

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.026

柱状苹果树生长生理与蒸散特征对水分的响应研究

吴悠¹ 张富仓^{1,2} 闫世程^{1,2} 向友珍^{1,2} 邹海洋^{1,2} 田建柯^{1,2}

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;
2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 通过研究不同灌水量和地表覆膜条件对柱状苹果树的生长生理及蒸散特征的综合影响, 探寻适合苹果树生长且水分利用效率高的灌水量和保水措施。通过遮雨棚下可称量式蒸渗桶试验, 设置 4 个灌水水平: 60% ET_c (W1)、80% ET_c (W2)、100% ET_c (W3) 和 120% ET_c (W4); 地表覆膜处理分别为有覆盖 (M) 和无覆盖 (NM), 分析柱状苹果树的干物质量、光合速率、蒸腾速率和阶段耗水情况对不同灌水量和地表覆盖条件的响应规律。结果表明, 干物质量随灌水量增加而增加, 且 M 处理可促进干物质量的积累; 净光合速率、蒸腾速率和气孔导度均随着灌水量的增加而升高。不同生育期净光合速率和蒸腾速率由大到小依次为: 果实膨大期、果实成熟期、开花座果期、叶变期。相同灌水量和地表覆盖处理条件下, 不同时刻净光合速率由大到小依次为 10:00、13:00、08:00, 蒸腾速率由大到小依次为 13:00、10:00、08:00, 气孔导度由大到小依次为 10:00、08:00、13:00。瞬时水分利用效率 (LWUE) 最大值和最小值分别出现在 W2 处理 10:00 (4.52 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$) 和 W4 处理 13:00 (2.62 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$); 全生育期总蒸散量随着灌水量增加而增加, NM 处理较 M 处理增加 11.02% ~ 16.35%。开花座果期、果实膨大期、果实成熟期和叶变期的耗水强度分别为 3.29 ~ 4.36 mm/d、2.40 ~ 4.85 mm/d、0.83 ~ 1.79 mm/d 和 0.77 ~ 1.53 mm/d, 耗水模数分别为 19.34% ~ 27.40%、55.99% ~ 61.41%、8.62% ~ 12.63% 和 5.85% ~ 7.24%。最终得出 120% ET_c 灌水量和地表覆膜条件有利于改善柱状苹果树的生长和生理状况, 但 80% ET_c 处理水分利用效率最高。地表覆膜不仅促进苹果树生长而且降低了土壤蒸发量, 具有一定的保水作用。因此, MW2 处理为相对节水的灌溉模式。

关键词: 柱状苹果树; 净光合速率; 蒸腾速率; 水分利用效率; 蒸散

中图分类号: S274; S661.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)12-0213-10

Responses of Growth, Physiological and Evapotranspiration Characteristics of Columnar Apple Trees to Different Irrigation Depths

Wu You¹ Zhang Fucang^{1,2} Yan Shicheng^{1,2} Xiang Youzhen^{1,2} Zou Haiyang^{1,2} Tian Jianke^{1,2}

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Considering the soil water deficit and low water use efficiency of apple orchards in the semi-arid areas of Northwest China, the effects of mulching and water supply on growth, physiological properties and evapotranspiration features of columnar apple trees were investigated to explore suitable irrigation depth and soil water conservation measures for healthy growth and higher water use efficiency of apple trees. The weighing bucket experiments under a shelter were subjected to four irrigation water levels: 60% ET_c (W1), 80% ET_c (W2), 100% ET_c (W3) and 120% ET_c (W4), and two mulching modes: mulching (M) and no mulching (NM), resulting in eight treatments in total. The results showed that dry matter was increased with the increase of irrigation amount, and the M treatment promoted

收稿日期: 2016-09-14 修回日期: 2016-10-18
基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2011AA100504)和高等学校学科创新引智计划(111 计划)项目(B12007)
作者简介: 吴悠(1990—),女,博士生,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: wuyou60480@163.com
通信作者: 张富仓(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: zhangfc@nwsuaf.edu.cn

accumulation of dry matter. Net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (T_r) and stomatal conductance (G_s) were increased with the increase of irrigation depth. P_n and T_r at different growth stages under different irrigation depths and mulching modes showed a decreasing trend as fruit enlargement stage, fruit maturation stage, flowering and fruit bearing stage and leaf changing stage. Under the same irrigation depth and mulching mode, P_n , T_r and G_s at different times in a day showed a decreasing trend as 10:00, 13:00 and 8:00, 13:00, 10:00 and 08:00, and 10:00, 08:00 and 13:00, respectively. The maximum and minimum leaf water use efficiency (LWUE) found at 10:00 in the MW2 treatment ($4.52 \mu\text{mol}/\text{mmol}$) and at 13:00 in the MW4 treatment ($2.62 \mu\text{mol}/\text{mmol}$), respectively. The accumulative evapotranspiration during the whole growth period was increased with the increase of irrigation depth, those of NM treatments were increased by 11.02% ~ 16.35% compared with those of M treatments. Water consumption rate at flowering and fruit bearing stage, fruit enlargement stage, fruit maturation stage and leaf changing stage reached 3.29 ~ 4.36 mm/d, 2.40 ~ 4.85 mm/d, 0.83 ~ 1.79 mm/d and 0.77 ~ 1.53 mm/d, with the corresponding water consumption modulus of 19.34 ~ 27.40%, 55.99 ~ 61.41%, 8.62% ~ 12.63% and 5.85% ~ 7.24%, respectively. The results indicated that the W4 and M treatments were beneficial for improving the growth and physiological characteristics of columnar apple trees, but the highest water use efficiency was obtained in the W2 treatment. Fruit enlargement stage was found to be the most active physiological metabolic reaction stage of columnar apple trees, and mulching played a certain role in the soil water conservation.

Key words: columnar apple trees; net photosynthetic rate; transpiration rate; water use efficiency; evapotranspiration

引言

我国是苹果生产大国,苹果树栽培面积居世界首位,苹果产量占世界总产量的40%。我国优质苹果产区主要分布在西北部干旱半干旱地区^[1],然而该地区土壤水分不足是限制苹果树生长的主要因子。季节性干旱与水分利用效率低已成为制约该地区果树产业发展的主要障碍,而提高果树本身的水分利用效率是实现果树高效用水的生理基础。

果树的生长生理和蒸散特征方面的报道较多,研究表明,作物的干物质量反映了作物对生态环境的适应能力^[2],水分胁迫会诱导作物发生一系列的生理和生物化学反应^[3-4],光合作用和蒸腾作用是影响叶片水分利用效率最主要的指标^[5],而不同生长期的干物质量、光合特性和水分利用效率又会受到土壤水分含量的影响^[6-8]。因此,制定合理的灌溉制度使得果树具有较好的生长生理状况和较高的水分利用效率显得尤为重要。土表蒸发是土壤水分无效散失的主要途径之一,然而张志亮等^[9]和周罕觅等^[10]均研究表明,高灌水量情况极易导致土壤蒸发量增加,即无效耗水增加,导致水分大量浪费,因此降低土面蒸发对增加土层储水量和提高土壤水分利用效率具有重要意义。在降低土面蒸发方面,多采用土表秸秆覆盖^[11-12]以及薄膜覆盖^[13]方式以实现提高水分利用效率的目的。然而当土表秸秆覆盖

度过大时将会造成播种机堵塞^[14],长时间水分浸泡下,秸秆腐烂降低土壤质量;土表覆膜在土壤表面形成一个保护层从而实现抑制水分散失的功效。地膜覆盖具有抗旱保墒、降低土壤蒸发量和防止水土流失的作用,影响土壤水分含量及大气湿度,改变土壤及树体的水分状况,改善果树叶片的光合特性,提高水分利用效率^[15]。

已有研究较多集中于灌水量或土表覆盖单一因素对果树生长生理或耗水特性的影响,而灌水量和土表覆盖条件均可能对果树生长和土壤水分环境产生显著影响,关于灌水量和土表覆盖对果树生长生理和耗水特性交互影响的研究更是鲜有报道。结合多方面因素探索出可提高水分利用效率的适宜灌水量成为农田作物研究的首要任务。基于此,本文采用称量式蒸渗桶,对果树各阶段蒸散量进行定量分析,研究不同灌水量和薄膜覆盖对柱状苹果树的光合特性、水分利用效率、蒸散特性以及干物质量的影响,以期探索出能够保证柱状苹果树正常生长、同时提高其水分利用效率的灌水量,旨在为优化灌溉决策、完善柱状苹果树水分高效利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地基本情况

试验于2014年4—11月份在西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院移动式遮雨棚内进行。

试验地位于 108°04'E、34°17'N,海拔高度 520 m,年平均日照时数 2 163.8 h,多年平均降水量 500 mm,多年平均气温 12.5℃,年平均蒸发量 1 400 mm,多年平均无霜期 210 d,属于半干旱半湿润气候。

将外径 60 cm、内径 50 cm、高 100 cm 的水泥管垂直埋设在试验地内,并将栽有苹果树的直径 50 cm、高 100 cm 蒸渗桶置于水泥管内(图 1)。为防止滞水每桶底部装河沙 10 kg,风干土 230 kg。试验地上方安装有可移动电动葫芦门式 500 kg 起重机(精度为 0.1 kg)可用来升降蒸渗桶,起重机挂钩上安装电子吊秤可用来称量。

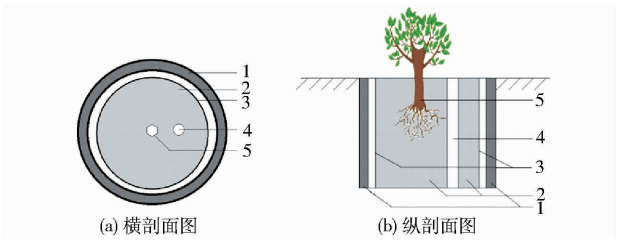


图 1 试验设施剖面图

Fig. 1 Profile diagrams of facility for experiment

1. 水泥管 2. 土壤 3. 蒸渗桶 4. TRIME 管 5. 苹果树

供试土壤为壤土,自然风干后磨细过 5 mm 筛。供试土壤不同粒径颗粒质量分数分别为 34% (小于 0.002 mm)、39% (0.002 ~ 0.02 mm)、27% (0.02 ~ 2 mm),质地为壤质黏土,装土容重为 1.4 g/cm³,pH 值为 7.8,有机质 12.38 g/kg,全氮 0.82 g/kg,全磷 0.55 g/kg,全钾 11.2 g/kg,碱解氮 48.3 mg/kg,速效磷 13.68 mg/kg,速效钾 138.47 mg/kg,田间持水量(θ_f)为 24% (质量含水率)。试验材料为近年来培育出的新型高产苹果品种“润太一号”柱状苹果树(4 a 生,基础为新疆野生苹果树, *Malus sieversii*)。本研究涉及的生育期包括开花座果期(4 月 13 日—5 月 17 日)、果实膨大期(5 月 18 日—8 月 21 日)、果实成熟期(8 月 22 日—10 月 10 日)、叶变期(10 月 11 日—11 月 15 日)。

1.2 试验设计与方法

试验在移动式遮雨棚下的蒸渗桶中进行,设有灌水量和覆盖 2 个因素,灌水量设置 4 个水平,分别为 60% ET_c (W1)、80% ET_c (W2)、100% ET_c (W3) 和 120% ET_c (W4);覆盖方式设置无覆盖(NM)和薄膜覆盖(M),其中覆盖处理,是在土壤表面覆盖打有均匀小孔的塑料膜,在塑料膜上平铺珍珠岩以实现保水的目的,在珍珠岩上再覆盖纱网以防止珍珠岩被风刮出蒸渗桶。采用完全组合设计方案,共 8 个处理,各处理 3 次重复。

果树实际蒸散发量 ET_c 依据参考作物蒸发蒸腾量 ET_0 和作物系数 K_c 而定,计算式为

$$ET_c = K_c ET_0 \tag{1}$$

式中 K_c ——作物系数

依据 FAO 56^[16],在苹果树生长前期、中期和后期的作物系数 K_{cin} 、 K_{cmid} 、 K_{cend} 取值分别为 0.60、0.95 和 0.75。

依据当地 2011—2013 年间的气象数据,采用 FAO 56 Penman - Monteith 公式^[16]计算 ET_0 ,即

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900U_2}{T + 273}(e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \tag{2}$$

式中 ET_0 ——参考作物蒸发蒸腾量,mm/d
 R_n ——地表净辐射,MJ/(m²·d)
 G ——土壤热通量,MJ/(m²·d)
 e_a ——饱和水汽压,kPa
 e_d ——实际水汽压,kPa
 Δ ——饱和水汽压曲线斜率,kPa/K
 γ ——干湿表常数,kPa/K
 T ——2 m 高度处平均气温,℃
 U_2 ——2 m 高度处风速,m/s

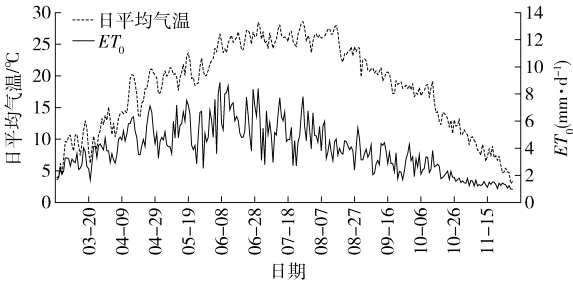


图 2 日平均气温和 ET_0 的变化

Fig. 2 Changes of daily average temperature and ET_0

各生育期内灌水实施情况如图 3 所示,W1、W2、W3 和 W4 处理的总灌水量分别为 449.83 mm (88.28 L/棵)、599.77 mm (117.71 L/棵)、749.72 mm (147.13 L/棵) 和 899.66 mm (176.56 L/棵)。试验所用氮肥、磷肥和钾肥分别为尿素、重过磷酸钙和氯化钾。各处理的施肥量及施肥次数一致,分别在 4 月 22 日施尿素 810 kg/hm² (含 N 372.6 kg/hm²)、重过磷酸钙 510 kg/hm² (含 P₂O₅ 234.6 kg/hm²)、氯化钾 1 200 kg/hm² (含 K₂O 720 kg/hm²),在 7 月 2 日(果实膨大期)施尿素 855 kg/hm² (含 N 393.4 kg/hm²)。

1.3 测定项目和方法

(1)采用电子吊秤定期对各个蒸渗桶进行称量,进而确定果树各阶段蒸散量和渗漏量。

(2)干物质量为整棵苹果树的总物质量(包括主干、叶丛枝、叶子和果实)。在试验结束后,对果树进行破坏性取样,取样后用干燥称量法测定。干

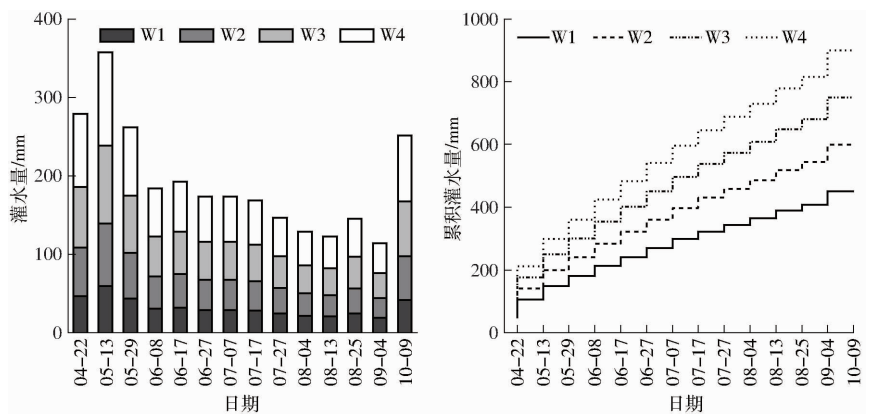


图3 2014 年苹果树生长期灌水量

Fig. 3 Irrigation depths during growing period of 2014

燥时,在 105℃ 下杀青 30 min,在 75℃ 下干燥至质量恒定,称其质量。

(3) 采用 Li - 6400 型光合测定系统 (Portable photosynthesis system, LI - COR, Nebraska, USA) 分别在 5 月 10 日 (开花座果期)、7 月 12 日 (果实膨大期)、8 月 27 日 (果实成熟期) 和 10 月 15 日 (叶变期) 10:00 测定不同处理苹果树中上部 (1.3 ~ 1.6 m) 完整叶片的净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r) 和气孔导度 (G_s); 其中在 7 月 12 日 08:00、10:00 和 13:00 测定 P_n 、 T_r 和 G_s 的日变化。测定时每株选取 5 片叶子,每片叶子每次连续采集 3 个稳定数据。5 片叶取平均值作为该处理的光合数据。叶片瞬时水分利用效率 (LWUE, $\mu\text{mol}/\text{mmol}$) 计算式^[17]为

$$L_{WUE} = \frac{P_n}{T_r} \tag{3}$$

1.4 数据统计分析

采用 Excel 2003 进行数据整理,用 SPSS 16.0 对数据进行方差分析,用 Origin 8.0 绘图。

2 结果与分析

2.1 灌水量和覆盖对苹果树干物质量的影响

干物质量能够充分反映作物通过光合作用积累的碳水化合物量,从而推测出作物生长情况。统计分析表明,灌水量对干物质量的影响达到极显著水平 ($P < 0.01$)。覆盖对干物质量的影响达到显著水平 ($P < 0.05$)。有、无覆盖处理的干物质量均随灌水量增加而增加 (图 4)。相同灌水量条件下, M 处理在 W1、W2、W3 和 W4 条件下的干物质量较 NM 处理分别提高了 18.10%、15.02%、11.99% 和 11.23%。MW4 处理显著高于 MW3 和 NMW4 处理,且 NMW1 处理显著低于其他处理。这表明地表覆膜和灌水量均显著影响果树的干物质量积累。地表覆膜和充足的供水条件可促进果树生长。

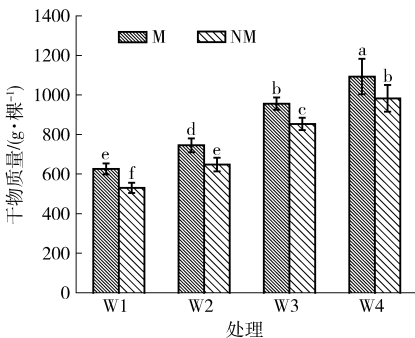


图4 水分和覆盖处理对苹果树干物质量的影响

Fig. 4 Effects of water and mulching treatments on dry matter of apple trees

2.2 灌水量和覆盖对叶片光合特性和水分利用效率的影响

由图 5 可以看出,相同灌水量和覆盖处理条件下,不同时刻的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度分别表现为 10:00 > 13:00 > 08:00、13:00 > 10:00 > 08:00 和 10:00 > 08:00 > 13:00;三者均随着灌水量的增加而升高,且 M 处理大于 NM 处理。这说明有覆盖和较大的灌水量都有利于果树净光合速率、蒸腾速率和气孔导度的增加,促进果树的生理活动。瞬时水分利用效率与灌水量不存在单调增减关系,而是呈现先升高后降低的趋势 (图 5d)。地表覆膜有效提高了水分利用效率。不同时刻的水分利用效率表现为 10:00 > 8:00 > 13:00。瞬时水分利用效率最大值和最小值分别出现在 W2 处理 ($4.52 \mu\text{mol}/\text{mmol}$) 和 W4 处理 ($2.62 \mu\text{mol}/\text{mmol}$)。这表明尽管 W4 处理增强了果实的生理活动,但水分利用效率较低。

不同生育期的苹果树在不同灌水量和覆盖处理下的净光合速率和蒸腾速率呈现出不同的变化规律 (表 1)。覆盖对果实膨大期、果实成熟期和叶变期的净光合速率均有显著影响,而仅对叶变期的蒸腾速率有显著影响;灌水量对苹果树各生育期的净光合速率和蒸腾速率均存在极显著影响;覆盖与灌水

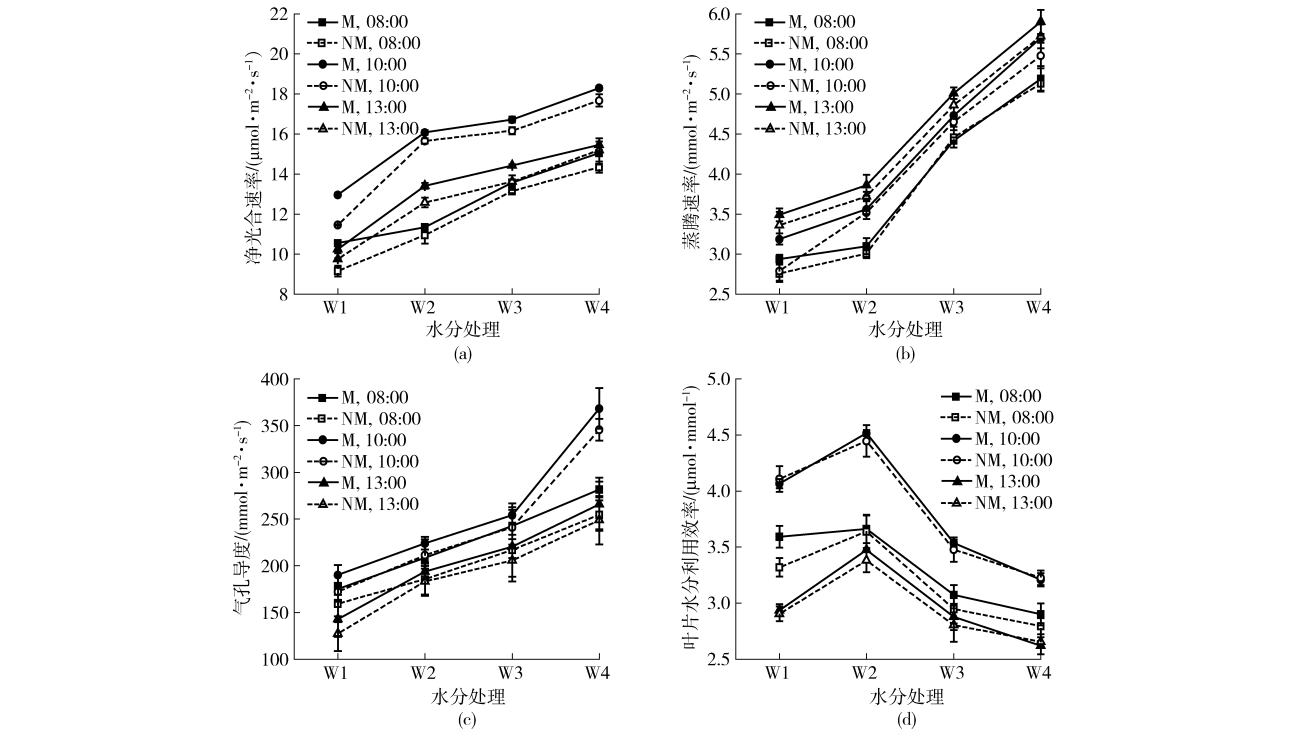


图 5 水分和覆盖处理下净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和水分利用效率的日变化特征
Fig. 5 Daily variation characteristics of P_n , T_r , G_s and LWUE of apple trees under water and mulching treatments

表 1 水分和覆盖处理对苹果树不同生育期净光合速率、蒸腾速率的影响
Tab. 1 Effects of water and mulching treatments on net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (T_r) of apple trees' leaves at different growth stages

覆盖 处理	水分 处理	净光合速率 $P_n/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$				蒸腾速率 $T_r/(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$			
		开花座果期	果实膨大期	果实成熟期	叶变期	开花座果期	果实膨大期	果实成熟期	叶变期
M	W1	6.99 ± 0.57 ^c	12.93 ± 0.59 ^d	10.52 ± 0.53 ^d	5.96 ± 0.66 ^{de}	2.41 ± 0.74 ^{de}	3.03 ± 0.46 ^d	2.75 ± 0.32 ^{de}	2.17 ± 0.66 ^{cd}
	W2	10.62 ± 0.49 ^b	15.95 ± 0.78 ^c	13.42 ± 0.64 ^c	7.21 ± 1.25 ^{bcd}	2.59 ± 0.56 ^{de}	3.64 ± 0.28 ^{cd}	3.31 ± 0.84 ^{cde}	2.39 ± 0.25 ^{cd}
	W3	11.26 ± 0.08 ^b	16.78 ± 0.35 ^{bc}	14.59 ± 0.50 ^b	8.08 ± 1.09 ^{abc}	4.19 ± 0.85 ^{bc}	4.75 ± 0.15 ^{abc}	4.34 ± 0.38 ^{bc}	3.90 ± 0.84 ^{ab}
	W4	13.13 ± 0.46 ^a	18.29 ± 0.53 ^a	15.96 ± 0.52 ^a	9.02 ± 0.71 ^a	5.37 ± 0.33 ^a	5.80 ± 0.45 ^a	5.80 ± 0.53 ^a	4.93 ± 0.82 ^a
NM	W1	6.18 ± 0.36 ^c	11.58 ± 0.72 ^e	9.67 ± 0.76 ^d	5.15 ± 0.84 ^e	1.80 ± 0.54 ^e	2.76 ± 0.95 ^d	2.44 ± 0.50 ^e	1.55 ± 0.56 ^d
	W2	10.58 ± 0.93 ^b	15.76 ± 0.64 ^c	13.12 ± 0.70 ^c	6.68 ± 0.81 ^{cde}	2.59 ± 0.25 ^{de}	3.64 ± 0.72 ^{cd}	3.31 ± 0.76 ^{cde}	2.15 ± 0.49 ^{cd}
	W3	11.26 ± 0.65 ^b	16.46 ± 0.69 ^c	14.11 ± 0.20 ^{bc}	7.67 ± 0.86 ^{abc}	3.25 ± 0.27 ^{cd}	4.51 ± 0.80 ^{bc}	3.83 ± 0.58 ^{cd}	3.25 ± 0.42 ^{bc}
	W4	12.65 ± 1.01 ^a	17.72 ± 0.74 ^{ab}	15.17 ± 0.88 ^{ab}	8.69 ± 0.73 ^{ab}	5.01 ± 0.75 ^{ab}	5.24 ± 0.80 ^{ab}	5.14 ± 0.88 ^{ab}	4.69 ± 0.70 ^a
显著性检验 (F 值)									
覆盖		2.13	6.12 [*]	6.16 [*]	6.99 [*]	5.47	1.31	2.40	3.44 [*]
灌水		134.65 ^{**}	99.28 ^{**}	92.15 ^{**}	50.42 ^{**}	45.51 ^{**}	23.79 ^{**}	26.71 ^{**}	32.57 ^{**}
覆盖 × 灌水		0.71	1.12	0.28	0.28	0.96	0.24	0.36	0.25

注：同列数值后不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。* 表示差异显著 ($P < 0.05$)，** 表示差异极显著 ($P < 0.01$)，下同。

量的交互作用对苹果树各生育期的净光合速率和蒸腾速率均无显著影响。相同覆盖条件下，同一时期的净光合速率和蒸腾速率随灌水量增加而增加，各时期的净光合速率均值比 W1 处理增加 30.96% ~ 70.83%，蒸腾速率的均值比 W1 处理增加 14.53% ~ 145.36%。相同灌水量情况下，地表覆膜提高了净光合速率和蒸腾速率。可见，地表覆膜和充足的灌水量可有效地促进果树的生理活动，满足其生长需求。相同处理下的净光合速率和蒸腾速率均大体表现为：果实膨大期 > 果实成

熟期 > 开花座果期 > 叶变期。这表明果树在果实膨大期的光合特性达到了顶峰，该时期的生长最为旺盛。

2.3 灌水量和覆盖对苹果树蒸散量的影响

全生育期总蒸散量随灌水量增加而增加(表 2)，对于地表覆膜情况，W2、W3、W4 处理全生育期总蒸散量比 W1 处理分别增加了 1.22 倍、1.47 倍、1.58 倍；对于无覆膜情况，W2、W3、W4 处理全生育期总蒸散量比 W1 处理分别增加了 1.23 倍、1.49 倍、1.66 倍。在相同的灌水量下，NM 处理苹果树全生

育期总蒸散量均大于 M 处理,比 M 处理分别增加 11.02% (W1)、12.29% (W2)、12.83% (W3) 和 16.35% (W4)。这表明地表覆膜和减少灌水量有利于降低总蒸散量。

苹果树开花座果期和果实膨大期的耗水强度大于果实成熟期和叶变期。在 W1 和 W2 处理条件下,开花座果期的耗水强度大于果实膨大期;在 W3 和 W4 处理条件下,开花座果期的耗水强度小于果实膨大期;各处理果实成熟期的耗水强度始终大于叶变期。这表明开花座果期对缺水反应较敏感,在

高水情况下有利于果实膨大,从而促进产量增长,故在开花座果期应加强水分管理。耗水模数表现为:果实膨大期 > 开花座果期 > 果实成熟期 > 叶变期,说明在果实膨大期需要大量的水分才能满足其生长需求。地表覆膜对苹果树开花座果期和果实膨大期耗水强度、果实膨大期和果实成熟期耗水模数的影响达极显著水平。灌水量对除叶变期的耗水模数无显著影响外,对其他生育期耗水强度和耗水模数的影响均达极显著水平。覆盖与灌水量的交互作用对苹果树各生育期耗水模数影响不显著。

表 2 水分和覆盖处理对苹果树不同生育期耗水强度和耗水模数的影响

Tab.2 Effects of water and mulching treatments on water consumption rate and water consumption modulus at different growth stages of apple tree

覆盖处理	水分处理	总蒸散量/ mm	开花座果期		果实膨大期		果实成熟期		叶变期	
			耗水强度/ (mm·d ⁻¹)	耗水模数/ %	耗水强度/ (mm·d ⁻¹)	耗水模数/ %	耗水强度/ (mm·d ⁻¹)	耗水模数/ %	耗水强度/ (mm·d ⁻¹)	耗水模数/ %
M	W1	407.76	3.29 ^d	27.40	2.40 ^g	55.99	0.83 ^d	10.00	0.77 ^d	6.60
	W2	495.49	3.53 ^{cd}	24.20	2.99 ^f	57.37	1.13 ^e	11.19	1.02 ^e	7.24
	W3	597.60	3.70 ^{cd}	21.08	3.81 ^d	60.52	1.37 ^b	11.27	1.22 ^b	7.13
	W4	645.23	3.67 ^{cd}	19.34	4.14 ^c	60.91	1.66 ^a	12.63	1.31 ^b	7.12
NM	W1	452.71	3.46 ^{cd}	25.97	2.84 ^f	59.56	0.80 ^d	8.62	0.76 ^d	5.85
	W2	556.37	3.86 ^{bc}	23.59	3.59 ^e	61.23	1.03 ^c	9.11	0.97 ^c	6.07
	W3	674.28	4.18 ^{ab}	21.09	4.34 ^b	61.20	1.48 ^b	10.74	1.34 ^{ab}	6.98
	W4	750.70	4.36 ^a	19.75	4.85 ^a	61.41	1.79 ^a	11.71	1.53 ^a	7.12
显著性检验 (F 值)										
覆盖			21.83 ^{**}	0.40	217.07 ^{**}	10.43 ^{**}	0.50	18.06 ^{**}	2.15	2.41
灌水量			10.53 ^{**}	37.97 ^{**}	463.00 ^{**}	6.07 ^{**}	123.81 ^{**}	15.73 ^{**}	41.29 ^{**}	1.52
覆盖×灌水量			1.52	0.27	2.29	1.67	2.33	0.73	1.89	0.45

2.4 指标间的相关关系

采用一元二次多项式函数可以很好地拟合苹果树净光合速率和蒸腾速率与蒸散量、干物质量之间的关系,以及总蒸散量和干物质量、灌水量之间的关系(图 6),随着净光合速率和蒸腾速率的增加,蒸散量和干物质量均有增长的趋势。相同的净光合速率和蒸腾速率下,果实膨大期具有较大的蒸散量,NM 处理蒸散量显著大于 M 处理,且 M 处理的干物质量均大于 NM 处理。这表明地表覆膜不仅促进果树生长而且有效降低了蒸散量,在果实膨大期表现尤为明显。灌水量相等的条件下,NM 处理总蒸散量大于 M 处理,且灌水量越大两者的差距越大。苹果树的干物质量随着总蒸散量的增加而增加。总蒸散量相同的情况下,M 处理的干物质量大于 NM 处理。

3 讨论

3.1 灌水量和覆盖对苹果树生长生理的影响

植物对干旱最明显的适应特征是干物质的积累,干物质量能够充分反映作物通过光合作用积累

的碳水化合物量。基于本研究可知,干物质量随灌水量增加而增加,且覆膜处理干物质量均大于无覆膜处理。这说明充足的水分^[18]和覆盖条件^[19]有利于植株的干物质积累,土表覆膜为植株生长提供了更好的土壤水分环境,改变了苹果树的叶片形态,增加了有效光合面积,利于光合产物的积累,进而促进苹果树的发育^[20]。

植物的光合作用是合成有机物的的重要途径,其合成的有机物能够满足植物本身生长发育的需要^[21-23],因此可以通过研究作物的光合特性来诊断其生长发育情况。光照强度在 13:00 时大于 10:00,而 10:00 时的净光合速率却大于 13:00,这是因为光合作用发生了动态光抑制作用。动态光抑制的发生是由于吸收光的能量以热能的形式散失,导致了量子效率下降,这与 LU 等^[24]的研究结果一致。光对蒸腾作用的影响首先是引起叶片气孔开放,气孔导度一般随温度升高而增加,但 30℃ 以上的高温会引起气孔关闭。气温增高时,大气蒸汽压的增大不及气孔下室细胞间隙的蒸汽压的增大,引起叶内外

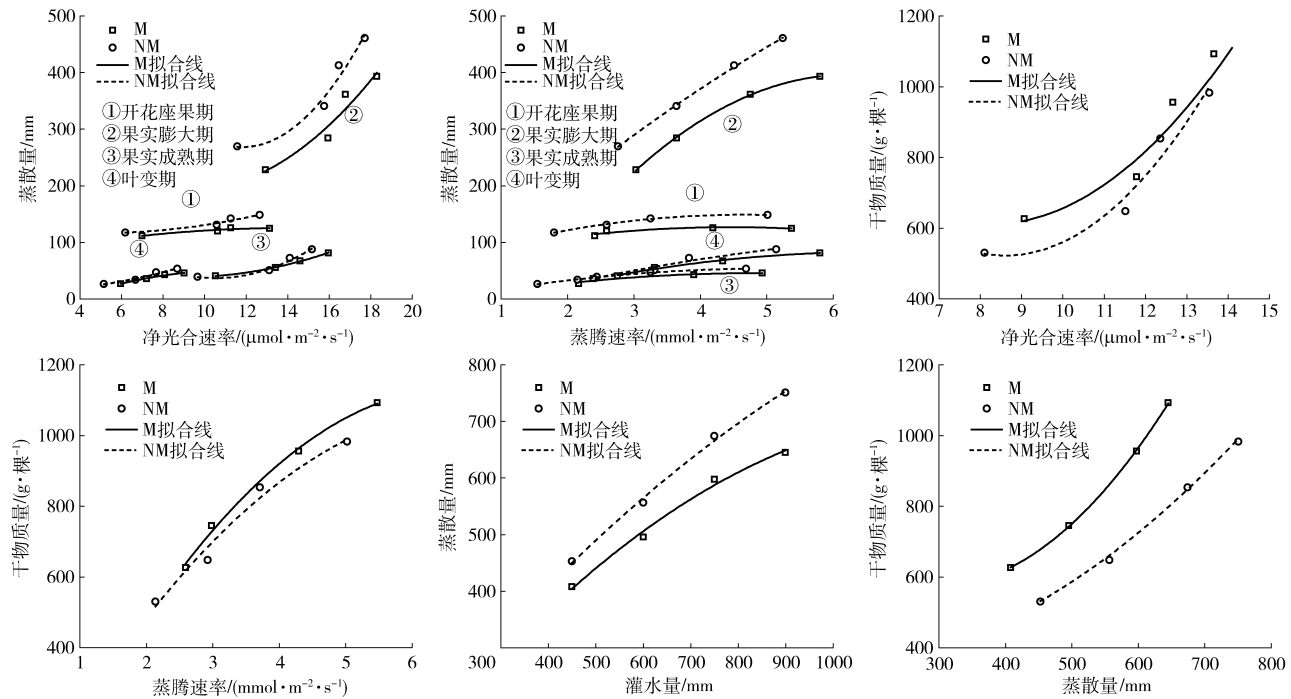


图 6 苹果树的指标间回归关系

Fig. 6 Regression relationships of measured growth, evapotranspiration and photosynthetic indexes of apple trees

的蒸汽压差加大,促进了水分从叶内逸出,从而使蒸腾加强^[20]。因此,13:00 的气孔导度达到一天中最低值而蒸腾速率却出现最高值。

覆盖可提高苹果叶片的光合作用,增强光能与 CO₂ 的利用能力,促进植株生长发育,有利于干物质形成^[25-26],这与本研究结果一致。叶片的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度与灌水量均存在正相关关系,这可能是由于叶肉细胞光合能力与灌水量也有正相关关系^[27-28],同时林平等^[29]也指出银杏净光合速率随着土壤含水率的下降而下降,主要由气孔限制所致,同时直接影响了光合作用的电子传递和 CO₂ 同化过程。但这与魏钦平等^[30]所提出的灌水量对苹果叶片生理特性没有影响的结论相违背,仍需继续展开研究加以验证。本研究结果表明果树在果实膨大期的光合特性达到了顶峰,该时期的生长最为旺盛。魏新光等^[31]提出枣树生育期内蒸腾呈现明显的单峰变化趋势,在生育中期蒸腾量较大,生育初期和末期蒸腾量较小。周罕觅等^[10]研究也表明苹果幼树的关键需水时期为果实膨大期,此时期控水可有效地提高用水效率,增加果实产量,与本研究得到的结论基本一致。

3.2 灌水量和覆盖对苹果树叶片水分利用效率和蒸散情况的影响

叶片瞬时水分利用效率(LWUE)反映了果树树体对逆境适应能力^[32]。LWUE 与作物吸收 CO₂ 的能力有关,气孔的控制限制了作物耗水^[33-34]。LWUE 取决于光合速率与蒸腾速率的比值。随灌水

量的增加,净光合速率和蒸腾速率升高,而水分利用效率的变化呈现先升高后降低的趋势。在 10:00 之后,净光合速率降低,而蒸腾速率升高,从而导致 LWUE 下降,所以 LWUE 的峰值出现在 10:00。接玉玲等^[35]研究得出水分利用效率降低的根本原因在于羧化效率下降导致净光合速率骤降,这与本研究结果一致。研究得出覆盖可以提高水分利用效率,此结果与冯浩等^[36]和银敏华等^[37]的研究结果一致,因此得出 MW2 为最佳节水的灌溉模式。

本研究表明,各处理的全生育期总蒸散量随着灌水量增加而升高,这与李巧珍等^[38]和时学双等^[39]的研究结果一致。在相同的灌水量下,NM 处理的苹果树全生育期总蒸散量明显大于 M 处理,体现了土表覆膜的保水效果可推广到实际应用中,从而获取更大效益,这与周昌明等^[40]的结果一致。刘贤赵等^[41]研究表明一般在果树萌芽期和开花期可不进行灌溉,但本研究结果显示开花座果期对缺水反应较敏感,在高灌水量情况下有利于果实膨大,从而促进产量增加,故在开花座果期应加强水分管理,此结论与孟平等^[42]研究结果一致。

3.3 指标间的相关关系

干物质质量、蒸散量、净光合速率和蒸腾速率均受灌水量和覆盖条件的影响^[43]。研究表明,苹果树的耗水强度和干物质质量均随灌水量增加而增加,通过进一步对耗水特性和干物质质量与净光合速率和蒸腾速率的相关关系研究可知,相同的净光合速率和蒸腾速率下,果实膨大期需要较大的蒸散量,且此时 M

处理对果树的蒸散量影响较大。这表明果树在果实膨大期需要大量的水分供应才能满足其正常生长生理需求。在果实膨大期调控水分供应可有效提高水分利用效率,减少不必要的水资源浪费^[10]。相同的净光合速率和蒸腾速率下,M 处理的干物质量均大于 NM 处理,且 NM 处理的蒸散量大于 M 处理。这表明地表覆膜不仅促进果树生长而且有效降低了蒸散量。本研究得出消耗同量的水时 M 处理的干物质量大于 NM 处理,表明地膜覆盖使更多的水分用于果树生长,提高了水分利用效率。

4 结 论

(1)100% ET_c 、120% ET_c 灌水量和覆盖均有利于苹果干物质量、净光合速率、蒸腾速率和气孔导度的提高,促进果树的生理活动;不同灌水量和覆盖条

件下的净光合速率和蒸腾速率均表现为:果实膨大期 > 果实成熟期 > 开花座果期 > 叶变期。基于叶片瞬时水分利用效率,MW2 处理为相对最佳节水的覆盖和灌溉模式。

(2)全生育期总蒸散量随着灌水量增加而升高。地表覆膜和减少灌水量有利于降低总蒸散量。果树在果实膨大期的生长最为旺盛,该时期大量的水分才能满足其生长需求。在开花座果期应保证果树水分的供应,使土壤有良好的水分环境,确保满足果实膨大期对水分的需求,从而促进产量增加。

(3)随着净光合速率和蒸腾速率的增加,蒸散量和干物质量均有增长的趋势。地膜覆盖不仅可促进作物生长而且大大降低了土壤蒸发量,可将其推广到实际应用中,从而获得更大效益。

参 考 文 献

1 ZHANG Q, SUN J, LIU S Z, et al. Manure refinement affects apple rhizosphere bacterial community structure: a study in sandy soil[J]. PLOS ONE, 2013, 8(10): e76937.

2 李晓清,胡学煜,左英强. 水分胁迫对希蒙得木幼苗生物量的影响[J]. 西南林学院学报,2009,29(5):19-22.
LI Xiaqing, HU Xueyu, ZUO Yingqiang. Effect of water stress on biomass allocation of *Simmondsia chinensis* seedlings[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2009, 29(5):19-22. (in Chinese)

3 ABBASI A R, SARVESTANI R, MOHAMMADI B, et al. Drought stress induced changes at physiological and biochemical levels in some common vetch (*Vicia sativa* L.)[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2014, 16:505-516.

4 申孝军,孙景生,张寄阳,等. 水分调控对麦茬棉产量和水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报,2014,45(6):150-160.
SHEN Xiaojun, SUN Jingsheng, ZHANG Jiyang, et al. Effects of different water treatment on yield and water use of transplanted cotton following wheat harvest[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6):150-160. (in Chinese)

5 周续莲,吴宏亮,康建宏. 不同灌水处理对春小麦水分利用率和光合速率的影响[J]. 农业科学研究,2011,32(4):1-5.
ZHOU Xulian, WU Hongliang, KANG Jianhong. Effects of different irrigation mode on WUE and Pn of spring wheat[J]. Journal of Agricultural Sciences, 2011, 32(4):1-5. (in Chinese)

6 ENNAHLI S, EARL H J. Physiological limitations to photosynthetic carbon assimilation in cotton under water stress[J]. Crop Science, 2005, 45(6):2374-2382.

7 XUE Q W, ZHU Z X, MUSICK J T, et al. Physiological mechanisms contributing to the increased water-use efficiency in winter wheat under deficit irrigation[J]. Journal of Plant Physiology, 2006, 163(2):154-164.

8 QIU G Y, WANG L M, HE X H, et al. Water use efficiency and evapotranspiration of winter wheat and its response to irrigation regime in the North China Plain[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(11):1848-1859.

9 张志亮,张富仓,郑彩霞,等. 不同水氮处理对果树幼苗生长和耗水特性的影响[J]. 干旱地区农业研究,2009,27(6):50-57.
ZHANG Zhiliang, ZHANG Fucang, ZHENG Caixia, et al. Effects of different water and nitrogen treatment on growth and water consumption characteristics of fruit seedlings[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(6):50-57. (in Chinese)

10 周罕觅,张富仓,ROGER Kjelgren,等. 苹果幼树生理特性和水分生产率对水肥的响应研究[J]. 农业机械学报,2015, 46(4):77-87.
ZHOU Hanmi, ZHANG Fucang, ROGER Kjelgren, et al. Response of physiological properties and crop water productivity of young apple tree to water and fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4):77-87. (in Chinese)

11 张军昌,闫小丽,薛少平,等. 秸秆粉碎覆盖玉米免耕施肥播种机设计[J]. 农业机械学报,2012,43(12):51-55.
ZHANG Junchang, YAN Xiaoli, XUE Shaoping, et al. Design of no-tillage maize planter with straw smashing and fertilizing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12):51-55. (in Chinese)

12 汪可欣,付强,姜辛,等. 秸秆覆盖模式对玉米生理指标及水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报,2014,45(12):181-186.
WANG Kexin, FU Qiang, JIANG Xin, et al. Effect of straw mulching mode on maize physiological index and water use efficiency [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12):181-186. (in Chinese)

13 田飞,谢永生,索改弟,等. 二元覆盖对果园土壤水分的调控效果[J]. 应用生态学报,2014,25(8):2289-2296.
TIAN Fei, XIE Yongsheng, SUO Gaidi, et al. Controlling effects of dual mulching on soil moisture in an apple orchard[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(8):2289-2296. (in Chinese)

- 14 张翼夫,王庆杰,胡红,等. 华北玉米秸秆覆盖对砂土、壤土水土保持效应的影响[J]. 农业机械学报,2016,47(5):138 – 145,154.
ZHANG Yifu, WANG Qingjie, HU Hong, et al. Effect of maize straw mulching on water and soil conservation in sandy soil and loam soil of North China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5):138 – 145, 154. (in Chinese)
- 15 COOK H F, VALDES G S B, LEE H C. Mulch effects on rainfall interception, soil physical characteristics and temperature under *Zea mays* L. [J]. Soil and Tillage Research, 2006, 91:227 – 235.
- 16 ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines or computing crop water requirements [M]. Rome: FAO Irrigation and Drainage, 1998:56.
- 17 张正斌,山仑. 小麦旗叶水分利用效率比较研究[J]. 科学通报,1997,42(17):1876 – 1881.
ZHANG Zhengbin, SHAN Lun. Research on water use efficiency of wheat flag leaf[J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(17):1876 – 1881. (in Chinese)
- 18 周罕冕,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]. 农业机械学报,2015, 46(12):174 – 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12):174 – 183. (in Chinese)
- 19 任新茂,孙东宝,王庆锁. 覆膜和密度对旱作春玉米产量和农田蒸散的影响[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(11). 20160909. 1418. 004.
REN Xinmao, SUN Dongbao, WANG Qingsuo. Effects of plastic film mulching and plant density on yield and evapotranspiration of rainfed spring maize[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(11). 20160909. 1418. 004. (in Chinese)
- 20 吕三三,杜国栋,刘志琨,等. 覆草对苹果叶片显微结构及光系统功能的影响[J]. 中国农业科学,2015,48(1):130 – 139.
LÜ Sansan, DU Guodong, LIU Zhikun, et al. Effects of orchard mulching grass on the microstructure a function of photosystem in apple leaves[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 48(1):130 – 139. (in Chinese)
- 21 张继澍. 植物生理学[M]. 北京:高等教育出版社,2006:104 – 143.
- 22 RICHARDS A. Selectable traits to increase crop photosynthesis and yield of grain crops[J]. Journal of Experimental Botany, 2000, 51(Supp.):447 – 458.
- 23 周罕冕,张富仓,李志军,等. 桃树需水信号及产量和果实品质对水分的响应研究[J]. 农业机械学报,2014,45(12):171 – 180.
ZHOU Hanmi, ZHANG Fucang, LI Zhijun, et al. Response of water demand signal, yield and fruit quality of peach tree to soil moisture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12):171 – 180. (in Chinese)
- 24 LU C M, CHAU C W, ZHANG J H. Acute toxicity of excess mercury on the photosynthetic performance of cyanobacterium, *S. platensis*—assessment by chlorophyll fluorescence analysis[J]. Chemosphere, 2000, 41(1–2):191 – 196.
- 25 张义,谢永生,郝明德,等. 地表覆盖及生理生态因子对苹果树光合特性的影响[J]. 水土保持通报,2010,30(1):125 – 130.
ZHANG Yi, XIE Yongsheng, HAO Mingde, et al. Effects of different surface mulch models and physiological ecology factors on apple photosynthesis[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(1):125 – 130. (in Chinese)
- 26 CAMPOSEO S, Vivaldi G A. Short-term effects of de-oiled olive pomace mulching application on a young super high-density olive orchard[J]. Scientia Horticulturae, 2011, 129(4):613 – 621.
- 27 郑国琦,张磊,郑国保,等. 不同灌水量对干旱区枸杞叶片结构、光合生理参数和产量的影响[J]. 应用生态学报,2010, 21(11):2806 – 2813.
ZHENG Guoqi, ZHANG Lei, ZHENG Guobao, et al. Effects of irrigation amount on leaf structure, photosynthetic physiology, and fruit yield of *Lycium barbarum* in arid area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(11):2806 – 2813. (in Chinese)
- 28 武阳,王伟,赵智,等. 调亏灌溉对香梨叶片光合速率及水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报,2012,43(11):80 – 86.
WU Yang, WANG Wei, ZHAO Zhi, et al. Photosynthesis rate and leaf water use efficiency of Korla fragrant pear tree under regulated deficit irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11):80 – 86. (in Chinese)
- 29 林平,李吉跃,陈崇. 银杏光合生理生态特性研究[J]. 北京林业大学学报,2008,30(6):22 – 29.
LIN Ping, LI Jiyue, CHEN Chong. Photosynthetic physioecology characteristics of *Ginkgo biloba*[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(6):22 – 29. (in Chinese)
- 30 魏钦平,刘松忠,王小伟,等. 分根交替不同灌水量对苹果生长和叶片生理特性的影响[J]. 中国农业科学,2009,42(8): 2844 – 2851.
WEI Qiping, LIU Songzhong, WANG Xiaowei, et al. Effects of partial root zone alternative irrigation on growth and leaf physiological characteristics of apple trees[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(8):2844 – 2851. (in Chinese)
- 31 魏新光,王铁良,刘守阳,等. 种植年限对黄土丘陵半干旱区山地枣树蒸腾的影响[J]. 农业机械学报,2015,46(7):171 – 180.
WEI Xinguang, WANG Tieliang, LIU Shouyang, et al. Effect of planting years on jujube transpiration in semi-arid hilly areas of Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7):171 – 180. (in Chinese)
- 32 孙文泰,赵明新,尹晓宁,等. 陇东旱地果园地表覆盖方式对苹果光合特性的影响[J]. 干旱地区农业研究,2013,31(3):19 – 25.
SUN Wentai, ZHAO Mingxin, YIN Xiaoning, et al. Effects of different mulch modes on apple photosynthesis in dry-land orchards

- of east Gansu Province[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31(3):19–25. (in Chinese)
- 33 FLEXAS J, NIINEMETS Ü, GALLE A, et al. Diffusional conductance to CO₂ as a target for increasing photosynthesis and photosynthetic water-use efficiency[J]. *Photosynthesis Research*, 2013, 117(1–3):45–59.
- 34 DE Santana T A, OLIVEIRA P S, SILVA L D, et al. Water use efficiency and consumption in different Brazilian genotypes of *Jatropha curcas* L. subjected to soil water deficit[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2015, 75:119–125.
- 35 接玉玲, 杨洪强, 崔明刚, 等. 土壤含水量与苹果叶片水分利用效率的关系[J]. *应用生态学报*, 2001, 12(3):387–390.
- JIE Yuling, YANG Hongqiang, CUI Minggang, et al. Relationship between soil water content and water use efficiency of apple leaves[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(3):387–390. (in Chinese)
- 36 冯浩, 刘晓青, 左亿球, 等. 砾石覆盖量对农田水分与作物耗水特征的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(5):155–163.
- FENG Hao, LIU Xiaoqing, ZUO Yiqiu, et al. Effect of gravel mulching degree on farmland moisture and water consumption features of crops[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(5):155–163. (in Chinese)
- 37 银敏华, 李援农, 李昊, 等. 覆盖模式对农田土壤环境与冬小麦生长的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(4):127–135, 227.
- YIN Minhua, LI Yuannong, LI Hao, et al. Effects of mulching patterns on farmland soil environment and winter wheat growth[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(4):127–135, 227. (in Chinese)
- 38 李巧珍, 郝卫平, 龚道枝, 等. 不同灌溉方式对苹果园土壤水分动态、耗水量和产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(2):128–133.
- LI Qiaozhen, HAO Weiping, GONG Daozhi, et al. Effects of different irrigation patterns on soil water dynamics, water use and yields in an apple orchard[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007, 25(2):128–133. (in Chinese)
- 39 时学双, 李法虎, 闫宝莹, 等. 不同生育期水分亏缺对春青稞水分利用和产量的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(10):144–151.
- SHI Xueshuang, LI Fahu, YAN Baoying, et al. Effects of water deficit at different growth stages on water use and yield of spring highland barley[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(10):144–151. (in Chinese)
- 40 周昌明, 李援农, 银敏华, 等. 液态地膜覆盖下种植方式对土壤水分和玉米生长的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(4):49–58.
- ZHOU Changming, LI Yuannong, YIN Minhua, et al. Effects of cropping patterns on soil moisture and maize growth under liquid film mulching[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(4):49–58. (in Chinese)
- 41 刘贤赵, 衣华鹏, 李世泰. 渭北旱塬苹果种植分区土壤水分特征[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(11):2055–2060.
- LIU Xianzhao, YI Huapeng, LI Shitai. Soil moisture characteristics of apple planting subarea in Weibei dry highland, Shaanxi Province[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(11):2055–2060. (in Chinese)
- 42 孟平. 苹果蒸腾耗水特征及水分胁迫诊断预报模型研究[D]. 长沙: 长沙中南林学院, 2005.
- MENG Ping. Characteristics of apple tree transpiration models for prediction and diagnosis of water stress[D]. Changsha: Changsha Central South Forestry University, 2005. (in Chinese)
- 43 LIU E K, MEIA X R, YANA C R, et al. Effects of water stress on photosynthetic characteristics, dry matter translocation and WUE in two winter wheat genotypes[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 167:75–85.

(上接第 184 页)

- 14 王卫华, 王全九. 黑河中游绿洲麦田土壤导气率空间变异尺度性研究[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(4):179–183.
- WANG Weihua, WANG Quanjiu. Scale-dependency of spatial variability of soil air permeability on typical oasis croplands at middle reaches of Heihe river[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(4):179–183. (in Chinese)
- 15 杜华强, 汤孟平, 周国模, 等. 天目山物种多样性尺度依赖及其与空间格局关系的多重分形[J]. *生态学报*, 2007, 27(12):5038–5049.
- DU Huaqiang, TANG Mengping, ZHOU Guomo, et al. Linking species diversity with spatial scale dependence to spatial patterns using multifractal analysis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12):5038–5049. (in Chinese)
- 16 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- 17 EGHBALL B, SCHEPERS J S, NEGAHBAN M, et al. Spatial and temporal variability of soil nitrate and corn yield: multifractal analysis[J]. *Agronomy Journal*, 2003, 95(2):339–346.
- 18 ZELEKE T B, SI B C. Scaling relationships between saturated hydraulic conductivity and soil physical properties[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(6):1691–1702.
- 19 CANIEGO F J, ESPEJO R, MARTÍN M A, et al. Multifractal scaling of soil spatial variability[J]. *Ecological Modelling*, 2005, 182(3–4):291–303.
- 20 陈双平, 韩凯, 马猛, 等. 染色体碱基序列的联合多重分形分析[J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(2):298–301.
- CHEN Shuangping, HAN Kai, MA Meng, et al. The joint multi-fractal analysis of the base sequence of chromosomes[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(2):298–301. (in Chinese)
- 21 ZELEKE T B, SI B C. Characterizing scale-dependent spatial relationships between soil properties using multifractal techniques[J]. *Geoderma*, 2006, 134(3–4):440–452.