹果幼树生长及光合特性的影响[J]. 河南农业科学, 2019, 48(10): 112-119.
ZHOU Hanmi, NIU Xiaoli, YAN Hui, et al. Effects of water and fertilizer coupling on growth and photosynthetic characteristics of young apple tree[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2019, 48(10): 112-119. (in Chinese)

(上接第 326 页)

- [25] 朱磊, 马荣, 范东峻, 等. 考虑相关长度的土壤开裂模型改进及其参数对裂隙形态的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 123-131.
ZHU Lei, MA Rong, FAN Dongjun, et al. Soil cracking improved model considering with correlation length and effect of its parameters on crack morphology[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(24): 123-131. (in Chinese)
- [26] 吴庆华, 张家发, 蔺文静, 等. 土壤水流模式染色剂示踪及优先流程度评估[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 82-90.
WU Qinghua, ZHANG Jiafa, LIN Wenjing, et al. Applying dyeing tracer to investigate patterns of soil water flow and quantify preferential flow in soil columns[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(7): 82-90. (in Chinese)
- [27] FLURY M, WAI N N. Dyes as tracers for vadose zone hydrology[J]. Reviews of Geophysics, 2003, 41(1): 1002.
- [28] 潘网生, 许玉凤, 卢玉东, 等. 基于非均匀性和分形维数的黄土优先流特征定量分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(3): 140-147.
PAN Wangsheng, XU Yufeng, LU Yudong, et al. Quantitative determination of preferential flow characteristics of loess based on nonuniformity and fractional dimension[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(3): 140-147. (in Chinese)
- [29] DICARLO D A. Stability of gravity-driven multiphase flow in porous media: 40 years of advancements[J]. Water Resources Research, 2013, 49(8): 4531-4544.
- [30] WANG C, ZHANG Z Y, LIU Y, et al. Geometric and fractal analysis of dynamic cracking patterns subjected to wetting-drying cycles[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 170: 1-13.
- [31] HINCAPIÉ I, GERMANN P F. Impact of initial and boundary conditions on preferential flow[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2009, 104(1): 67-73.
- [32] HARDIE M A, COTCHING W E, DOYLE R B, et al. Effect of antecedent soil moisture on preferential flow in a texture-contrast soil[J]. Journal of Hydrology, 2011, 398(3): 191-201.
- [33] GRANT K N, MACRAE M L, ALI G A. Differences in preferential flow with antecedent moisture conditions and soil texture: implications for subsurface P transport[J]. Hydrological Processes, 2019, 33(15): 2068-2079.
- [34] SALVE R, REMPE D M, DIETRICH W E. Rain, rock moisture dynamics, and the rapid response of perched groundwater in weathered, fractured argillite underlying a steep hillslope[J]. Water Resources Research, 2012, 48(11): W11528.
- [35] UCHIDA T, TROMP-VAN M I, MCDONNELL J J. The role of lateral pipe flow in hillslope runoff response: an intercomparison of non-linear hillslope response[J]. Journal of Hydrology, 2005, 311(1): 117-133.
- [36] BUTTLE J M, MCDONALD D J. Coupled vertical and lateral preferential flow on a forested slope[J]. Water Resources Research, 2002, 38(5): 11-16.