

温美娟, 郑伟, 赵志远, 等. 不同施肥与间套绿肥对果园水热特征及硝态氮累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6): 1119–1128.

WEN Mei-juan, ZHENG wei, ZHAO Zhi-yuan, et al. Effects of different fertilizer treatments combined with green manure intercropping on water and thermal properties and nitrate accumulation in soils of apple orchard[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(6): 1119–1128.

不同施肥与间套绿肥对果园水热特征及硝态氮累积的影响

温美娟^{1,2}, 郑伟^{1,2}, 赵志远^{1,2}, 王贵^{1,2}, 翟丙年^{1,2*}, 王朝辉^{1,2}

(1.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:为了研究不同施肥与覆盖措施下苹果园水热特征及硝态氮累积量,于2012—2015年在陕西渭北旱塬白水田家洼村进行了田间试验,探究单施化肥(农户模式FM)、推荐施肥配合树盘覆黑色膜(现有模式EM)、增施有机肥配合树盘覆黑色膜行间种植小油菜(优化模式OM)对果园水分含量、温度及硝态氮含量的影响。结果表明,与现有模式、农户模式相比,优化模式能显著提高0~200 cm土层土壤贮水量,分别平均增加6.1%、14.6%;优化模式能提高0~60 cm土层含水量随时间变化的稳定性,缓解深层(140~300 cm)土壤干燥化现象,降低土壤剖面水分垂直变异,提高土壤剖面水分垂直分布的稳定性;优化模式的三年平均产量较现有模式、农户模式分别增加20.1%、33.6%,水分利用率较农户模式、现有模式分别提高42.6%、28.9%;不同果园管理措施对土壤热量状况的影响差异显著,优化模式较现有模式能显著降低极端高温,缓冲不同时间段温度变异性,提高土壤的保温性。此外,优化模式能增加成熟期0~120 cm土层硝态氮累积量,较农户模式、现有模式分别增加277.9、183.7 kg·hm⁻²,优化模式可降低120~300 cm土层硝态氮累积量,较农户模式、现有模式分别降低71.3、30.0 kg·hm⁻²。综上所述,优化模式可明显改善土壤水热状况,降低深层硝态氮的累积量,是渭北旱地果园缓解水分和温度胁迫、改善果园生态环境、获得高产的最优果园管理模式。

关键词:苹果园;有机肥;二元覆盖;土壤水分;温度;硝态氮累积量

中图分类号:S153.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2016)06-1119-10 **doi:**10.11654/jaes.2016.06.014

Effects of different fertilizer treatments combined with green manure intercropping on water and thermal properties and nitrate accumulation in soils of apple orchard

WEN Mei-juan^{1,2}, ZHENG wei^{1,2}, ZHAO Zhi-yuan^{1,2}, WANG gui^{1,2}, ZHAI Bing-nian^{1,2*}, WANG Zhao-hui^{1,2}

(1.College of Resources and Environmental Science, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2.Key Laboratory of Plant Nutrition and Agricultural Environment of Northwest of Ministry of Agriculture; Yangling 712100, China)

Abstract: Soil water and nutrients are two major factors limiting apple production in the Loess Plateau region in China. A 3-year field experiment was conducted from 2012—2015 in Tian Jia Wa village, Baishui county, Shaanxi Province, to evaluate the effects of different fertilizer treatments combined with green manure intercropping on soil water and thermal properties and nitrate accumulation in apple orchards. There were three treatments: Farmer management pattern (FM)—nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers only (NPK); Extension management pattern (EM)—NPK fertilizers combined with swine manure (NPKM) and polyethylene black plastic film mulch (beside the tree trunks); Optimized management pattern (OM)—NPKM, polyethylene black plastic film mulch (beside the tree trunks) and rape intercropping. Results showed that soil water storage in OM treatment was 14.6% and 6.1% higher than that in FM and EM, respectively. OM alleviated the temporal fluctuation of soil moisture in 0~60 cm soil depth and enhance the temporal stability of soil moisture in the layer, and ef-

收稿日期:2015-11-19

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201303104, 201103005-9);陕西省农业科技创新转化项目(NYKJ-2015-17);杨凌示范区农业科技示范推广能力提升项目(2015-TS-18);西北农林科技大学试验示范基地科技成果推广项目(TGZX2014-16)

作者简介:温美娟(1988—),女,甘肃天水人,硕士生,研究方向为旱地果园水肥管理。E-mail:wen_mj@126.com

*通信作者:翟丙年 E-mail:zhaibingnian@nwsuaf.edu.cn

actively mitigated the soil desiccation in 140~300 cm soil depth. Additionally, OM also decreased the vertical variation of soil moisture in the soil profile and improved the stability of the vertical soil moisture distribution, as compared with FM and EM. In OM treatments, apple yields was increased by 20.1% and 33.6%, respectively, compared with EM and FM. The water use efficiency was highest in OM, and was 42.6% and 28.9% higher than in FM and EM. However, OM reduced the highest soil temperature, buffered different-time temperature variability, increased soil thermal capacity, as compared with EM and FM. Nevertheless, OM increased NO_3^- -N content in 0~120 cm soil depth by $342.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $178.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, but decreased NO_3^- -N accumulation in 120~300 cm soil profile by $556.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $30.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, in comparison with FM and EM, respectively. Therefore, OM significantly improved the thermal conditions of soil, reduced the nitrate accumulation in deep soil, and is the best orchard management pattern for alleviating water and temperature stresses, improving the ecological environment of apple orchards and enhancing apple yields in dry land apple orchards.

Keywords: apple; manure; dual mulching; soil water; temperature; nitrate accumulation

位于黄土高原的渭北旱塬自然条件得天独厚,是苹果的优生区域,为中国苹果生产的两大主产区之一,苹果产业成为增加农民收入、促进区域经济发展、改善生态环境的支柱产业^[1]。但该区无灌溉条件,降雨量少且分布不均,地下水位深,属于典型的雨养农业区^[2],再加上清耕为主的果园水分管理方式,使土壤蒸发强度增大,水分成为限制苹果产业发展的关键因素。除水资源不足外,土壤贫瘠,供肥保肥能力差,长期过量施用化肥特别是氮肥,导致土壤氮负荷增加、土壤养分不平衡、肥料利用率低、深层土壤硝态氮大量累积、环境污染严重^[3],也是限制苹果产业发展的另一主要因素。因此,优化旱地果园水肥管理,是该区苹果产业健康持续发展的关键。

合理施肥或有效的保墒措施在提高土壤保水保肥能力、改善土壤结构、保护生态环境方面有着重要作用,前人已做了许多有益的探索。很多研究提倡有机无机肥配施,指出有机、无机配施能增加土壤贮水量^[4],降低硝酸盐淋溶^[5],提高化肥利用率^[6],促进果树生长、改善果实品质、增加苹果产量^[7]。但有机肥养分含量低,肥效平缓,用量的差异会对化肥肥效产生不同影响。在果园覆盖措施上,地膜覆盖不仅能改善土壤水热状况等外部生态环境^[8],还能降低 NO_3^- -N 淋溶,增加 0~100 cm 土层 NO_3^- -N 累积量^[9];果园生草能降低深层土壤水分变异性,提高土壤涵养水源能力^[10-12],但生草与果树在旱季存在水分竞争^[13]。因此,种植模式选择行间生草树盘覆盖的二元模式^[14],能增加土壤水分含量^[15-16]。目前的研究多集中在单一的施肥或覆盖技术上,而将合理施肥与覆盖保墒相结合的研究在渭北旱地果园鲜有报道。因此,本研究在前人工作的基础上,优化果园施肥与覆盖措施,在陕西渭北旱塬苹果优生区设置了大田试验,通过增施有机肥、调整化肥基追比、树盘覆黑色膜、行间种植小油

菜等施肥与覆盖措施的集成来研究果园水热特征及硝态氮累积量,旨在筛选出适合当地降雨与栽培制度的旱地果园增产增效的水肥管理模式,为旱地果园可持续生产提供可行的技术途径。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2012 年 10 月至 2015 年 10 月在陕西省白水縣田家洼村苹果千亩示范园进行,该园区地处陕西省渭北旱塬($109^{\circ}16' \sim 109^{\circ}45' \text{E}$, $35^{\circ}4' \sim 35^{\circ}27' \text{N}$),年均降雨量 570 mm,且集中在 7—9 月,冬春易于旱少雨,年均气温 11.4°C ,无霜期 207 d 左右。供试果园面积 2001 m^2 ,果园地势平坦,无灌溉条件,土壤为黄绵土,供试地块试验前基本性质:0~20 cm 土层有机质 $12.91 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $0.65 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,硝态氮 $18.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $35.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $115 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;20~40 cm 土层有机质 $7.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $0.46 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,硝态氮 $34.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $6.81 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $49.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验材料

供试苹果品种为长富二号,富士系列,基砧为 M26,果树为 12 年树龄,株行距 $3 \text{ m} \times 4 \text{ m}$,树形均为自由纺锤形。绿肥作物为小油菜。

1.3 试验设计

试验于 2012 年果实采收后布置,共设置农户模式(FM)、现有模式(EM)及优化模式(OM)三个处理,每处理 3 次重复,每个重复 20 棵树,即每个处理 60 棵树,面积 667 m^2 。休眠期树盘覆黑色膜,幼果期行间种植小油菜,成熟期翻压于果园。施用无机肥为尿素(N 46%)、磷酸二铵(P_2O_5 18%, N 46%)和硫酸钾(K_2O 50%),有机肥为猪粪(有机质 32.50%, N $6.01 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, P_2O_5 $4.02 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, K_2O $4.41 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。具体施肥方案见表1。

表 1 苹果园水肥优化管理试验方案

Table 1 Experimental design of optimized water and fertilizer management in apple orchard

处理 Treatment	基肥与追肥 Basal and topdressing fertilizer	覆盖措施 Cover management
农户模式 FM	有机肥 0 kg·hm ⁻² 。基肥 300 kg·hm ⁻² N+160 kg·hm ⁻² P ₂ O ₅ +120 kg·hm ⁻² K ₂ O; 追肥 150 kg·hm ⁻² N+80 kg·hm ⁻² P ₂ O ₅ +60 kg·hm ⁻² K ₂ O。萌芽期追肥 Organic manure 0 kg·hm ⁻² . N, P and K were applied at 300 kg·hm ⁻² N+160 kg·hm ⁻² P ₂ O ₅ + 120 kg·hm ⁻² K ₂ O as basal fertilizer; another 150 kg·hm ⁻² N+80 kg·hm ⁻² P ₂ O ₅ +60 kg·hm ⁻² K ₂ O was applied as germination fertilizer	清耕无覆盖 Orchard without cover
现有模式 EM	有机肥 22 500 kg·hm ⁻² 。基肥 200 kg·hm ⁻² N+120 kg·hm ⁻² P ₂ O ₅ +180 kg·hm ⁻² K ₂ O; 追肥 100 kg·hm ⁻² N+60 kg·hm ⁻² P ₂ O ₅ +90 kg·hm ⁻² K ₂ O。膨果期追肥 Organic manure 22 500 kg·hm ⁻² . N, P and K were applied at 200 kg·hm ⁻² N+120 kg·hm ⁻² P ₂ O ₅ +180 kg·hm ⁻² K ₂ O as basal fertilizer; another 100 kg·hm ⁻² N+60 kg·hm ⁻² P ₂ O ₅ +90 kg·hm ⁻² K ₂ O was applied as swelling fruit fertilizer	树盘覆黑色膜, 行间清耕 Trees covered with black film No covering in inter-rows
优化模式 OM	有机肥 45 000 kg·hm ⁻² 。基肥 150 kg·hm ⁻² N+ 90 kg·hm ⁻² P ₂ O ₅ +135 kg·hm ⁻² K ₂ O 追肥 150 kg·hm ⁻² N+90 kg·hm ⁻² P ₂ O ₅ +135 kg·hm ⁻² K ₂ O。膨果初期追肥 Organic manure 45 000 kg·hm ⁻² . N, P and K were applied at 150 kg·hm ⁻² N+90 kg·hm ⁻² P ₂ O ₅ +135 kg·hm ⁻² K ₂ O as basal fertilizer; another 150 kg·hm ⁻² N+ 90 kg·hm ⁻² P ₂ O ₅ +135 kg·hm ⁻² K ₂ O was applied as early swelling fruit fertilizer	树盘覆黑色膜, 行间套种小油菜 Tree covered with black film little rapes planted in inter-row

注: FM 为农户模式; EM 为现有模式; OM 为优化模式。下同。

Note: FM—Farmers mode; EM—Existing mode; OM—Optimized mode. The same below.

1.4 取样及测定

1.4.1 土壤含水量

每个处理选取长势一致的果树, 在树冠外围垂直投影处(行间)和距离树干 40 cm 左右(树盘)处设置取样点, 共取 6 个重复样。于 2013 年 6 月到 2015 年 9 月(苹果各生育期)每月月末, 用土钻对 0~300 cm 土壤进行分层(20 cm)取样(2013 年采样深度 200 cm), 取样后立即带回实验室称鲜土重, 求出土壤质量含水量。根据质量含水量和容重计算土壤贮水量:

土壤贮水量(mm)=土壤质量含水量(%)×土壤容重(g·cm⁻³)×土层厚度(cm)×0.1

1.4.2 产量

在苹果成熟期每个处理随机选定 9 棵树, 用 TCS120S 电子称分别称量每棵树苹果产量。

1.4.3 水分利用效率

$$WUE=Y/ET$$

$$ET=P-\Delta W$$

式中: WUE 为水分利用效率, kg·hm⁻²·mm⁻¹; Y 为苹果产量, kg·hm⁻²; ET 为全生育期作物总耗水量(蒸散量), mm; P 为苹果生长季的有效降雨量, mm; ΔW 为时段末与时段初田间土壤贮水变化量, mm。

1.4.4 土壤温度

采用 RM-003 型直角地温计, 分别于开花期(4 月 20—23 日)、膨果期(7 月 25—27 日)、成熟期(10 月 3—6 日)测定各处理 5、10、15、20、25 cm 土层土壤温度, 3 次重复。5~25 cm 处的土层温度日变化分别在 8:00、10:00、12:00、14:00 和 18:00 进行监测, 连续监测 3 d(晴天)并取其平均值作为该时期的地温值。

1.4.5 土壤 NO₃-N 累积量

称新鲜土样 5.00 g, 加入 1 mol·L⁻¹ KCl 溶液浸提, 振荡 1 h 后过滤, 用 AA3(Auto Analyzer 3)连续流动分析仪测定滤液中的 NO₃-N 的含量。

土壤 NO₃-N 累积量(kg·hm⁻²)=土层厚度(cm)×土壤容重(g·cm⁻³)×土壤 NO₃-N 含量(mg·kg⁻¹)/10

1.5 数据处理

试验数据采用 Microsoft Excel 2007 和 DPS 7.05 软件进行统计分析, 并用 LSD 法进行差异显著性多重分析(P<0.05)。

2 结果与分析

2.1 不同水肥管理模式对 0~200 cm 土层土壤贮水量年变化的影响

不同管理模式对根系区土壤贮水量的影响如图 1 所示。可以看出, 三种模式下 0~200 cm 土层贮水量随降雨量而变化, 不同年份由于降雨量不同贮水量差异较大。2013 年降雨分布主要集中在 7 月, 2014 年、2015 年集中在 9 月。农户模式、现有模式、优化模式的贮水量在 2013 年时 6 月最低, 分别为 356、368、396 mm, 7 月最高, 分别为 418、423、505 mm; 2014 年时 7 月出现最低值, 分别为 331、362、380 mm, 9 月出现最高值, 分别为 377、497、542 mm; 2015 年时 8 月最低, 分别为 316、332、355 mm, 3 月最高, 分别为 432、454、481 mm。研究时段内不同覆盖措施下 0~200 cm 土层平均贮水量表现为优化模式(433 mm)>现有模式(409 mm)>农户模式(378 mm), 优化模式显著高于农户模式, 较现有模式、农户模式分别增加 6.1%、

14.6%,说明优化模式保墒效果高于现有模式与农户模式。

2.2 不同水肥管理模式土壤水分垂直变化特征

3月份果树处于萌芽期,降雨量少,果树萌芽所需的养分与水分主要来自上年储存的营养。7月份随着果树叶面积增大及温度的升高、降雨量的减少,果园水分进入临界期,该时期果园水分含量的高低影响着果实的膨大与内在品质的形成。进入10月份温度降低、降雨量增多,果园水分的蒸发与果树的蒸腾作用均减弱,土壤水分进入蓄水期,该时期的土壤水分影响着来年果树生长。因此,选择3月、7月、10月来研究土壤水分的动态变化。此外,与大田不同,果园施肥具有不均匀性,采样点的不同会直接影响果园水分含量,本研究选择在树盘与行间进行采样,对不同时期不同位置的水分含量与变异性进行分析(以2014

年数据为例)。

如图2a所示,在萌芽期(3月),0~80 cm土层,土壤含水量表现为优化模式>现有模式>农户模式,优化模式含水量较农户模式、现有模式分别提高17%、10%。80~220 cm土层,各个处理土壤含水量均有增加趋势,优化模式显著高于农户模式与现有模式。220~300 cm各处理土壤含水量基本保持稳定,优化模式略高于农户模式与现有模式,但差异不显著。比较树盘与行间水分变化,可以看出,0~40 cm土层,树盘含水量高于行间,优化模式树盘显著高于农户模式与现有模式。40~300 cm土层,树盘与行间差异不显著。

在膨果期(7月),表层含水量较萌芽期有增加趋势,但随着土层加深,各个处理含水量显著降低(图2b)。0~60 cm土层含水量表现为优化模式(21.24%)>现有模式(19.12%)>农户模式(18.36%)。60~220 cm

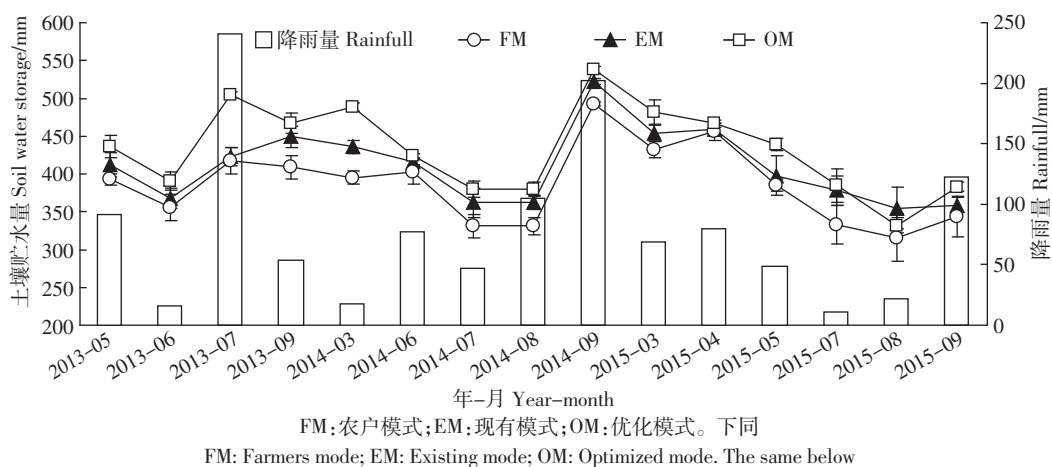


图1 不同年份间关键物候期不同处理0~200 cm土层土壤贮水量的动态变化

Figure 1 Variation of soil water storage in different treatments at different growth stages

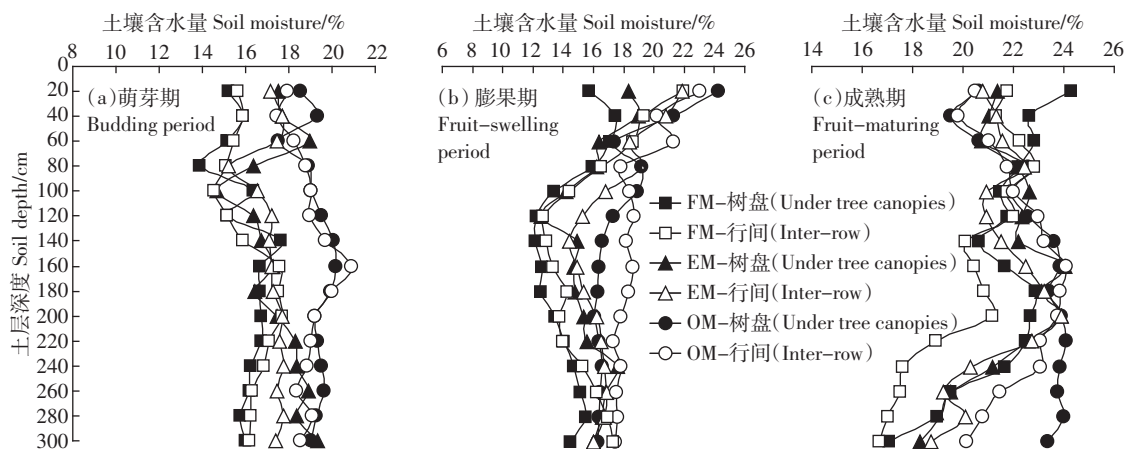


图2 不同处理不同生育时期0~300 cm土壤含水量垂直变化

Figure 2 Vertical variation of soil moisture content at 0~300 cm depth in orchard under different treatments

土层,土壤含水量出现先降低后增加的趋势,优化模式含水量最高,较农户模式、现有模式分别增加 29.3%、14.2%。220~300 cm 土层,各个处理间差异不显著,基本上保持稳定。分析树盘和行间水分变化可以看出,树盘 0~60 cm 土层中,优化模式(20.98%)>现有模式(19.67%)>农户模式(16.75%),优化模式与现有模式差异不显著。行间优化模式显著高于农户模式与现有模式,较农户模式、现有模式分别增加 15.7%、8.2%。

在成熟期(10 月),0~80 cm 土层平均含水量表现为农户模式(22.52%)>现有模式(21.41%)>优化模式(20.80%),80~200 cm 土层各个处理含水量基本保持稳定趋势,优化模式平均含水量最高(23.26%),较农户模式、现有模式分别增加 8.9%、2.5%。200~300 cm 土层各处理含水量有降低趋势(图 2c)。分析树盘行间水分含量可以看出,三个处理在 0~60 cm 土层平均含水量表现为树盘(21.15%)<行间(21.52%),在 60~300 cm 土层表现为树盘(21.48%)>行间(21.01%)。

不同管理模式土壤含水量变化统计分析结果如表 2 所示。三个时期优化模式的土壤平均含水量(0~300 cm 土层垂直平均)均高于农户模式,水分剖面变异系数(CV)小于农户模式。萌芽期优化模式含水量显著高于农户模式与现有模式,CV 为 4.45%;膨果期各个处理含水量无显著差异,优化模式 CV 最小;成熟期优化模式含水量显著高于现有模式与农户模式,CV 最小为 5.81%。可见,优化模式能有效提高土壤剖面水分含量,减小剖面水分的变异性,保墒效果优于农户模式与现有模式。

2.3 不同水肥管理模式对果树水分利用效率的影响

2013 年、2014 年和 2015 年果树生育期降雨量分

别为 402、448、352 mm。不同施肥与覆盖措施对 2013—2015 年果实产量与水分利用率的影响见表 3。

2014 年的产量最高,2013 年产量最低,2015 年处于中间水平。三年平均产量最高的为优化模式,较农户模式、现有模式分别增产 33.6%、20.1%。不同管理措施下果园水分利用率以 2014 年为最高,三个处理较 2013 年分别提高 131%(农户模式)、74%(现有模式)和 68%(优化模式),2015 年较 2014 年有所下降,但高于 2013 年的水分利用率,三个处理较 2013 年分别增加 28.9%(农户模式)、5.1%(现有模式)和 20.1%(优化模式)。优化模式的三年平均水分利用率最高,较农户模式、现有模式分别提高 42.6%、28.9%。

2.4 不同施肥与覆盖措施下关键物候期土壤温度的日变化

不同覆盖措施下 5~25 cm 土层开花期、膨果期及成熟期的土壤平均温度的日变化如图 3 所示。在开花期,农户模式(15.7℃)的日均温低于现有模式(17.2℃)与优化模式(16.9℃),但处理间差异不显著。最低温出现在早晨 8:00,现有模式显著高于农户模式,最高温出现在 14:00,各个处理间差异不显著。农户模式下日均温变异系数最大(13.6%),优化模式变异系数最小(11.5%)。进入膨果期太阳辐射增强,温度升高,表层土壤干燥疏松,土壤透气性增强,使得土壤日均温持续稳定,波动最小。5~25 cm 土层日均温表现为现有模式(25.3℃)>优化模式(23.7℃)>农户模式(23.4℃)。现有模式温度变异系数最大,为 13.8%,优化模式最小,为 9.3%。日均温最高值出现在 16:00,以现有模式下为最高(30.6℃),显著高于优化模式(25.1℃)与农户模式(25.5℃)。到成熟期,优化模式(13.9℃)与现

表 2 苹果生育期土壤剖面含水量(0~300 cm)的空间变化特征

Table 2 Spatial variation characteristics of soil moisture(0~300 cm) during growth period

生育期 Growth period	土壤含水量 Soil moisture/%	树盘 Under tree canopies			树行 Inter-row			平均 Average		
		FM	EM	OM	FM	EM	OM	FM	EM	OM
萌芽期(3 月) Budding period	平均值 Mean	16.02	17.52	19.27	16.20	17.23	18.94	16.24c	17.35b	19.00a
	标准差 SD	1.26	0.85	0.86	1.12	0.82	0.9	1.11	0.8	0.84
	变异系数% CV	7.09	5.33	4.52	6.6	4.92	4.75	6.39	4.9	4.45
膨果期(7 月) Fruit-swelling period	平均值 Mean	14.42	15.92	17.71	15.83	17.07	18.67	15.6a	16.56a	17.61a
	标准差 SD	3.42	1.6	1.01	2.92	2.39	1.14	3.14	1.86	0.71
	变异系数% CV	22.44	13.84	6.22	18.28	10.08	5.98	20.1	11.25	4.0
成熟期(9 月) Fruit-maturing period	平均值 Mean	21.52	21.54	22.78	20.15	21.34	22.1	20.8 b	21.4b	22.4 a
	标准差 SD	1.82	1.6	1.46	2.06	1.44	1.44	1.82	1.46	1.3
	变异系数% CV	8.47	7.44	6.41	10.25	6.77	6.51	8.75	6.8	5.81

注:同行数据后不同字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different letters within a row mean significant at 0.05 level. The same below.

表3 不同施肥与覆盖措施下果树的产量及水分利用效率

Table 3 Yield and water use efficiency under different fertilization and mulching

年份 Year	参数 Parameter	FM	EM	OM
2013	产量 $Y/\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	21 228	27 135	30 960
	耗水量 ET/mm	386	365	349
	水分利用率 $\text{WUE}/\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$	54.9b	74.2ab	82.7a
2014	产量 $Y/\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	44 478	46 908	55 746
	耗水量 ET/mm	350	362	398
	水分利用率 $\text{WUE}/\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$	127.1b	129.6b	139.8a
2015	产量 $Y/\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	30 538	33 082	41 910
	耗水量 ET/mm	264	257	254
	水分利用率 $\text{WUE}/\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$	70.8b	78.0b	99.5a
平均	产量 $Y/\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	32 081	35 708	42 872
	耗水量 ET/mm	333.5	328.2	334.1
	水分利用率 $\text{WUE}/\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$	115.7b	128.7b	165a

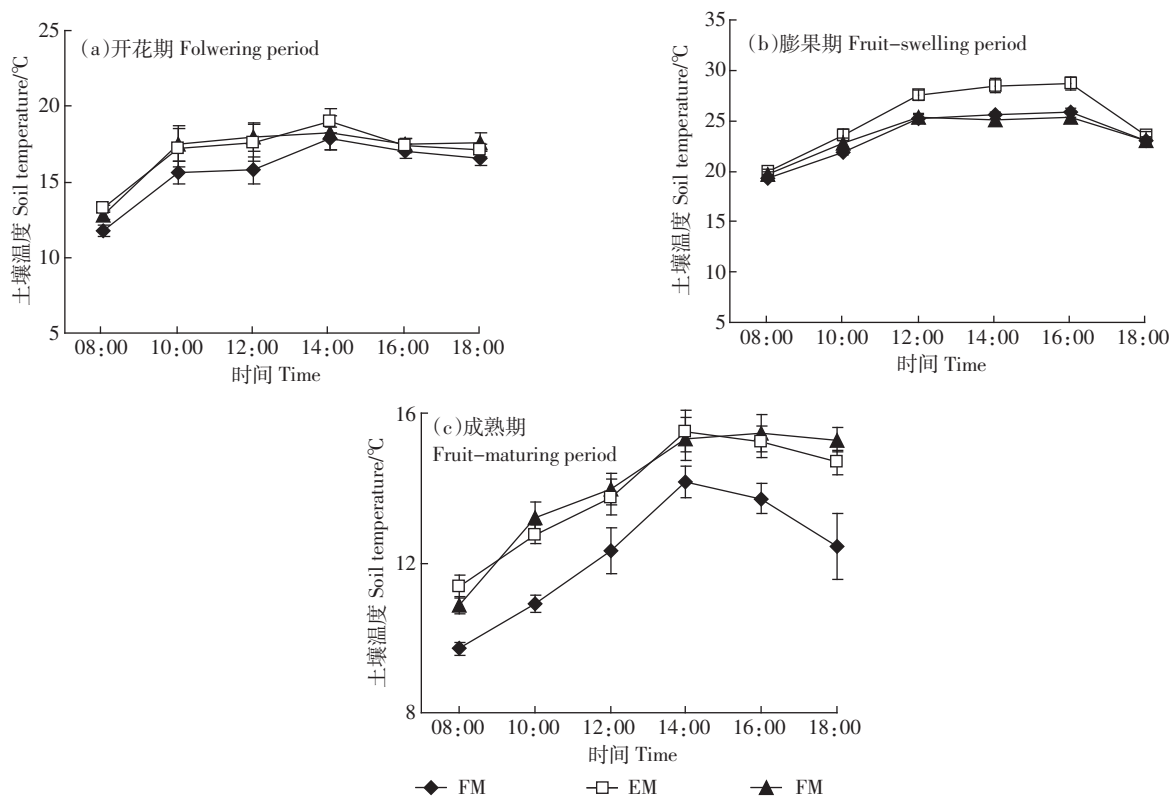


图3 不同管理措施下果园不同物候期地温的日变化

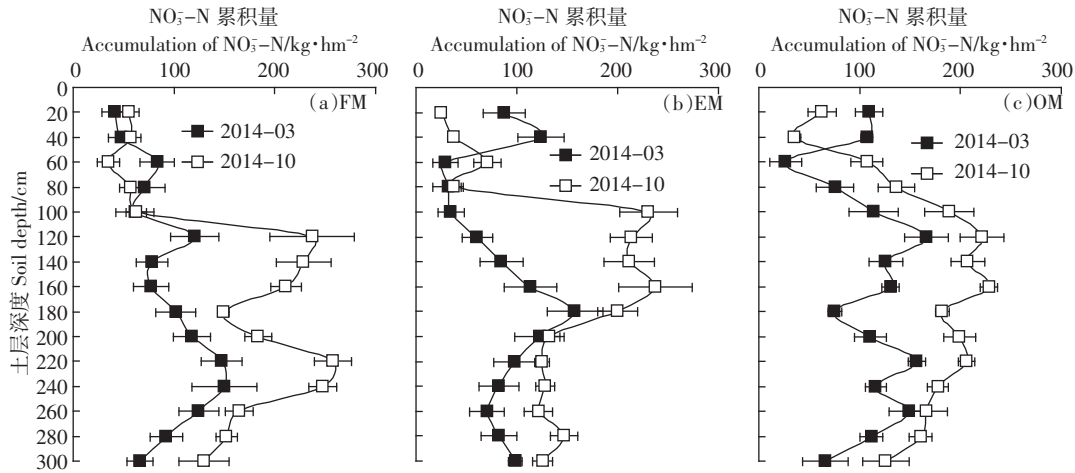
Figure 3 Diurnal variation of soil temperature under different managements at different tree growth periods

有模式(13.8℃)日均温均显著高于农户模式(12.2℃)。现有模式与农户模式的最高温出现在12:00—14:00,优化模式出现在14:00—16:00,温度变异系数大小顺序为现有模式>农户模式>优化模式。

2.5 不同施肥与覆盖措施下0~300 cm土层的 NO_3^- -N累积量

如图4所示,在0~120 cm土层,农户模式、现有

模式及优化模式3月份 NO_3^- -N累积量分别为503.9、451.9、724.2 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,10月份 NO_3^- -N累积量分别为732.1、826.3、1 010.1 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,成熟期优化模式 NO_3^- -N累积量较农户模式和现有模式分别增加277.9、183.7 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。在120~300 cm土层,农户模式、现有模式和优化模式3月份 NO_3^- -N累积量分别为956.2、910.3、1 042.8 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,10月份分别为1 724.3、1 680.6、1 653.1

图4 不同施肥与覆盖措施对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 累积量的影响Figure 4 Accumulation of $\text{NO}_3\text{-N}$ in 300 cm soil layer under different fertilization and mulching managements

$\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 成熟期优化模式 $\text{NO}_3\text{-N}$ 累积量较农户模式、现有模式分别降低 71.3、30.0 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。可见, 优化模式能有效调控 0~120 cm 土层 $\text{NO}_3\text{-N}$ 向下淋溶, 增加 0~120 cm 土层 $\text{NO}_3\text{-N}$ 累积量, 从而降低成熟期深层土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 累积量。

3 讨论

3.1 不同管理模式对果园土壤水分的影响

土壤贮水量的变化是土壤内部水分向上蒸散、向下渗透及其与大气降水共同作用、动态平衡的结果^[20]。在无灌溉的旱地果园土壤水分主要来自大气降水的补给, 受降雨季节性变化的影响, 土壤水分也存在着明显的季节性变化特征^[17,21]。本研究的结果表明, 不同年份由于生育期降雨量不同, 土壤贮水量变化差异较大, 三年贮水量最低值均出现在果树膨果期需水量较大但降雨量较少的时期, 最高值出现在成熟期或萌芽期果树需水量较少的时期。优化模式在二元覆盖及养分调控的条件下更能有效提高土壤整体贮水量, 优化模式三年均值较农户模式与现有模式分别提高 14.6%、6.1%。优化模式较高的贮水量是由于施入较多有机肥, 降低了土壤容重, 疏松土壤孔隙, 增加土壤水库容量, 同时优化模式行间套种小油菜可以有效减少株间土壤水分蒸发, 增加贮水量, 降低水分亏缺程度^[22]。

不同施肥与覆盖措施对不同时期土壤的保墒效果不同。2014 年萌芽期降雨量 14.6 mm, 果树需水量少, 根系生长缓慢, 优化模式与现有模式保温保墒效果好, 土体内部水分运移较快, 表层含水量高于农户模式, 100~300 cm 土层土壤水势起主导作用, 水分保

持稳定。由于树盘进行覆膜处理, 其含水量高于行间。2014 年膨果期降雨量 47 mm, 气温升高, 降水不足, 深层水分在蒸腾拉力的作用下不断向表层运移, 土壤水分输出大于输入, 土壤水分整体上呈降低的趋势。优化模式与现有模式的覆盖措施能起到防止土壤水分蒸发的作用, 但优化模式 0~300 cm 土层平均含水量高于现有模式, 主要是由于优化模式在幼果期行间种植生物量小、根系分布浅的小油菜, 到膨果期长的小油菜能起到遮阴的效果, 稳定了果园微域环境, 李国怀^[10]等研究指出, 柑橘园在种植白喜根和白三叶的条件下, 7—11 月果园土壤含水量较对照分别提高 2.1% 和 1.0%; 张先来^[23]等研究指出, 果园生草能提高 0~60 cm 土层土壤贮水量, 较对照提高 5.79%。他们的研究与本研究结果均一致。到成熟期降雨量增加, 果树耗水量降低, 土壤水分含量逐渐增加, 但在表层优化模式与现有模式含水量低于农户模式, 主要是因为: 一方面优化模式与现有模式条件下果实产量高, 耗水量大, 导致主根区水分含量低; 另一方面, 优化模式行间种植小油菜, 到果实成熟期油菜生物量的增大会消耗部分水分, 综合导致优化模式含水量较低。优化模式深层含水量高于现有模式与农户模式, 说明优化模式在行间套种小油菜、增施有机肥的条件下能增大土壤孔隙, 促进降雨入渗, 在防止深层土壤干燥化的过程中起积极作用。

本研究结果显示, 三年间优化模式产量较农户模式与现有模式平均增加 33.6%、20.1%, 主要原因是经过三年的施肥与覆盖, 果园微域环境基本稳定, 优化模式施入大量有机肥显著提高了土壤有机质, 再加上

合理的肥料配比,不仅能供给果树生殖生长与营养生长所需的大量营养元素,还能向土壤输送大量的生物活性物质,为作物提供了一个丰富、长效的营养环境^[24]。优化模式三年平均水分利用率较农户模式、现有模式分别提高42.6%、28.9%,也说明有机肥配合合理的氮磷钾能促进果树地上、地下部分协调生长,促进根系对水分的吸收利用,提高果树的光合速率与蒸腾作用^[18,25],进而提高水分利用率。

3.2 不同管理模式对果园土壤温度的影响

理想的地表覆盖有利于果树的生长和对水肥的吸收利用,不仅能调节环境温度、湿度,还能降低极端温度对果树生长的影响。土壤中水热运动是相互影响的,土壤水分影响土壤热容量及导热率,从而影响土壤温度,同时土壤温度的变化也会影响土壤水分运动^[26]。本研究结果显示,开花期优化模式与现有模式平均温度较农户模式分别升高1.2、1.5℃,主要是因为覆膜阻隔了土壤与水分的外界交换,增大了土壤含水量与热通量,削弱了土壤与外界的热量交换^[27]。有研究指出果树毛细根20~60 cm土壤中,最适温度为20~26℃,超过30℃根系的生长就会受到限制^[19]。由于膨果期太阳辐射增强,现有模式下树盘所覆盖的黑色膜吸热作用显著且膜下难以散热,再加上行间清耕,最高温度达到30.7℃,地温超过了果树根系生长的最适范围,不利于果树的正常生长,而优化模式在行间种植的小油菜在膨果期迅速生长,能起到遮阴效果,最高温较现有模式降低4.0℃。到成熟期,优化模式与现有模式的日均温高于农户模式,但优化模式的最高温持续时间长于现有模式,且优化模式下温度变异系数最小。主要原因是行间小油菜能增大土壤容积热容量与导温率,削弱太阳长波辐射,降低能量的净支出,从而降低了温度日变化^[28]。

3.3 不同管理模式对果园土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 累积量的影响

王小英等^[29]研究指出,陕西果园平均施氮量927.2 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,高于专家推荐施氮量2倍以上,高于国外果园施氮量6~8倍,因而增加了土壤氮环境负荷,盈余的氮素主要以 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的形式累积在土壤剖面,形成了危险的生态环境隐患。范鹏等^[30]研究指出,白水12~16年树龄的果园深层土壤出现明显的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 累积现象。吕殿青等^[31]研究指出,8年以上苹果园深层 $\text{NO}_3\text{-N}$ 累积量在0~2 m和0~4 m内分别达1602、3414 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。因此,降低深层 $\text{NO}_3\text{-N}$ 累积量是实现农业和生态环境可持续发展的关键。本研究结果显示,在成熟期,优化模式能显著增加0~120 cm土层

$\text{NO}_3\text{-N}$ 累积量,较农户模式、现有模式分别增加277.9、183.7 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,同时能减少 $\text{NO}_3\text{-N}$ 向深层淋溶,120~300 cm土层 $\text{NO}_3\text{-N}$ 累积量较农户模式、现有模式分别降低71.3、30.0 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。可见,优化模式通过增施有机肥和合理氮磷钾配比能有效降低 $\text{NO}_3\text{-N}$ 由于降水而引发的深层淋溶风险,与邢素丽等^[9]研究有机无机配施对土壤养分环境效应的结果一致。而120~300 cm土层,农户模式 $\text{NO}_3\text{-N}$ 累积量高于优化模式主要是因为农户模式长年单施化肥,土壤保水保肥能力降低,养分难以被果树根系吸收,从而脱离根区在深层累积。

4 结论

(1)优化模式能显著提高0~200 cm土层土壤贮水量,贮水量的提高是合理施肥与适宜保墒措施共同作用的结果。优化模式能提高浅层土壤含水量随时间变化的稳定性,增加降雨入渗,缓解深层土壤干燥化现象,提高果实产量,同时提高水分利用率。

(2)增施有机肥、调整氮磷钾配比配合行间生草、树盘覆膜的集成措施能增加成熟期0~120 cm土层 $\text{NO}_3\text{-N}$ 累积量,降低120~300 cm土层 $\text{NO}_3\text{-N}$ 累积量,优化模式是渭北旱地果园改善生态环境、获得高产的最优果园管理模式。

参考文献:

- [1] 张义, 谢永生, 郝明德, 等. 不同地表覆盖措施对苹果园土壤性态果树生长及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(2): 279-286.
ZHANG Yi, XIE Yong-sheng, HAO Ming-de, et al. Effects of different patterns of surface mulching on soil hydrology in an apple orchard[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(2): 279-286.
- [2] 樊军, 郝明德, 邵明安, 等. 黄土高原深层水分的运移对农田系统的影响[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 61-64.
FAN Jun, HAO Ming-de, SHAO Ming-an, et al. Water consumption of deep soil layers and eco-environmental effects of agricultural ecosystem in the Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(1): 61-64.
- [3] 赵佐平, 闫莎, 刘芬, 等. 陕西果园主要分布区氮素投入特点及氮负荷风险分析[J]. 生态学报, 2014, 34(19): 112-117.
ZHAO Zuo-ping, YAN Sha, LIU Fen, et al. Analysis of nitrogen inputs and soil nitrogen loading in different kinds of orchards in Shaanxi Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(19): 112-117.
- [4] 魏孝荣, 郝明德, 张春霞. 旱地长期施肥对土壤水分的影响[J]. 水土保持研究, 2003, 10(1): 95-97.
WEI Xiao-rong, HAO Ming-de, ZHANG Chun-xia. Effect of long-time fertilizer on soil moisture in dry land[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 10(1): 95-97.
- [5] 王志勇, 红梅, 杨殿林, 等. 供氮水平和有机无机配施对夏玉米产

- 量及土壤硝态氮的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2008(6): 11-14.
- WANG Zhi-yong, HONG Mei, YANG Dian-lin, et al. Effects of nitrogen fertilizer rate and combined application of organic manure and chemical fertilizer on yield in summer maize and on soil $\text{NO}_3\text{-N}$ [J]. *China Soil and Fertilizer*, 2008(6): 11-14.
- [6] 邢素丽, 韩宝文, 刘孟朝, 等. 有机无机配施对土壤养分环境及小麦增产稳定性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(增刊): 135-140.
- XING Su-li, HAN Bao-wen, LIU Meng-chao, et al. The effect of NPK fertilizer combined with soil organic manure on soil nutrition and wheat yield[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(Suppl): 135-140.
- [7] 李涛涛, 翟丙年, 李永刚, 等. 有机无机肥配施对渭北旱塬红富士苹果树生长发育及产量的影响[J]. 果树学报, 2013, 30(4): 591-596.
- LI Tao-tao, ZHAI Bing-nian, LI Yong-gang, et al. Effect of fertilizer type on growth and yield of Fuji apple in Weibei dry region of Shaanxi[J]. *Journal of Fruit Science*, 2013, 30(4): 591-596.
- [8] 李小勇, 李红旭, 李建明, 等. 不同地表覆盖措施对果园水热特征的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(3): 746-754.
- LI Xiao-yong, LI Hong-xu, LI Jian-ming, et al. The effects of different mulching way on soil water thermal characteristics in pear orchard in the arid area[J]. *Acta Ecological Sinica*, 2014, 34(3): 746-754.
- [9] 汪景宽, 张继宏, 须湘成, 等. 长期地膜覆盖对土壤氮素状况的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1996, 2(2): 125-130.
- WANG Jing-kuan, ZHANG Ji-hong, XU Xiang-cheng, et al. Effect of long term covering with plastic film on characteristic of nitrogen in soil[J]. 1996, 2(2): 125-130.
- [10] 李国怀, 伊华林. 生草栽培对柑橘园土壤水分及有效养分、果实产量及品质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(2): 161-163.
- LI Guo-huai, YI Hua-lin. Influences of sod culture on the soil water content, effect of soil nutrients, fruit yield and quality in citrus orchard[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, 13(2): 161-163.
- [11] 高茂盛, 廖允成, 李 侠, 等. 不同覆盖措施对渭北旱塬苹果园土壤贮水量的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(10): 2080-2087.
- GAO Mao-sheng, LIAO Yun-cheng, LI Xia, et al. Effects of different mulching patterns on soil water-holding capacity of non-irrigated apple orchard in the Weibei Plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(10): 2080-2087.
- [12] 李同川, 李会科, 郭 宏, 等. 渭北黄土高原果园生草地旱季土壤水分特征研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21(1): 29-38.
- LI Tong-chuan, LI Hui-ke, GUO Hong, et al. Soil moisture characteristics of different herbage soil water in apple orchard in the area of Weibei Plateau in dry season[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(1): 29-38.
- [13] 李会科, 张广军. 黄土高原旱地苹果园生草对土壤贮水的影响[J]. 草地学报, 2007, 15(1): 76-81.
- LI Hui-ke, ZHANG Guang-jun. Effects of growing different herbage on soil water-holding of a non-irrigated apple orchard in the Weibei area of the Loess Plateau[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2007, 15(1): 76-81.
- [14] 宋宇琴, 李六林, 李 浩, 等. 现代土壤管理措施对果园水分的影响[J]. 北京农学院学报, 2015, 30(3): 131-136.
- SONG Yu-qin, LI Liu-ling, LI Hao, et al. Advances in modern orchard soil management effects on moisture[J]. *Journal of Beijing University of Agriculture*, 2015, 30(3): 131-136.
- [15] 揣峻峰, 谢永生, 索改弟, 等. 地膜与秸秆双重覆盖对渭北苹果园土壤水分及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(2): 26-31.
- CHUAI Jun-feng, XIE Yong-sheng, SUO Gai-di, et al. Effects of dual mulching of film and straw on soil moisture and apple yield in Weibei region[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31(2): 26-31.
- [16] 田 飞, 谢永生, 张 义, 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 Yong-sheng, ZHANG Yi, 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.
- [17] 赵 刚, 樊廷录, 李尚中, 等. 黄土高原苹果园土壤水分动态[J]. 应用生态学报, 2015, 26(4): 1199-1204.
- ZHAO Gang, FAN Ting-lu, LI Shang-zhong, et al. Soil moisture dynamics of apple orchard in Loess Plateau dry land[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(4): 1199-1204.
- [18] 陈 曦, 任树梅, 杨培岭, 等. 京郊地区苜蓿草地土壤水分状况与产草量的研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(1): 218-220.
- CHEN Xi, REN Shu-mei, YANG Pei-ling, et al. Relationships between soil moisture conditions and alfalfa yield in the suburb of Beijing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(1): 218-220.
- [19] 王金锋, 张林森, 张永旺, 等. 地布覆盖对渭北旱塬苹果园土壤水热效应及产量品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(1): 75-78.
- WANG Jin-feng, ZHANG Lin-sen, ZHANG Yong-wang, et al. Effects of ground cloth mulching on soil water, temperature, yield and quality in apple orchard in weibei plature[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(1): 75-78.
- [20] 张 义, 谢永生. 不同覆盖措施下苹果园土壤水文差异[J]. 草业学报, 2011, 20(2): 85-92.
- ZHANG Yi, XIE Yong-sheng. Effects of different patterns of surface mulching on soil hydrology in an apple orchard[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(2): 85-92.
- [21] 王延平, 韩明玉. 洛川苹果园土壤水分变化特征[J]. 应用生态学报, 2012, 23(3): 731-738.
- WANG Yan-ping, HAN Ming-yu. Variation characteristics of soil moisture in apple orchards of Luochuan County, Shaanxi[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(3): 731-738.
- [22] 张 洁, 吕军杰, 王育红, 等. 豫西旱地不同覆盖方式对冬小麦生长发育的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(2): 94-97.
- ZHANG Jie, LÜ Jun-jie, WANG Yu-hong, et al. Effects of different mulching methods on winter wheat the growth on west of Henan dry land[J]. *Agricultural Research in the Arid*, 2008, 26(2): 94-97.
- [23] 张先来, 李会科, 张广军, 等. 种植不同牧草对渭北苹果园土壤水分影响的初步分析[J]. 西北林学院学报, 2005, 20(3): 56-59.
- ZHANG Xian-lai, LI Hui-ke, ZHANG Guang-jun, et al. Effects of inter planting different herbage on soil moisture in apple orchards of Weibei Plateau[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2005, 20(3): 56-59.

- [24] 张福锁, 陈新平, 陈 清. 中国主要作物施肥指南[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2009: 84-87.
- ZHANG Fu-suo, Chen Xin-ping, Chen Qing. Major crop fertilization directory in China[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2009: 84-87.
- [25] 李建明, 潘铜华, 王玲慧, 等. 水肥耦合对番茄光合、产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 171-180.
- LI Jian-ming, PAN Tong-hua, WANG Ling-hui, et al. Effects of water-fertilizer coupling on tomato photo synthesis, yield and water use efficiency[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(10): 171-180.
- [26] 黄金辉, 廖允成, 高茂盛, 等. 耕作和覆盖对黄土高原果园土壤水分和温度的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(11): 2652-2658.
- HUANG Jin-hui, LIAO Yun-cheng, GAO Mao-sheng, et al. Effects of tillage and mulching on orchard soil moisture and temperature in Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(11): 2652-2658.
- [27] 王树森, 邓根云. 地膜覆盖的增温机制[J]. 中国农业科学, 1991, 24(3): 74-78.
- WANG Shu-sen, DENG Gen-yun. A study on the mechanism of soil temperature in creasing under plastic mulch[J]. *Scientia Agriculture Science*, 1991, 24(3): 74-78.
- [28] 王艳廷, 冀晓昊, 吴玉森, 等. 我国果园生草的研究进展[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1892-1900.
- WANG Yan-ting, JI Xiao-hao, WU Yu-sen, et al. Research progress of cover crop in Chinese orchard[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(6): 1892-1900.
- [29] 王小英, 同延安, 刘 芬, 等. 陕西省施肥现状评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(1): 206-213.
- WANG Xiao-ying, TONG Yan-an, LIU Fen, et al. Evaluation of the situation of fertilization in apple fields in Shaanxi Province[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(1): 206-213.
- [30] 范 鹏, 李 军, 张丽娜, 等. 黄土高原苹果园地深层土壤氮素含量与分布特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 420-429.
- FAN Peng, LI Jun, ZHANG Li-na, et al. Soil nitrogen contents and deep profile distributions in apple orchards of the Loess Plateau[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(2): 420-429.
- [31] 吕殿青, 同延安, 孙本华. 氮肥施用对环境污染影响的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(1): 8-15.
- LÜ Dian-qing, TONG Yan-an, SUN Ben-hua. Study on effect of nitrogen fertilizer use on environment pollution[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1998, 4(1): 8-15.