

网络出版时间:2015-12-02 14:25

DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2016.01.013

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20151202.1425.026.html>

水肥优化管理对渭北旱塬红富士苹果水分利用的影响

闫明灏^{1,2}, 翟丙年^{1,2}, 于昕阳^{1,2},
金忠宇^{1,2}, 李展飞^{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] 【目的】在渭北旱塬无灌溉条件下,优化苹果水肥管理,为渭北旱塬雨养红富士苹果高产和水分高效利用提供理论依据。【方法】2012-10—2013-09 采用田间试验,以 9 年树龄“长富二号”为材料,设置农户传统栽培模式(农户模式)和现有水氮高效技术模式(现有模式)以及氮磷钾优化配比、合理基追比、树盘覆盖黑色膜、行间种植生草、配施有机肥等措施集成的创新水肥高效技术模式(创新模式),研究这 3 种水肥管理模式对苹果园土壤水分剖面分布、贮水量的动态变化以及苹果产量和水分利用效率的影响。【结果】6—9 月,0~200 cm 土层土壤平均含水率为农户模式<现有模式<创新模式;土壤贮水量随着生育期的推进呈先上升后下降再上升的趋势,总体呈增加趋势,创新模式土壤平均贮水量显著高于其他 2 种处理;3 种处理中,创新模式的苹果产量和水分利用效率均最高,分别为 42 645 kg/hm²,100.69 kg/(mm·hm²),比农户模式和现有模式分别提高 44.86%和 34.48%及 53.77%和 36.92%,且差异达显著水平。【结论】在渭北旱塬无灌溉条件下,创新模式显著提高了苹果水分利用效率及产量,是渭北旱塬雨养果园最适宜的水肥管理技术模式。

[关键词] 水肥优化管理;红富士苹果;土壤水分;水分利用效率;渭北旱塬

[中图分类号] S661.105

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2016)01-0081-10

Effect of optimized water and fertilizer management on water use of Fuji apple in Weibei Dryland

YAN Ming-hao^{1,2}, ZHAI Bing-nian^{1,2}, YU Xin-yang^{1,2},
JIN Zhong-yu^{1,2}, LI Zhan-fei^{1,2}, WANG Zhao-hui^{1,2}

(1 College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-Environment in Northwest China,
Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 This study optimized the water and fertilizer management in Weibei Dryland without irrigation to provide theoretical basis and technical assistance for high production of Fuji apple. 【Method】 A field experiment was conducted from October 2012 to September 2013 with 9 years old Fuji No. 2. Three treatments were set up: Farmers mode (all operations were based on farmers), existing mode

[收稿日期] 2014-05-04

[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“渭北旱地矮化密植红富士苹果水肥高效利用技术研究与推广”;陕西省科技统筹创新工程计划项目重大科技难题苹果专项(2011KTZB02-02-05);西北农林科技大学试验示范基地科技成果推广项目(Z222021411);校企合作项目“苹果科学施肥技术研究与示范”(K403021304)

[作者简介] 闫明灏(1988—),女(满族),河北承德人,硕士,主要从事旱地果园水肥管理研究。E-mail:yanminghao@nwsuaf.edu.cn

[通信作者] 翟丙年(1967—),男,陕西宝鸡人,教授,博士,主要从事植物营养调控与旱地水肥管理研究。E-mail:zhaibingnian@nwsuaf.edu.cn

(current water and nitrogen management technologies) and optimized mode (optimized N,P and K ratio, reasonable basic fertilizers to supplement fertilizers ratio, black plastic film mulch under tree, grass cover in line and combined application of organic manure). Apple yield, *WUE* (water use efficiency) as well as spatially and temporally dynamics of soil water within soil depth of 0—200 cm were analyzed to compare the three management modes. 【Result】 From June to September of 2013, the optimized mode had the highest soil average water content at the soil depth of 0—200 cm, followed by the existing mode and the farmers, mode. The soil water storage rose at first, and decreased at expanding stage before increasing at maturing stage. The water storage of optimized mode was significantly higher than the other two modes. The optimized mode had the highest yield (42 645 kg/hm²) and *WUE* (100.69 kg/(mm·hm²)), with 44.86% and 53.77% increase compared to farmers mode, and 34.48% and 36.92% increase compared to the existing mode. 【Conclusion】 In Weibei Dryland without irrigation, the optimized mode could effectively increase the *WUE* and apple yield as the most suitable water and fertilizer management method for apple orchards.

Key words: optimized water and fertilizer management; Fuji apple; soil moisture; water use efficiency; Weibei Dryland

渭北旱塬是我国惟一符合生产优质苹果 7 项指标要求的苹果最佳优生区,目前苹果产业已成为促进该区域经济发展的支柱产业^[1]。当地果园灌溉艰难,果树所需水分来源主要为降水,然而该地区年均降水量少,且年内分布不均,自然降水与苹果需水之间关系极不协调^[2],加之果农盲目施肥^[3-4],使得水肥成为该地区苹果产量和品质提高的主要限制因子,严重影响果业的持续发展^[5-6]。因此,加强水肥管理,提高水分利用效率是该地区雨养果园生产中的核心问题。

为了解决这一问题,国内外很多专家从不同方面进行了大量研究。有研究表明,通过地表覆盖管理技术,在化肥施用量减少 1/2 的情况下,果实产量不会降低^[7]。此外,地膜覆盖可以提高果园水分利用效率,生草覆盖可提高果园土壤含水率,并显著提高果实产量^[8-10]。除了通过地表覆盖进行蓄水保墒,还可以在施肥技术上,通过有机无机肥配施及适宜的无机肥配比达到“以肥调水”的作用效果^[11-12]。有研究表明,施有机肥能显著提高土壤含水率、利于土壤的扩蓄增容,且对提高作物产量和水分利用效率有显著效果^[13-14]。

目前在渭北旱塬苹果产区,提高果园水分利用效率的研究多集中在地表覆盖、生草以及有机肥和无机肥配施等单一措施方面,而将多项技术集成使用的研究则鲜见报道。本研究以红富士苹果为供试材料,采用田间小区试验,探讨了覆盖保墒、有机无机肥配施及适宜的氮磷钾肥比例等优化施肥模式对果园土壤水分及苹果产量的影响,以期探索出适合该区域苹果生产的最佳水肥管理模式,为实现旱区

雨养果园高产、稳产和高效生产提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2012-10—2013-09 在陕西白水县城收水乡进行。试验地位于陕西渭北旱塬,地处东经 109°16′~109°45′,北纬 35°04′~35°27′,属温带大陆性季风气候,常年年均降雨量 570 mm,年际变化较大,且集中在 7—9 月,冬春少雨易干旱,年均气温 11.4℃,年极端最高、最低气温分别为 39.4 和 -16.7℃,无霜期 207 d 左右。2012-10—2013-09 试验期内年降水量为 495.4 mm,详见图 1。

试验地土壤类型为垆土,质地中壤,无灌溉条件,0~20 cm 土层土壤养分含量为:有机质 11.22 g/kg,全氮(N)0.74 g/kg,硝态氮(NO₃⁻-N)7.71 mg/kg,铵态氮(NH₄⁺-N)2.57 mg/kg,有效磷(P₂O₅)6.91 mg/kg,速效钾(K₂O)101.40 mg/kg, pH 8.11;20~40 cm 土层土壤养分含量为:有机质 7.48 g/kg,全氮(N)0.50 g/kg,硝态氮(NO₃⁻-N)8.78 mg/kg,铵态氮(NH₄⁺-N)2.50 mg/kg,有效磷(P₂O₅)4.15 mg/kg,速效钾(K₂O)70.60 mg/kg, pH 8.00。

1.2 供试材料

供试苹果品种为“长富二号”(Malus pumila Mil),富士系列,基砧为 M26,果树为 9 年树龄,株行距为 3 m×4 m,树形为自由纺锤形,生草草种为小油菜,果树生长期清耕带定期除草,试验地管理水平同当地果园。

1.3 试验设计

本试验设 3 个处理,分别是农户传统栽培模式(农户模式)、现有水氮高效技术模式(现有模式)、创新水肥高效技术模式(创新模式),小区面积 666.7 m² (60 棵树),不设重复。农户模式为全园清耕无覆盖;现有模式为行间覆盖生草,树盘覆黑色地膜;创新模式为行间覆盖生草,树盘覆黑色地膜,5—6 月干旱时期叶片喷施抗蒸腾剂。施用无机肥种类为尿素(N 46%)、磷酸二铵(P₂O₅ 46%,N 18%)和硫酸

钾(K₂O 50%),有机肥为猪厩肥(有机质 32.50 g/kg,全氮 1.70 g/kg,有效磷 112.44 mg/kg,速效钾 1 218.10 mg/kg),各处理的具体施肥量见表 1。创新模式中有机肥以基肥形式于秋季一次性施入;50%无机肥作基肥于秋季施入,剩余 50%无机肥于膨果初期结合降雨以追肥方式施入。农户模式和现有模式中,67%无机肥作基肥于秋季施入,剩余 33%无机肥于萌发前和膨果中期以追肥方式施入。

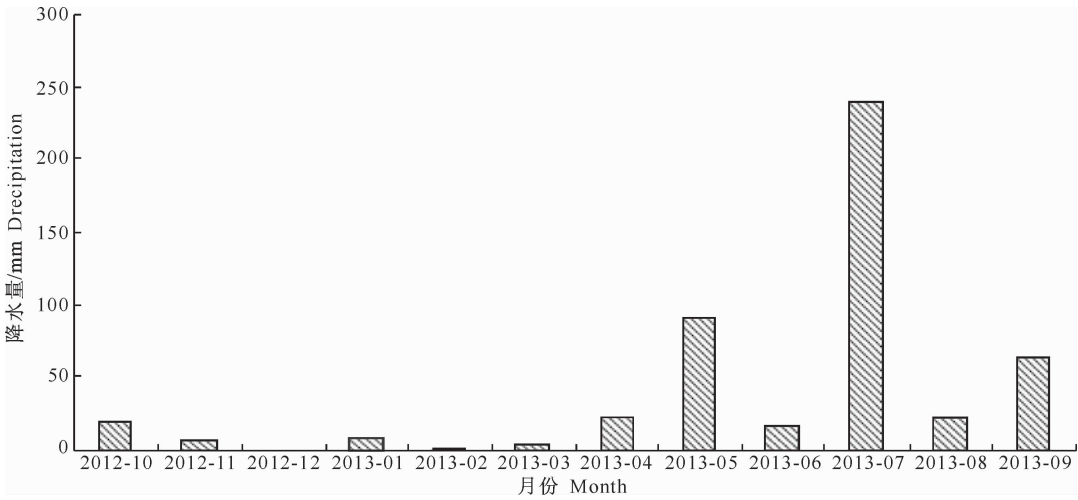


图 1 2012—2013 年苹果生育期间的降水量
Fig. 1 Precipitation in apple growth period during 2012—2013

表 1 苹果园水肥优化管理试验方案

处理 Treatment	氮肥(N)/ (kg·hm ⁻²) Nitrogen	磷肥(P ₂ O ₅)/ (kg·hm ⁻²) Phosphorus	钾肥(K ₂ O)/ (kg·hm ⁻²) Potassium	有机肥/ (kg·hm ⁻²) Organic fertilizer	追肥时期 Topdressing time	保墒措施 Moisture conservation
农户模式 Farmers mode	450	240	180	0	萌发前 Pre-emergence stage	清耕,无覆盖 Clean tillage, without plastic film
现有模式 Existing mode	300	180	270	0	膨果中期 Middle expanding stage	行间覆草,树盘覆黑色膜 Grass cover inter-row and black plastic film mulch under tree trunks
创新模式 Optimized mode	300	180	270	45 000	膨果初期 Preliminary expanding stage	行间覆草,树盘覆黑色膜,叶面 喷施抗蒸腾剂 Grass cover inter-row and black plastic film mulch under tree trunks and spraying antitrans- pirant on leaf

1.4 测定项目及方法

1.4.1 土壤含水率测定 每小区选取树冠及长势比较一致的苹果树,在行间树冠外围垂直投影处和株间距树干 40 cm 树盘处设置取样点,采用“S”形取样法分树盘和行间取 6 个重复样。在 2013 年 6—9 月下旬采用土钻对 0~200 cm 土层土壤进行分层取样(每 20 cm 为 1 层),取样后立即带回实验室称鲜土质量,计算土壤含水率,同时测定各土层土壤体积

质量。根据土壤含水率和体积质量计算土壤贮水量。

土壤贮水量(mm) = 土壤含水率(%) × 土壤体积质量(g/cm³) × 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 电子秤分别称量每棵树苹果产量。

1.4.3 水分利用效率 水分利用效率(WUE)按下

式计算：

$$WUE=Ya/ET;$$

$$ET=P+I+\Delta W-R-D。$$

式中： WUE 为水分利用效率， $\text{kg}/(\text{mm}\cdot\text{hm}^2)$ ； Ya 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 ； I 为灌溉量， mm ； ΔW 为时段末与时段初田间土壤贮水变化量， mm ； R 为地表径流量； D 为耕层土壤水的渗漏量。

在试验区土壤及降水条件下， R 和 D 可忽略不计，全生育期无灌水，故 I 为 0。因此，总耗水量实际计算公式为： $ET=P+\Delta W$ 。

1.5 数据处理

试验数据采用 Microsoft Excel 2003 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。

2 结果与分析

2.1 不同水肥管理模式土壤剖面水分的分布

土壤水分的剖面分布主要受自然降水、土壤蒸发、植物耗水等相互作用的影响，同时不同水分管理也对其具有重要的影响^[15-16]。结合果实生长及试验地区降水规律，选择幼果期（6 月）、膨果初期（7 月）、

膨果期（8 月）和成熟期（9 月）进行土壤剖面水分分布分析，结果见图 2~5。

2.1.1 幼果期 试验区降雨存在典型的季节性分布，5 月份之前降雨甚少或无^[17]，5—9 月份的降雨量约占全年平均降水量的 87% 左右，而此期果树从幼果期开始进入生长季，所以选择幼果期的土壤水分剖面分布作为土壤水分分析的开始。

对幼果期的行间土壤含水率（图 2-A）进行分析可知，各处理的行间土壤含水率从表层到深层均呈增—减—增的变化趋势，土壤含水率第 1 个峰值，农户模式和现有模式出现在 60 cm 土层，创新模式出现在 80 cm 土层。在 0~20 cm 土层，受生草生长的影响，创新模式和现有模式土壤含水率低于农户模式，差异不显著（ $P>0.05$ ）；在 20~100 cm 土层，农户模式和现有模式土壤含水率先增加后减少，变化幅度较大，但创新模式土壤含水率有所减少，但变化幅度很小。

对幼果期的树盘土壤含水率（图 2-B）进行分析可知，农户模式土壤含水率从表层到深层呈增—减—增的变化趋势，由于有树荫遮蔽，土壤含水率略高于行间；现有模式和创新模式土壤含水率则呈现波动性变化，且在 80~200 cm 土层创新模式的土壤含水率高于现有模式。

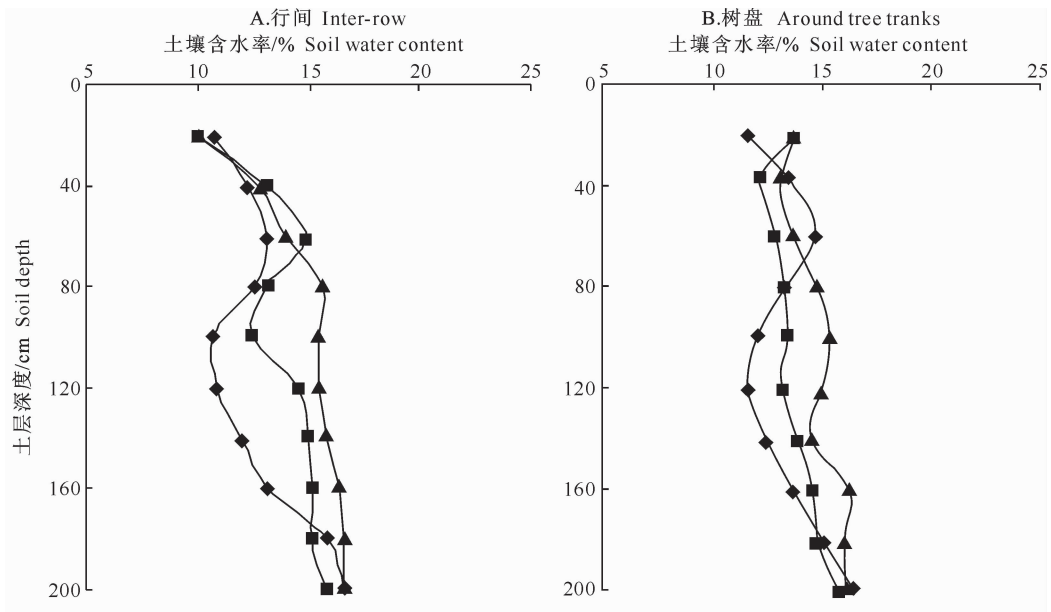


图 2 苹果幼果期不同水肥管理模式 0~200 cm 土层土壤水分的分布

—◆—, 农户模式; —■—, 现有模式; —▲—, 创新模式

Fig.2 Distribution of soil water content at soil profile of 0—200 cm under different treatments at young fruit stage

—◆—, Farmers mode; —■—, Existing mode; —▲—, Optimized mode

由图 2 还可知，在幼果期 0~200 cm 土层各处 理土壤平均含水率在 10.03%~16.57% 波动，该土

层各处理平均含水率由高到低为创新模式(14.86%)>现有模式(13.84%)>农户模式(13.09%)。果树在该时期刚结束干旱,一直消耗土壤中的贮藏水分,导致土壤含水率相对于其他时期整体偏低。

2.1.2 膨果初期 7 月份以后黄土高原果区逐渐进入雨季,果园土壤开始蓄水^[18],且膨果初期开始苹果纵横径都显著增长,出现一个生长高峰,随着时间的推移,苹果纵径虽仍继续增长,但增长速率小于前期,所以此时的土壤水分剖面分布对于果实生长至关重要。

从膨果初期的行间土壤含水率(图 3-A)剖面分布可以看出,农户模式与现有模式土壤含水率随着土层的加深呈波动式下降,创新模式土壤含水率随着土层加深呈减小—增大—减小趋势。由于行间生草对自然降水的阻挡及吸收,0~40 cm 土层平均含水率以农户模式最大;40~80 cm 土层为果树根系

的主要吸水区域,该区域各处理土壤水分由于被根系吸收迅速减少;80~200 cm 土层土壤含水率均表现为创新模式>现有模式>农户模式。

由图 3-B 可知,膨果初期树盘土壤含水率的变化趋势总体与行间相同。由于现有模式和创新模式的树盘有地膜覆盖,一定程度上阻碍了降水进入土壤,0~80 cm 土层土壤平均含水率以农户模式最大,但与其他处理差异较小;80~200 cm 土层土壤含水率均表现为创新模式>农户模式>现有模式,创新模式的蓄水、保水能力最强。

由图 3 可知,膨果初期 0~200 cm 土层各处理土壤平均含水率为 14.34%~25.18%,变异较大,剖面平均土壤含水率顺序为创新模式(21.85%)>现有模式(20.01%)>农户模式(19.87%)。由于 7 月降水较多,此次采样为雨后 2 d,可以看出雨后创新模式土壤吸纳保存水分的能力最好。

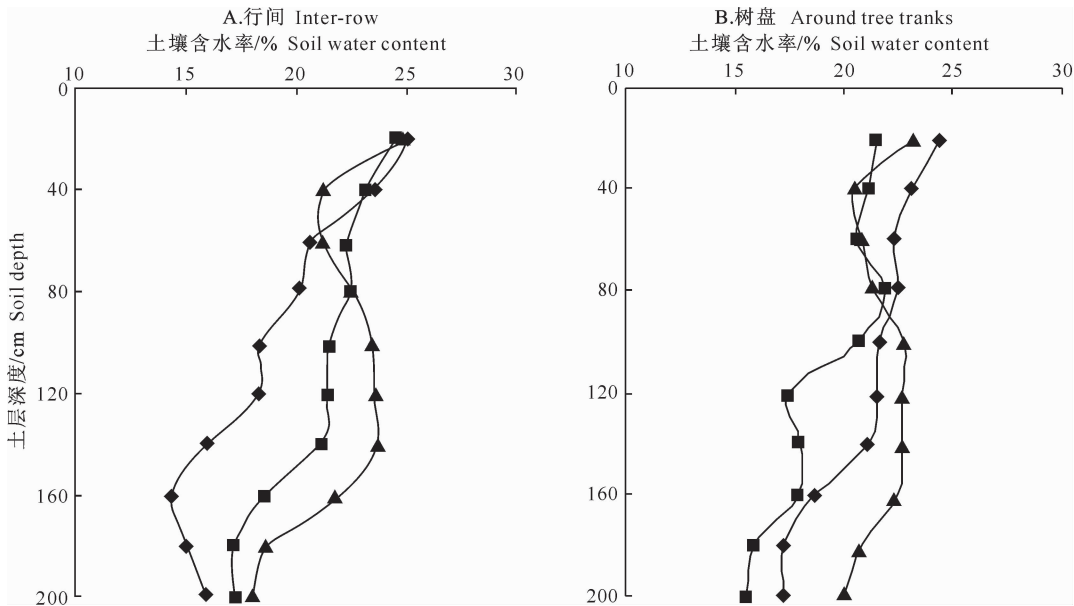


图 3 苹果膨果初期不同水肥管理模式下 0~200 cm 土层土壤水分的分布
—◆—, 农户模式; —■—, 现有模式; —▲—, 创新模式

Fig. 3 Distribution of soil water content at soil profile of 0—200 cm under different treatments at preliminary expanding stage
—◆—, Farmers mode; —■—, Existing mode; —▲—, Optimized mode

2.1.3 膨果期 到膨果期由于果树生长进入旺盛期,果树本身耗水量较大,加之气温升高,降水补充相对不足等因素的影响,土壤蓄水量再次下降。

从膨果期的行间土壤含水率剖面分布(图 4-A)可以看出,3 种处理变化趋势相同,差异较小。在 0~100 cm 土层土壤含水率随着土层加深而增大,100~200 cm 土层土壤含水率基本保持不变。行间

生草进入旺长期,会消耗更多的水分,所以 0~60 cm 土层土壤含水率为农户模式>创新模式>现有模式,在 60~200 cm 土层则表现为创新模式>现有模式>农户模式。

从膨果期的树盘土壤含水率变化(图 4-B)可以看出,农户模式下土壤含水率的变化趋势为先增大后减小,现有模式和创新模式下土壤含水率的变化

趋势为先减小后增大再减小。由于创新模式和现有模式的树盘有地膜覆盖,有效地减少了表层土壤水分蒸发,创新模式施用有机肥对土壤结构的改良作用,所以 0~200 cm 土层树盘土壤剖面含水率均表现为创新模式>现有模式>农户模式。

由图 4 可知,膨果期 0~200 cm 土层各处理土壤平均含水率为 13.04%~21.17%,3 种处理平均

含水率由高到低顺序为创新模式(19.28%)>现有模式(18.26%)>农户模式(17.45%)。膨果期现有模式和创新模式下树盘土壤含水率均大于行间,而农户模式下树盘土壤含水率小于行间,说明现有模式和创新模式减少的水分蒸发远大于生草消耗的水分。

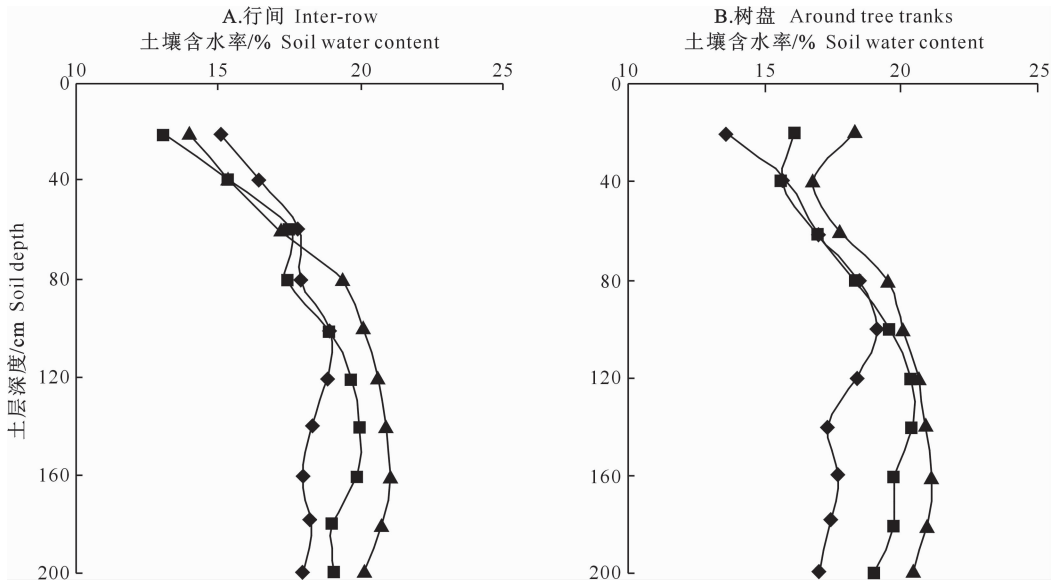


图 4 苹果膨果期不同水肥管理模式下 0~200 cm 土层土壤水分的分布

—◆—, 农户模式; —■—, 现有模式; —▲—, 创新模式

Fig. 4 Distribution of soil water content at soil profile of 0—200 cm under different treatments at fruit expanding stage

—◆—, Farmers mode; —■—, Existing mode; —▲—, Optimized mode

2.1.4 成熟期 到苹果成熟期,黄土高原地区的雨季已基本结束,此时期果实趋于成熟,生理蒸腾耗水减少,土壤水分得以逐渐恢复,使该时期末土壤水分含量达到一年中的最大值。

由图 5-A 可知,成熟期各处理土壤水分含量明显得到恢复。不同处理行间土壤含水率变化趋势总体相同,均表现为先减少后增加,含水率最小值位于 100 cm 土层处。0~60 cm 土层为生草和果树吸水区域,由于创新模式及现有模式果树产量大,消耗更多水分,故 0~60 cm 土层农户模式土壤含水率最高。在 100~200 cm 土层,3 种处理土壤含水率随着土层深度增加总体呈增大趋势,其中创新模式和现有模式土壤含水率高于农户模式。

由图 5-B 可知,3 种处理树盘土壤含水率分布与行间土壤相同,总体呈先减小后增大趋势,但变化幅度小于行间土壤,且水分下渗更多,土壤含水率峰值位于 120 cm 土层处。在 0~40 cm 土层农户模式

土壤含水率最高,在 80~200 cm 土层均表现为创新模式>现有模式>农户模式。

由图 5 可知,成熟期 0~200 cm 土层各处理的土壤平均含水率为 14.99%~24.37%,3 种处理平均土壤含水率顺序为创新模式(19.30%)>现有模式(18.99%)>农户模式(18.26%)。

2.2 不同水肥管理模式土壤贮水量的变化

不同生育期 3 种水分管理模式 0~200 cm 土层土壤贮水量的变化见表 2。由表 2 可知,2013 年 6—9 月苹果园土壤贮水量为 331.86~568.80 mm,各处理 0~200 cm 土层土壤平均贮水量从幼果期到成熟期的变化趋势一致,均表现为先上升后下降再上升,在整个试验期内行间和树盘 0~200 cm 土层土壤贮水量均表现为创新模式>现有模式>农户模式,且创新模式与其他处理差异总体达显著水平。

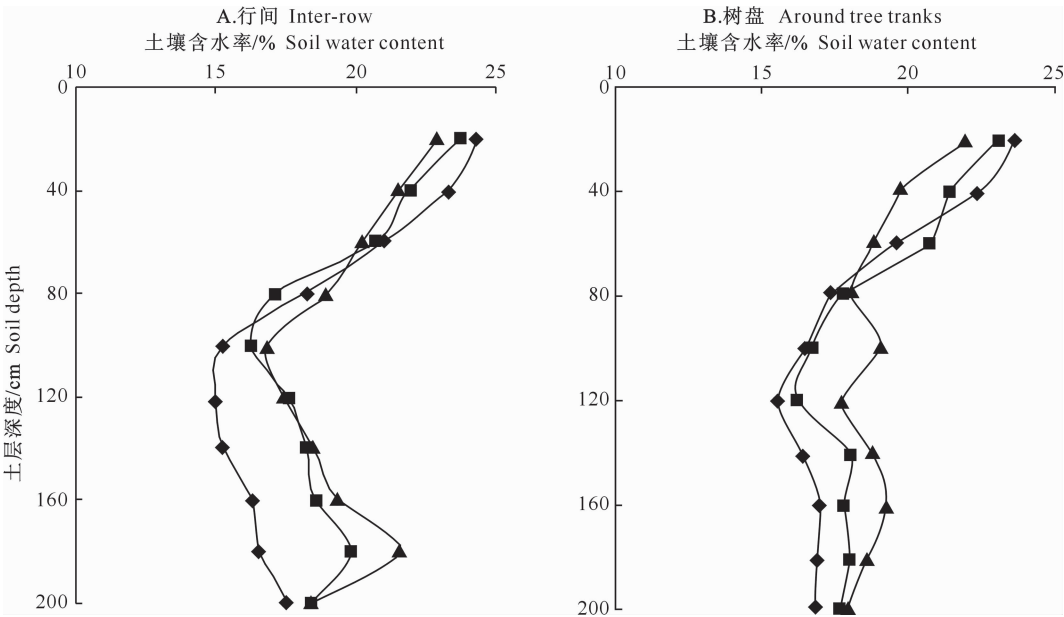


图 5 苹果成熟期不同水肥管理模式下 0~200 cm 土层土壤水分的分布
—◆—, 农户模式; —■—, 现有模式; —▲—, 创新模式

Fig. 5 Distribution of soil water content at soil profile of 0—200 cm under different treatments at maturing stage
—◆—, Farmers mode; —■—, Existing mode; —▲—, Optimized mode

表 2 苹果各生育期不同水肥管理模式下 0~200 cm 土层土壤贮水量的变化(2013-06-09)
Table 2 Soil water storage under different water and fertilizer managements from June to September 2013 in experimental area

生育期 Stage	行间贮水量 Soil water storage inter-row			树盘贮水量 Soil water storage around tree trunks			平均贮水量 Average soil water storage		
	农户模式 Farmers mode	现有模式 Existing mode	创新模式 Optimized mode	农户模式 Farmers mode	现有模式 Existing mode	创新模式 Optimized mode	农户模式 Farmers mode	现有模式 Existing mode	创新模式 Optimized mode
幼果期 Young fruit stage	331.86	361.54	386.27	348.68	356.49	384.79	340.27 a	359.02 b	385.53 c
膨果初期 Preliminary expanding stage	488.40	544.99	568.80	544.99	495.21	563.76	516.70 a	520.10 a	566.28 b
膨果期 Expanding stage	460.29	465.92	490.15	446.35	481.37	509.34	453.32 a	473.65 b	499.75 c
成熟期 Mature stage	475.84	499.59	508.47	474.02	487.05	493.48	474.93 a	493.32 b	500.97 b

注:同行数据后标不同小写字母者表示差异达显著水平($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters in each column indicate significant difference ($P<0.05$).

2.3 不同水肥管理模式下水果水分利用效率的变化

水分利用效率是衡量植物耗水量与物质生产量之间关系的重要参数,也是节水农业的重要指标^[19-20]。不同水肥管理模式后果树的产量及其水分利用效率见表 3。由表 3 可知,创新模式的果实产量为 42 645 kg/hm²,显著高于其他模式,分别比农

户模式和现有模式增加了 44.86%和 34.48%;农户模式的果实产量最低,仅为 29 438 kg/hm²。此外,创新模式生育期总耗水量最低,水分利用率最高,达到 100.69 kg/(mm·hm²),比农户模式和现有模式分别提高了 53.77%和 36.92%,且三者差异极显著。由以上分析可知,创新模式能显著提高苹果产量,降低蒸散量,提高水分利用率。

表 3 不同水肥管理模式苹果的产量及水分利用效率

Table 3 Yield and water use efficiency under different water and fertilizer managements

处理 Treatment	产量/(kg·hm ⁻²) Yield	生育期总耗水量/mm ET	水分利用效率/ (kg·mm ⁻¹ ·hm ⁻²) WUE
农户模式 Farmers mode	29 438 bA	449.57 aA	65.48 cC
现有模式 Existing mode	31 710 bA	431.19 bB	73.54 bB
创新模式 Optimized mode	42 645 aA	423.53 cB	100.69 aA

注:同列数据后标不同小写字母者表示差异显著($P<0.05$);标不同大写字母者表示差异极显著($P<0.01$)。
Note:Different lowercase letters in each column indicate significant difference ($P<0.05$);Different uppercase letters in each column indicate extremely significant difference ($P<0.01$).

3 讨 论

3.1 不同水肥条件对苹果园土壤水分含量的影响

有研究表明,生草覆盖处理在降水集中的月份表现出较强的贮集降水的作用^[21];地膜覆盖处理可有效减少土面蒸发,提高降水在土壤中的保蓄,苹果生长周期内土壤剖面平均含水率在地膜覆盖处理最高^[22]。胡实等^[23]研究表明,生草和秸秆覆盖处理能够提高桔园旱季土壤的贮水能力。本研究结果表明,在渭北旱塬无灌溉条件下,苹果各生育期,果园树盘覆盖地膜、行间种植生草、氮磷钾优化配比、配施有机肥等措施集成的创新水肥管理模式 0~200 cm 土层土壤平均含水率最高,且贮水量明显高于其他处理。原因可能是施用有机肥改善了土壤孔隙状况,促进水稳性团聚体的形成,从而提高土壤的蓄水性和持水能力;地膜覆盖改变了光辐射吸收转化和热量传导过程,降低了土壤接收的辐射能量,致使白天土壤表层的升温过程减缓,高温峰值降低,从而减少了土壤水分的蒸发;生草覆盖对果园表层土壤温度具有缓冲作用,在夏季可有效降低地温,减少地表水分蒸发,同时形成深松散蓄水层,使强降水产生了较少径流,而在雨量较大的时段又能起到较好的蓄水作用,在土壤深层能缓和土壤干燥化程度,最终提高土壤含水率,具有明显的蓄水保墒作用;叶面喷施抗蒸腾剂减少叶片蒸腾量,也减少了土壤水分的消耗量。但在 0~60 cm 土层土壤平均含水率以农户模式较高,这可能是生草在土壤表层存在与果树争水现象,同时由于创新模式和现有模式果树生长更加旺盛,产量较高,需要吸收更多的水分所致。

3.2 不同水肥条件对苹果产量及水分利用效率的影响

在有限的水资源条件下,利用适宜的生产技术提高水分利用率是提高当地农业生产效益,降低生产耗能的关键。有研究表明,覆膜、覆盖生草处理均能不同程度地降低土壤蒸发,并提高水分利用效

率^[22]。生草覆盖条件下有机无机肥料配施既能增强树势,又能提高产量和改善果实品质^[8,11]。施用有机肥能显著增加农作物水分利用效率,提高其增产潜力,高、中量有机肥处理的水分利用效率较低量有机肥处理显著增加,同时随有机肥施用年限的延长,土壤状况不再是影响作物水分利用效率提高的主要因子^[24-26]。通过优化水氮管理以及增加有机肥的投入不仅可以显著增加小麦产量,而且可以节约大量水资源^[27]。本研究结果表明,在渭北旱塬无灌溉条件下,苹果园采用创新水肥管理模式时水分利用效率最高可达到 100.69 kg/(mm·hm²),极显著高于农户模式和现有模式,同时增产效果显著,苹果产量较农户模式提高 44.86%,而且耗水量显著低于农户模式。这是由于水分利用效率是由产量和生育期耗水量决定的,创新模式合理的氮磷钾比例、追肥时间、配施有机肥等措施不仅增加了苹果产量,而且提高了土壤蓄水性和持水能力,减少生育期耗水量,从而提高水分利用效率。

4 结 论

本研究对渭北旱塬不同生育期 3 种水肥管理模式,苹果园行间和树盘 0~200 cm 土层土壤水分、贮水量及水分利用效率的变化进行了分析,得出以下结论。

- 1) 果园的 3 种水肥管理模式影响行间和树盘土壤水分剖面分布,0~200 cm 土层土壤平均含水率均为创新模式>现有模式>农户模式,在行间 0~60 cm 土层农户模式土壤含水率较高。
- 2) 在 2013 年 6—9 月,渭北旱塬苹果地 0~200 cm 土层土壤贮水量均经历一个先上升后下降再上升的过程,行间和树盘 0~200 cm 土层土壤贮水量在不同生育期均表现为创新模式>现有模式>农户模式。土壤贮水量的这种变化特性与降水量的时空变化、果园土壤的保蓄能力及地膜生草覆盖有关。
- 3) 3 种处理中,创新模式苹果产量最高,达

42 645 kg/hm²,分别比农户模式和现有模式增加了 44.86%和 34.48%;其水分利用效率最高为 100.69 kg/(mm·hm²),极显著高于农户模式和现有模式。

采用优化施用无机肥、行间覆草、树盘覆膜、结合有机肥的创新模式是果园应用较好的水肥管理模式,其不但显著提高了苹果产量,还能极显著提高水分利用效率,促进了旱地农业可持续发展。从生态环境和经济效益上看,这种集成模式的水肥管理措施可以在渭北旱塬苹果园生产中推广应用。

参考文献

- [1] Wu F Q, Liu H B, Sun B S, et al. Net primary production and nutrient cycling in an apple orchard-annual crop system in the Loess Plateau, China: A comparison of Qinguan apple, Fuji apple, corn and millet production subsystems [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2008, 81: 95-105.
- [2] 张雪阳, 朱海霞, 张会新. 陕西苹果产业发展现状与发展思路 [J]. *西北大学学报: 哲学社会科学版*, 2005, 35(1): 36-41. Zhang X Y, Zhu H X, Zhang H X. Present situation and developing thought of apple industry in Shaanxi [J]. *Journal of Northwest University: Philosophy and Social Sciences Edition*, 2005, 35(1): 36-41. (in Chinese)
- [3] 郑小春, 卢海蛟, 车金鑫, 等. 白水苹果产量及施肥现状调查 [J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2011, 39(9): 145-151, 158. Zheng X C, Lu H J, Che J X, et al. Investigation of present yield and fertilization on Fuji apple in Baishui county [J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2011, 39(9): 145-151, 158. (in Chinese)
- [4] 王小英, 同延安, 刘 芬, 等. 陕西省苹果施肥状况评价 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(1): 206-213. Wang X Y, Tong Y A, Liu F, 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. (in Chinese)
- [5] 黄明斌, 杨新民, 李玉山. 黄土区渭北旱塬苹果基地对区域水循环的影响 [J]. *地理学报*, 2001, 56(1): 7-13. Huang M B, Yang X M, Li Y S. Effect of apple base on regional water cycle in Weibei upland of the Loess Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(1): 7-13. (in Chinese)
- [6] 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 X Z, Yi H P, Li S T. 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)
- [7] Sirrine J R, Letourneau D K, Shennan C. Impacts of groundcover management systems on yield, leaf nutrients, weeds, and arthropods of tart cherry in Michigan, USA [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2008(125): 239-245.
- [8] 卢海蛟, 翟丙年, 刘玲玲, 等. 生草覆盖条件下不同施肥模式对红富士苹果生长发育、产量及品质的影响 [J]. *北方园艺*, 2012(10): 5-8. Lu H J, Zhai B N, Liu L L, et al. The effects of different fertilization pattern on growth, yield and quality of Fuji apple under grass cover in orchard [J]. *Northern Horticulture*, 2012(10): 5-8. (in Chinese)
- [9] 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 X L, Li H K, Zhang G J, et al. Effects of interplanting different herbage on soil moisture in apple orchards of Weibei Plateau [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2005, 20(3): 56-59. (in Chinese)
- [10] 高茂盛, 廖允成, 李 侠, 等. 不同覆盖方式对渭北旱作苹果园土壤贮水的影响 [J]. *中国农业科学*, 2010, 43(10): 2080-2087. Gao M S, Liao Y C, Li X, 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. (in Chinese)
- [11] 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 T T, Zhai B N, Li Y G, 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. (in Chinese)
- [12] 席瑞卿, 赵晓进, 张考学, 等. 不同施肥水平对苹果产量、品质及养分平衡的影响 [J]. *西北农业学报*, 2010, 19(2): 141-145. Xi R Q, Zhao X J, Zhang K X, et al. Effect of different fertilizing level on yield and quality and nutrient equilibrium of apple [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2010, 19(2): 141-145. (in Chinese)
- [13] 王晓娟, 贾志宽, 梁连友, 等. 旱地施有机肥对土壤水分和玉米经济效益影响 [J]. *农业工程学报*, 2012, 28(6): 144-149. Wang X J, Jia Z K, Liang L Y, et al. Effects of organic fertilizer application on soil moisture and economic returns of maize in dryland farming [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(6): 144-149. (in Chinese)
- [14] 苏 秦, 贾志宽, 韩清芳, 等. 宁南旱区有机培肥对土壤水分和作物生产力影响的研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(6): 1466-1469. Su Q, Jia Z K, Han Q F, et al. Effects of organic fertilization on soil moisture and crop productivity in semi-arid areas of southern Ningxia [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(6): 1466-1469. (in Chinese)
- [15] 王 军, 傅伯杰. 黄土丘陵小流域土地利用结构对土壤水分时空分布的影响 [J]. *地理学报*, 2000, 55(1): 84-91. Wang J, Fu B J. The impact of land use on spatial and temporal distribution of soil moisture on the Loess Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(1): 84-91. (in Chinese)

[16] Ridolfi Iturbe I. Eco-hydrology: A hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics [J]. *Water Resource Research*, 2000, 36(1): 1-9.

[17] 杨文治, 邵明安. 黄土高原土壤水分研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
Yang W Z, Shao M A. Study on water of soil on the Loess Plateau [M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese)

[18] 刘贤赵, 宋孝玉. 陕西渭北旱源苹果种植分区土壤水分特征研究 [J]. *干旱区地理*, 2004, 27(3): 320-326.
Liu X Z, Song X Y. Study on the characteristics of soil moisture content in the apple growing sub-regions of the Weibei dry highland in Shaanxi province [J]. *Arid Land Geography*, 2004, 27(3): 320-326. (in Chinese)

[19] 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(S1): 218-220.
Chen X, Ren S M, Yang P L, 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(S1): 218-220. (in Chinese)

[20] 刘国利, 何树斌, 杨惠敏. 紫花苜蓿水分利用效率对水分胁迫的响应及其机理 [J]. *草业学报*, 2009, 18(3): 207-213.
Liu G L, He S B, Yang H M. The responses and mechanisms of water use efficiency to different water stresses of three alfalfa varieties [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18(3): 207-213. (in Chinese)

[21] 赵政阳, 李会科. 黄土高原旱地苹果园生草对土壤水分的影响 [J]. *园艺学报*, 2006, 33(3): 481-484.
Zhao Z Y, Li H K. The effects of interplant different herbage on soil water in apple orchards in the area of Weibei Plateau [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2006, 33(3): 481-484. (in Chinese)

[22] 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 Y, Xie Y S. Effects of different patterns of surface mulching on soil hydrology in an apple orchard [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(2): 85-92. (in Chinese)

[23] 胡 实, 谢小立, 王凯荣. 覆被对桔园旱季土壤水分变化和利用的影响 [J]. *生态学报*, 2009, 29(2): 976-983.
Hu S, Xie X L, Wang K R. Effects of straw mulching and sodding culture on soil water use and variation in citrus orchard in dry season [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(2): 976-983. (in Chinese)

[24] 高茂盛, 温晓霞, 黄金辉, 等. 耕作方式和秸秆覆盖对渭北苹果园土壤保蓄水性能及酶活性的影响 [J]. *中国农业大学学报*, 2009, 14(4): 91-97.
Gao M S, Wen X X, Huang J H, et al. Effect of stubble mulch and tillage managements on apple orchard soil moisture reserves and soil enzyme activity in the Weibei Plateau [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2009, 14(4): 91-97. (in Chinese)

[25] 邢素丽, 刘孟朝, 徐明岗. 有机无机配施对太行山山前平原小麦产量和土壤培肥的影响 [J]. *华北农学报*, 2010(S1): 212-216.
Xing S L, Liu M C, Xu M G. The research of NPK fertilizer combined with soil organic manure enhancing soil fertilization in Taihang Piedmont Plain [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2010(S1): 212-216. (in Chinese)

[26] 劳秀荣, 孙伟红, 王 真, 等. 秸秆还田与化肥配合施用对土壤肥力的影响 [J]. *土壤学报*, 2003, 40(4): 618-623.
Lao X R, Sun W H, Wang Z, et al. Effect of matching use of straw and chemical fertilizer on soil fertility [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(4): 618-623. (in Chinese)

[27] 王明英, 翟丙年, 金忠宇, 等. 水肥优化管理对渭北旱塬冬小麦生长发育及产量的影响 [J]. *麦类作物学报*, 2013, 33(4): 705-710.
Wang M Y, Zhai B N, Jin Z Y, et al. Effects of optimized water and fertilizer management on the growth and yield of winter wheat in Weibei Dryland [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2013, 33(4): 705-710. (in Chinese)