

# 密度对苹果园产量和土壤水分利用影响的模拟

郭 正<sup>1</sup>, 李 军<sup>2</sup>, 张 玉 娇<sup>2</sup>, 曹 裕<sup>2</sup>, 张 丽 娜<sup>1</sup>, 范 鹏<sup>1</sup>

(1 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100; 2 西北农林科技大学 农学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:**以 1965—2009 年渭北旱塬洛川不同种植密度旱作苹果园地为研究对象,应用 WinEPIC 模型模拟,研究了密度对产量演变和深层土壤水分的动态变化规律。结果表明:各密度处理苹果园逐年产量呈现先增加后波动降低的趋势,种植密度越高,果园初期产量增长越快,后期由于土壤水分过耗量大,产量降幅变大。果园干旱胁迫日数波动趋势与降水量变化趋势相反,随着种植密度增大,干旱胁迫出现时间提早,干旱胁迫日数变大,0~15 m 逐年土壤有效含水量降低,土壤干层显现时间缩短,干层加深速度变快。综合考虑果园产量和土壤水分的可持续利用,建议渭北旱塬洛川旱作果园合理栽植密度为 833~1 000 株/hm<sup>2</sup>,适宜利用年限为 20~25 年。

**关键词:**苹果园地;密度;产量;土壤干燥化;WinEPIC 模型

**中图分类号:**S 152.7;S 661.106<sup>+</sup>.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2015)16-0027-07

黄土高原苹果生产基地建设起始于 20 世纪 80 年代,苹果种植规模从南向北逐年快速扩张,2003 年被农业部确立为优质苹果生产基地<sup>[1]</sup>。陕西洛川是渭北旱塬 30 个重点苹果基地县之一,苹果园地占总耕地面积的 77%,苹果种植是当地农村经济发展的绿色支柱产业<sup>[2]</sup>。然而,黄土高原 80%以上苹果园地为无灌溉条件的旱作果园,且苹果树根系分布较深、生长耗水强烈,旱作果园深层土壤水分过耗和土壤干燥化现象逐渐显现和加剧,土壤水分严重亏缺威胁着黄土高原苹果产业持续稳定发展<sup>[3-7]</sup>。黄土高原旱作苹果园地产量波动和土壤水肥胁迫逐渐成为研究热点,有关学者实地测定和分析了黄土高原旱作果园产量、土壤水肥利用特征及其时空变化规律<sup>[4,8-11]</sup>,但多集中于短周期田间观测试验,缺乏长周期定位试验连续监测研究。近年来,李军等<sup>[12,15]</sup>、王学春等<sup>[13-14]</sup>在黄土高原开展了 EPIC 模型模拟验证和模拟应用工作,研究揭示了黄土高原旱作粮田和人工林地水分生产力变化动态,也为果园水分生产力和土壤水肥效应研究提供了新思路。该研究应用 WinEPIC 模型定量模拟了洛川不同种植密度下苹果园

地水分生产力和深层土壤水分长周期变化动态,系统分析和揭示了旱作苹果园地在整个生长周期内果园产量和土壤干燥化演变规律,据此筛选出与当地降水量相适应的最佳果园栽植密度,以期对渭北旱塬苹果园地土壤水分可持续利用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

陕西省洛川县(东经 109°13'14"~109°45'47",北纬 35°26'29"~36°04'12")位于黄土高原苹果优势产区核心区域,地处渭北旱塬东北部,平均海拔 1 072 m,年均温度 9.2℃,年均降水量 600 mm,无霜期 167 d,雨热同季,属于暖温带半湿润大陆季风气候。洛川塬是黄土高原塬地面积较大和黄土覆盖层较厚的黄土残塬之一,塬区黄土层厚度超过百米,土壤为黏黑垆土,土壤质地均一。

### 1.2 WinEPIC 模型简介

环境政策综合气候模型 EPIC(Environmental Policy Integrated Climate),是由气象模拟、水文学、侵蚀泥沙、营养循环、农药残留、作物生长、土壤温度、土壤耕作、经济效益和作物环境控制等模块组成,包含了苹果树在内的 120 多种大田作物、草原牧草和森林树木的生长参数,能够以天为时间步长,定量模拟水土资源利用和作物生产力长周期动态变化过程,可用来评价农业生态系统管理策略和水土资源环境效应<sup>[16-17]</sup>。该研究采用的 WinEPIC 3060 版,是能够在 Windows 环境下运行的、用户界面友好的新一代 EPIC 模型。模型中土壤水分动力学过程描述比较细致,可以输出逐日分层土壤水分模拟结果,适用于作物生产系统的综合性分析研究,特别适

**第一作者简介:**郭正(1989-),男,硕士研究生,研究方向为旱作农业生态。E-mail:guozheng\_0115@126.com.

**责任作者:**李军(1964-),男,教授,博士生导师,现主要从事旱作农业生态及高效农作制度和数字农作技术等领域的研究工作。Email:junli@nwsuaf.edu.cn.

**基金项目:**陕西省农业科技创新与攻关资助项目(2015NY134);国家自然科学基金资助项目(31071374)。

**收稿日期:**2015-04-14

合于旱地土壤水分生态环境效应的模拟和分析。受论文篇幅限制,EPIC 模型中作物生产力形成和土壤水肥运转过程的数学模拟原理不再赘述,请参阅相关文献<sup>[18-19]</sup>。

1.3 模型数据库建立

WinEPIC 模型运行需要当地逐日气象要素、土壤剖面理化性状、作物生长参数和果园管理措施等数据集支撑。逐日气象数据来源于洛川气象站 1965—2009 年实时观测资料,主要包括逐日太阳辐射量、最高温度、最低温度、降水量、相对湿度、风速等气象要素数据;根据 EPIC 模型输入数据格式要求,将逐日气象要素数据导入模

型,建立洛川逐日气象数据库<sup>[20]</sup>。土壤理化性状数据主要包括洛川粘黑垆土 0~15 m 土层土壤剖面数据共 40 多项(表 1),来源于《中国土种志》、《陕西土壤》等土壤普查资料<sup>[21-22]</sup>,按照 EPIC 模型数据格式要求编入研究区域典型土壤参数数据库。果园 0~15 m 土层土壤质地比较均一,一般不存在其它异质土层。为了便于描述分析果园不同深度土壤水分变化动态,土壤剖面划分为 17 个土层,依次为 0~0.01、0.01~0.50、0.50~1.00、1.00 m 以下均是每隔 1.00 m 划分 1 个土层。通过查阅相关研究文献和黄土高原实际观测数据<sup>[23-24]</sup>,修订了 EPIC 模型中苹果部分重要生理生态参数(表 2)。

表 1 洛川黏黑垆土部分土层主要理化性状参数

Table 1 Some important physical and chemical parameters of Clay Heilu soil at Luochuan

土层编号 Layer number	土层深度 Soil depth /m	土壤容重 Bulk density /(g·cm <sup>-3</sup> )	凋萎湿度 Wilting moisture /(m·m <sup>-1</sup> )	田间持水量 Field capacity /(m·m <sup>-1</sup> )	有机氮含量 Organic nitrogen content /(mg·kg <sup>-1</sup> )	pH 值 pH value	有机质含量 Organic matter content /%	碳酸钙含量 Calcium carbonate content /(mg·kg <sup>-1</sup> )	磷浓度 Phosphorus content /(mg·kg <sup>-1</sup> )
1	0.01	1.18	0.10	0.31	350	8.1	0.75	4.4	3.0
2	0.50	1.23	0.10	0.29	380	8.1	0.90	1.5	3.0
3	1.00	1.33	0.10	0.30	360	8.1	0.91	1.4	3.2
4	2.00	1.35	0.10	0.30	370	8.2	0.85	1.03	3.2
5	3.00	1.43	0.11	0.32	380	8.2	0.83	11.3	3.0

表 2 WinEPIC 模型中苹果部分重要生长参数修订值

Table 2 Some important revised growth parameters of apple in WinEPIC model

参数 Parameter	全称 Full name	取值 Value	含义 Meaning
CPNM	Crop name	APPLE	作物名称
WA	Energy to biomass conversion factor	45.0	潜在生物量-能量比率(t·hm <sup>-2</sup> ·MJ <sup>-1</sup> )
HI	Harvest index	0.50	收获指数(通常取值 0.01~0.95)
TG	Optimal temperature for plant growth	22.0	作物生长最适温度(°C)
TB	Minimum temperature for plant growth	5.0	作物生长最低温度(°C)
DMLA	Maximum leaf area index	3.5	最大潜在叶面积系数
DLAI	Fraction of growing season when LAI starts to decline	0.99	播种至作物叶面积系数达到最大时占整个生长期的比率(通常取值 0.40~0.99)
RLAD	Leaf-area-index decline rate parameter	1.0	叶面积下降参数,1.00 代表线性(通常取值 0~10)
RBMD	Biomass-energy ratio decline rate	1.0	生物量-能量转换比率下降参数,1.00 代表线性(通常取值 0~10)
HMX	Maximum crop height	4.00	最大株高(m)
RDMX	Maximum root depth	10.00	最大根系分布深度(m)

1.4 模拟研究方法

该研究设置了 6 种果园栽植密度:D1 (500 株/hm<sup>2</sup>)、D2 (714 株/hm<sup>2</sup>)、D3 (833 株/hm<sup>2</sup>)、D4 (1 000 株/hm<sup>2</sup>)、D5 (1 143 株/hm<sup>2</sup>)和 D6 (1 250 株/hm<sup>2</sup>),其它管理措施与当地果园相同。果园土壤水分模拟从果树栽植当年开始,初始土壤水分条件是模型根据已输入土壤水分参数自动设置,一般取值为田间持水量的 75%。为了充分反映苹果园地土壤水分消耗和降水补充平衡状况,在模型输出的果园 0~15 m 土层土壤湿度逐日数据序列中,选择每月第 15 日数据代表果园该月土壤有效含水量特征,选择每年 11 月 1 日果园土壤湿度剖面分布数据来代表该年果园土壤湿度剖面分布特征。

1.5 模型模拟精度验证

为了评价 EPIC 模型对旱作苹果园地产量和土壤湿度模拟精度,该研究连续模拟了 1980—2009 年洛川苹果

园地逐年产量和土壤湿度,比较了果园产量模拟值和同龄果园产量观测值之间的差异,以及园地 2~10 m 土层土壤湿度模拟值和观测值之间的差异来评价 EPIC 模型对果园产量和深层土壤湿度的模拟精度(表 3)。其中产

表 3 果园产量和土壤湿度模拟值与观测值比较

Table 3 Comparison of simulated and observed yield and soil moisture of apple orchards

	果实产量 Fruit yield/(t·hm <sup>-2</sup> )		土壤湿度 Soil moisture/(m·m <sup>-1</sup> )	
	观测值 Observed	模拟值 Simulated	观测值 Observed	模拟值 Simulated
	Average			
平均值 Average	27.57	27.80	0.147	0.128
相对误差 RE/%		0.76		13.10
相关系数 Correlation index		0.940 **		0.937 **
均方根误差 RMSE		1.090		0.019
回归方程 Regression equation		y=0.989 3x		y=0.853 4x+0.037 8
决定系数 R <sup>2</sup>		0.824 8		0.877 7

量观测值来源于洛川苹果试验站对不同树龄果园调查所得产量统计数据,土壤湿度观测值为2010年洛川果园土壤湿度实地测定值。从表3可以看出,洛川苹果园地产量模拟值和观测值的相对误差为0.76%,均方根误差为1.09 t/hm<sup>2</sup>,相关系数为0.94,达到极显著差异水平;果园2~10 m土层土壤湿度模拟值和观测值相对误差

为13.10%,均方根误差为0.019 m/m,相关系数为0.937,呈极显著相关。图1中果园产量和土壤湿度的模拟值和观测值拟合线性回归方程后斜率接近1,同时 $R^2$ 表现出较强的相关性,表明经参数修订后的EPIC模型能较为准确的模拟渭北旱作苹果园地产量响应和深层土壤土壤湿度剖面特征。

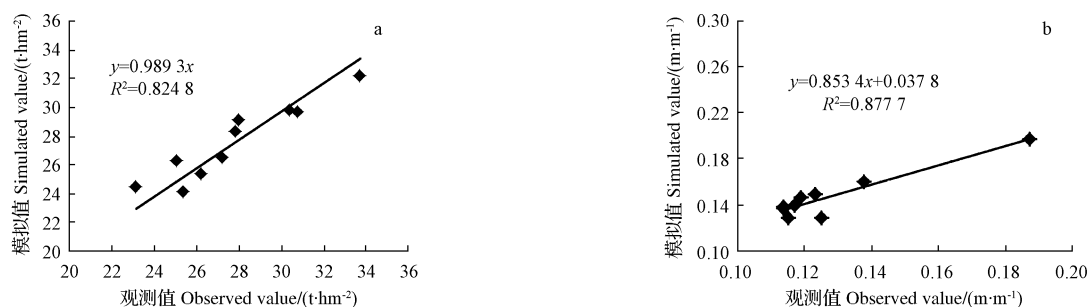


图1 果园产量(a)和土壤湿度(b)模拟值和观测值比较

Fig. 1 Comparison of simulated and observed yield and soil moisture of apple orchards

## 2 结果与分析

### 2.1 不同密度苹果园产量

在1968—2009年果树挂果期间(模型设置果树4年生时开始挂果),D1~D6密度处理下洛川4~45年生苹果园产量呈现先逐年升高后波动性降低的变化趋势(图2),其中前21年(1968—1988年)果园平均产量明显高于后21年(1989—2009年)。D1~D6处理4~45年生苹果园地产量平均值依次为26.00、27.05、28.11、28.89、26.91、25.79 t/hm<sup>2</sup>,以D4处理果园平均产量最高,达到28.89 t/hm<sup>2</sup>,前21年平均产量为36.84 t/hm<sup>2</sup>,后21年为20.95 t/hm<sup>2</sup>,较前半阶段减产43%。

在果园生长初期,果树栽植密度越高,果园产量越

高,但在维持较高产量水平后,高密度果园产量开始下降的时间越早、降幅越大,D1~D6密度处理产量开始明显下降的年份分别为1981、1980、1979、1977、1974和1974年。图2显示,在1968—1982年(4~18年生)期间,洛川各密度处理间苹果园地产量差异明显,从1988年(24年生)开始,不同密度处理果园产量基本接近,处理间差异逐渐减小,产量波动趋于一致。可见,高密度处理下旱作果园前期产量增长迅速,但随着土壤水分过度消耗,果园干旱胁迫加剧,果园产量下降时间较早,产量降幅较大,导致果园迅速衰败。低密度处理下果园产量波动性小,在生长中期产量高于高密度处理,但由于前期产量偏低,导致果园产量平均值较低。

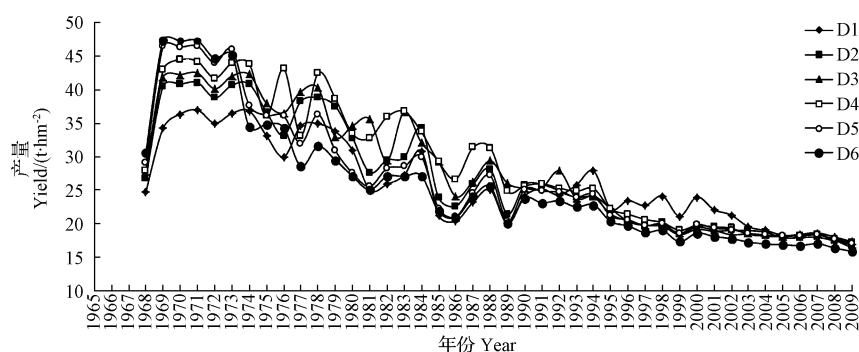


图2 不同密度苹果园地产量模拟值比较

Fig. 2 Comparison of simulated annual yield of apple orchards under different planting densities

### 2.2 不同密度苹果园降水量和干旱胁迫

在1965—2009年模拟研究期间,洛川45年年降水量介于343.50~899.00 mm,平均值596.64 mm,标准差117.17 mm,变异系数19.64%,年降水量整体呈现波动性降低趋势,后15年(1995—2009年)较前15年(1965—

1979年)年降水量平均值减少了44.53 mm。

干旱胁迫是指在水分亏缺条件下作物生长所受到的限制,在EPIC模型中用干旱胁迫日数来反映果树在生长季节中所遭受的干旱胁迫程度。在45年模拟研究期间,洛川6种密度处理苹果园地年干旱胁迫日数波动

趋势基本一致,在模拟生长初期,果园没有发生水分亏缺,干旱胁迫日数基本为零,中后期果园出现干旱胁迫,且年干旱胁迫日数逐年剧烈波动性增加,其波动趋势和降水量波动趋势相反(图3)。随着种植密度增加,果园年干旱胁迫日数明显增大,干旱胁迫出现时间提早。洛川 D1~D6 密度处理苹果园地分别于 1985 年(21 年生)、1980 年(16 年生)、1978 年(14 年生)、1977 年(13 年生)、

1975 年(11 年生)、1974 年(10 年生)出现干旱胁迫,年干旱胁迫日数平均值分别为 8.39、10.62、13.38、16.28、18.59、20.77 d,D6 密度处理果园 1986 年干旱胁迫日数最大,为 52.44 d,当年年降水量仅为 396.8 mm。低密度处理苹果园地干旱胁迫出现的时间均晚于高密度处理,并且遭受的干旱胁迫程度也明显低于高密度处理。

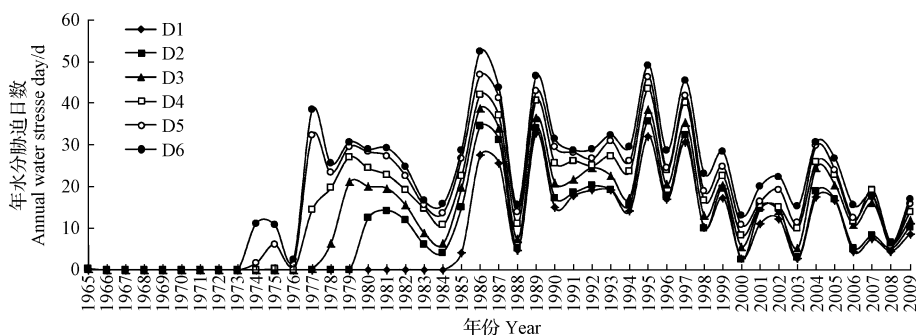


图3 不同密度苹果园干旱胁迫日数模拟值比较

Fig. 3 Comparison of simulated annual water stress days of apple orchards under different densities

### 2.3 不同密度苹果园 0~15 m 土层逐年土壤有效含水量

洛川不同密度处理果园 0~15 m 土层逐年土壤有效含水量模拟值变化趋势基本类似(图4)。在 1965—1967 年模拟生长初期,果树较小且尚未挂果,果树耗水较少,而降水量较高,果园土壤有效含水量呈现升高趋势;在 1968—1985 年果树旺盛生长时期,果园 0~15 m 土层土壤有效含水量显著降低,从 1968 年的 2 593~2 608 mm 降至 1986 年的 820~838 mm;在 1986—2009 年模拟生长后期,果园 0~15 m 土层土壤有效含水量维持在较低水平上发生季节性波动。渭北旱塬降水多集中在 7—9 月,故多数年份 7—9 月果园土壤有效含水量有所恢复。洛川 45 年期间,前 20 年(1965—1985 年)

D1~D6 密度处理果园平均土壤干燥化速率为 78.56、78.49、81.80、82.31、85.03、84.61 mm/年,0~15 m 土层土壤有效含水量平均值为 1 257.14、1 236.18、1 216.96、1 199.59、1 190.55、1 179.97 mm,表明随着种植密度增大,果园土壤有效含水量逐渐下降,土壤干燥化速率加快,干燥化程度加剧。在生长初期(1~4 年生)各密度处理差异不显著,中期(5~20 年生)各密度间土壤水分效应差异较为显著,而后期(21~45 年生)果园土壤干燥化加剧后,密度对土壤水分效应影响趋于缩小并消失,不同密度间果园逐年土壤有效含水量趋于一致。在 45 年模拟研究期间,洛川 6 种密度处理苹果园水分利用效率分别为 41.47、43.14、44.83、46.08、42.92、41.13  $t \cdot mm^{-1} \cdot hm^{-2}$ ,D3 和 D4 密度下果园的水分利用效率最优。

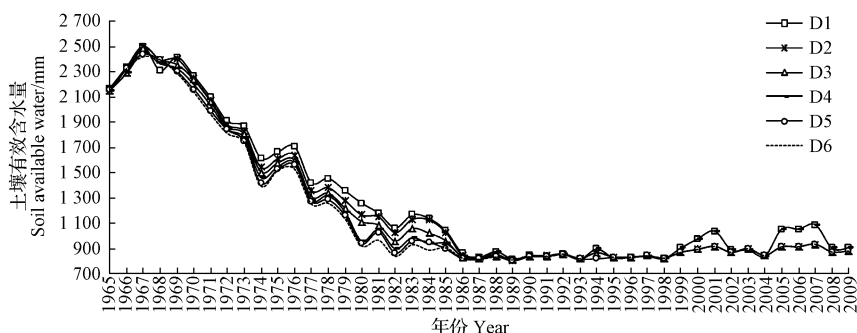


图4 不同密度苹果园 0~15 m 土层逐月土壤有效含水量模拟值比较

Fig. 4 Comparison of simulated monthly available soil water contents in 0~15 m soil layers of apple orchards under different densities

### 2.4 不同密度果园 0~15 m 土层湿度剖面分布

在 1965—2009 年模拟期间,D1~D6 密度处理果园 0~15 m 土层土壤湿度剖面分布模拟值逐年变化动态基

本相似。在果树生长初期,随树龄增长果树根系分布土层土壤湿度逐年降低,土壤干层开始出现并逐年加深和加厚,直到形成稳定的土壤干层(图5)。随着果树种植



密度增大,果园土壤干层出现时间提早,干层加深速度变快,达到最大干层分布深度的时间也较早,土壤干层最大分布深度可达 11 m。D1~D6 密度处理苹果园地出现稳定土壤干层的时间为 1978、1977、1977、1975、1973、1971 年,土壤干层分布深度达到 11 m 土层所需时间分别为 22、22、21、19、18、18 年。0~2 m 土层土壤湿度受降水入渗影响变幅较大,而 3 m 以下土壤湿度稳定不变,为稳定土壤干层。在土壤稳定干层形成后,

果园土壤剖面湿度的密度效应消失,果树对土壤水分利用深度达到最大,此时果树生长耗水主要靠当季降水供给。各密度处理果园土壤干层厚度效应差异在 22 年之前较为显著,22 年之后果园土壤干层厚度均超过 11 m,土壤湿度长期维持在凋萎湿度附近。从土壤干层形成和加深速度来看,低密度处理果园慢于高密度处理。

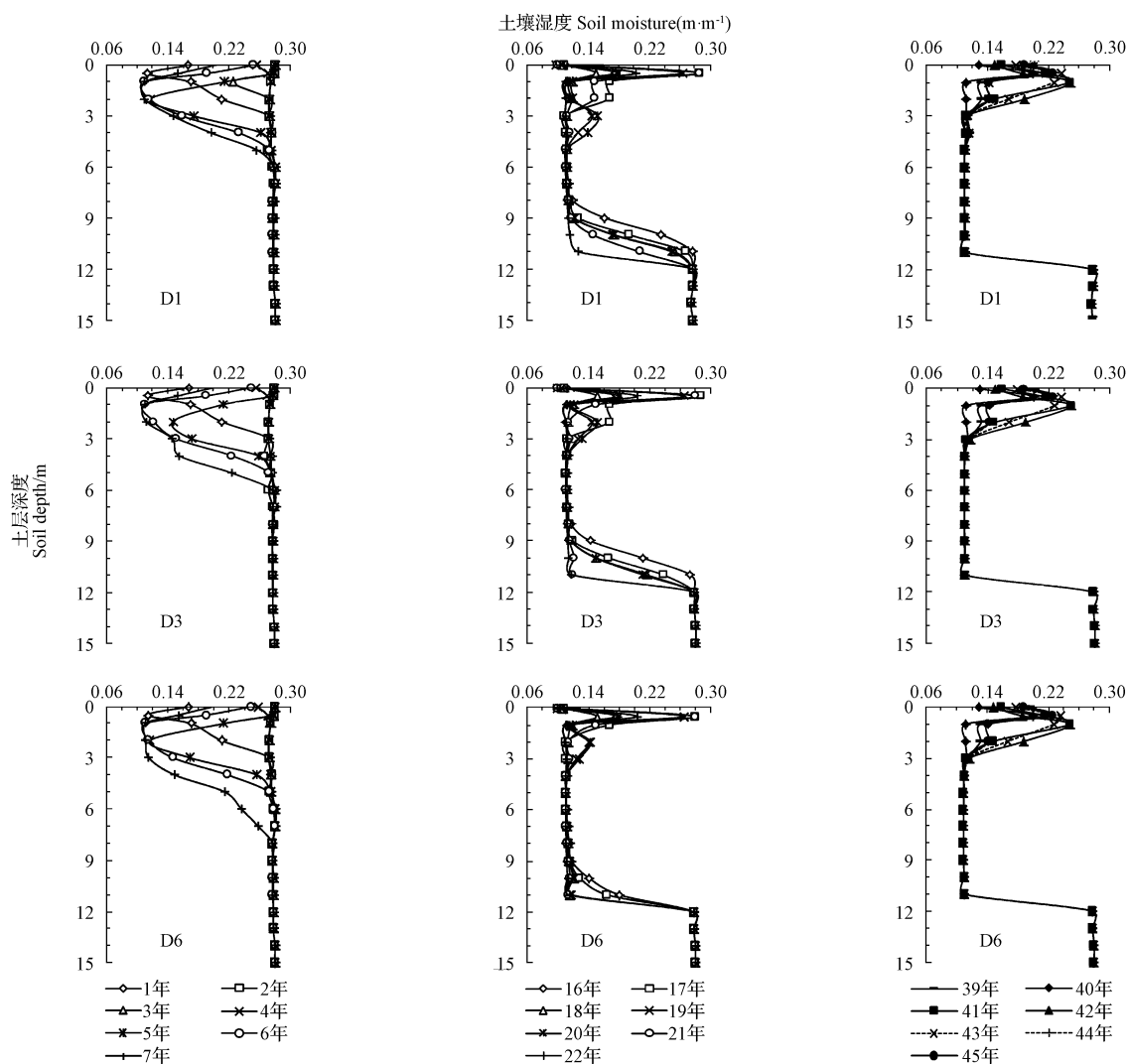


图 5 不同密度处理苹果园地 0~15 m 土层逐年土壤含水量剖面分布变化动态

Fig. 5 Simulated annual soil moisture profiles in 0~15 m soil layers of apple orchards under different densities

### 3 讨论与结论

黄土高原苹果园地土壤干燥化现象发生较为普遍<sup>[4-5,7,11]</sup>,随着黄土高原苹果种植面积持续增加,部分高龄果园面临更新换代,深层土壤干燥化问题日益凸显,势必影响区域土壤水循环,威胁到苹果生产基地长期稳定发展<sup>[25]</sup>。渭北旱塬属于暖温带半湿润大陆季风气候区,年均降水量只有 550~600 mm,80%以上果园多为无灌溉条件的雨养果园,因此水分就成为影响果园稳定

生产和发展的主要因素。在果园生长前期,幼树生长对土壤水分消耗少,果园耗水由降水和土壤贮水双重提供,足以满足果树生长耗水需要,该研究也发现此期间土壤无干旱胁迫和土壤干层发生,降水量对幼树影响不大。在果园进入盛果期后,果树旺盛生长导致强烈耗水,果园年耗水强度超过当地年降水量,导致果园土壤剖面湿度逐年降低,深层土壤干层逐渐形成,干旱胁迫也明显加剧,并且随着种植年限延长土壤干层厚度不断

加厚。在果树生长衰退期,深层土壤水库调节作用逐渐降低甚至消失,受土壤供水不足制约,果树耗水强度与降水补给强度达到基本平衡,果树生产能力逐渐下降,并长期维持在较低水平上,此时果园 0~2 m 土层土壤湿度随当季降水量发生变化,而深层土壤湿度则维持在凋萎湿度附近,不再随降水量发生变化,这与张义等<sup>[26]</sup>、王延平等<sup>[27]</sup>对黄土高原果园土壤水分研究结果一致。

黄土高原大多果园都是在 20 世纪 90 年代中期发展起来的,建园初期由于经验不足,栽植密度普遍偏高,果树树体高大且树冠交接,成龄果园郁闭严重,通风透光条件差,使得果品产量和质量不高,也加剧了深层土壤干燥化威胁,影响了黄土高原旱作苹果园地高产稳产。根据当地气候条件和地形条件合理配置密度,是旱地果园可持续发展的关键<sup>[28]</sup>。该研究模拟结果显示,在果园生长前期,随着种植密度增大,果园产量明显升高,但随树龄增长,高密度处理果园水分过耗量增大,导致果园干旱胁迫严重,土壤干层出现时间变早,产量下降时间也提早,下降幅度大,果园迅速衰落。因此,确定与当地降水量相适应的种植密度和果园合理利用年限,对旱作果园可持续发展和生态环境保护都具有重要意义。

模拟和果园实际生长条件仍存在着一定差异,如模拟中没有考虑到坡度和坡向等果园立地条件差异的影响,模型尚无法模拟疏花疏果、果树剪枝、果树间伐、果园种草或覆膜等果园管理措施对果园产量和土壤水分的影响。这些不足之处可能会导致模拟结果和果园实测值之间出现偏差,今后还需要进一步修订完善模型参数,以便进一步准确模拟果园水分生产力和深层土壤干燥化效应。

在 1965—2009 年模拟研究期间,各密度果园产量均呈现先升高后逐步降低趋势。种植密度越高,果园初期产量则越高,但后期产量下降幅度越大,果园年均产量为 D3~D4 密度下最大,分别为 28.11、28.89 t/hm<sup>2</sup>;干旱胁迫日数与降水量的变化趋势相反,随着果园密度的增加,干旱胁迫日数逐渐增大,干旱胁迫出现的时间变早,土壤逐年有效含水量也呈现明显的降低趋势,各密度土壤水分利用效率分别为 41.47、43.14、44.83、46.08、42.92、41.13 t·mm<sup>-1</sup>·hm<sup>-2</sup>,以 D3 和 D4 密度处理为最优。果园密度越高,土壤干层显现时间越早,干层加深速度越快,22 年生时各密度果园土壤干层厚度均超过 11 m。

从果园增产和土壤水分持续利用的角度综合分析,渭北旱塬洛川旱作果园种植密度以 833~1 000 株/hm<sup>2</sup> 为宜,果园适宜生长年限为 20~25 年。

#### 参考文献

[1] 王健,吴发启,孟秦倩.黄土高原丘陵沟壑区坡面果园的土壤水分特征分析[J].西北林学院学报,2006,21(5):65-68.

- [2] 史恒通,霍学喜,李写一.陕西洛川苹果产业发展状况调查[J].中国果树,2013(2):65-69.
- [3] 刘贤赵,宋孝玉.陕西渭北旱塬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.
- [4] 刘贤赵,李涛.渭北旱塬苹果基地土壤水分空间变异性研究[J].农业工程学报,2005,21(z1):33-38.
- [5] 邹养军,陈金星,马锋旺,等.渭北旱塬不同种植年限苹果园土壤水分的变化特征[J].干旱地区农业研究,2011,29(1):41-43,47.
- [6] 冉伟,谢永生,郝明德.黄土高原沟壑区不同种植年限果园土壤水分变化[J].西北农业学报,2008(4):229-233.
- [7] 殷淑燕,黄春长.黄土高原旱地果园土壤干燥化原因及其对策[J].干旱区资源与环境,2005,19(2):76-80.
- [8] 朱德兰,吴发启.黄土高原旱地果园土壤水分管理研究[J].水土保持研究,2004,11(1):40-42,115.
- [9] 刘建新.覆草对果园土壤肥力及苹果产量与品质的影响[J].干旱地区农业研究,2004,21(1):102-105.
- [10] 郝淑英,刘蝴蝶,牛俊玲,等.黄土高原区果园生草覆盖对土壤物理性状、水分及产量的影响[J].土壤肥料,2003(1):25-27.
- [11] 樊军,邵明安,郝明德,等.渭北旱塬苹果园土壤深层干燥化与硝酸盐累积[J].应用生态学报,2004,15(7):1213-1216.
- [12] 李军,王学春,邵明安,等.黄土高原 3 个不同降水量地点油松林地水分生产力与土壤干燥化效应模拟[J].林业科学,2010(11):25-35.
- [13] 王学春,李军,郝明德.施肥水平对冬小麦田土壤水分影响的模拟[J].农业工程学报,2008,24(9):38-43.
- [14] 王学春,李军,郝明德.施肥水平对长武旱塬地冬小麦产量影响的模拟[J].农业工程学报,2008,24(8):45-50.
- [15] 李军,王学春,邵明安,等.黄土高原不同密度刺槐(*Robinia pseudoacacia*)林地水分生产力与土壤干燥化效应模拟[J].生态学报,2008(7):3125-3142.
- [16] WILLIAMS J R. The EPIC model [M]. USA:Blackland Research Center, the Texas A & M University, 1995.
- [17] WILLIAMS J R, DYKE P T, FUCHS W W, et al. EPIC erosion/productivity impact calculator; 2. user manual [M]. USA: Agriculture Technical Bulletin No. 1768, 1990.
- [18] 李军,邵明安,张兴昌. EPIC 模型中农田水分运移与利用的数学模拟[J].干旱地区农业研究,2004,22(2):72-75.
- [19] 李军,邵明安,张兴昌,等. EPIC 模型中作物生长和产量形成的数学模拟[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2004,32(增刊):25-30.
- [20] 李军,邵明安,张兴昌.黄土高原地区 EPIC 模型数据库组建[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2004(8):21-26.
- [21] 全国土壤普查办公室.中国土志[M].北京:中国农业出版社,1995.
- [22] 陕西省土壤普查办公室.陕西土壤[M].北京:科学出版社,1992.
- [23] 曹裕,李军,张社红,等.黄土高原苹果园深层土壤干燥化特征[J].农业工程学报,2012,28(15):72-79.
- [24] 陆秋龙.中国果树志(苹果卷)[M].北京:中国林业出版社,1999.
- [25] 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(1):7-13.
- [26] 张义,谢永生,郝明德,等.黄土高原沟壑区塬面苹果园土壤水分特征分析[J].土壤,2011,43(2):293-298.
- [27] 王延平,韩明玉,张林森,等.陕西黄土高原苹果园土壤水分分异特征[J].林业科学,2013(7):16-25.
- [28] 李玉山.黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究[J].自然资源学报,2001,16(5):427-432.

DOI:10.11937/bfyy.201516007

# 杏净光合速率与相关生理生态参数的灰色关联分析

孙 猛<sup>1</sup>, 吕德国<sup>2</sup>, 刘威生<sup>1</sup>, 孙绍春<sup>1</sup>

(1. 辽宁省果树科学研究所, 辽宁 熊岳 115009; 2. 沈阳农业大学 园艺学院, 辽宁 沈阳 110161)

**摘 要:**运用灰色系统理论,分析了干旱处理与正常管理下“沙金红”、“玛瑙”和“山杏”净光合速率(Pn)与气孔导度(Gs)、胞间CO<sub>2</sub>浓度(Ci)、蒸腾速率(Tr)、叶片温度(Tleaf)、大气CO<sub>2</sub>浓度(Ca)、水分含量(H<sub>2</sub>O)、空气相对湿度(RH)、光合有效辐射(PAR)等主要生理生态参数的灰色关联系数及关联度,明确了干旱处理与正常管理下影响杏净光合速率各生态因子的主次关系。结果表明:正常管理下影响杏净光合速率最大的分别是蒸腾速率、光合有效辐射和叶片温度,干旱处理下影响杏净光合速率最大的分别是CO<sub>2</sub>浓度、气孔导度和叶片温度,而且不同品种影响其净光合速率的生态因子主次关系不同,同一品种在不同栽培环境条件下影响其净光合速率的生态因子主次关系也不同,生产上应针对不同品种、不同发育阶段制定相应的配套栽培措施。

**关键词:**杏;干旱;灰色关联分析;净光合速率

**中图分类号:**S 662.2 **文献标识码:**B **文章编号:**1001-0009(2015)16-0033-03

杏(*Armeniaca* Mill.)属蔷薇科(Rosaceae)李亚科(Prunoideae)杏属(*Armeniaca*)植物,是起源于中亚地区

**第一作者简介:**孙猛(1979-),男,硕士,助理研究员,现主要从事果树栽培生理等研究工作。E-mail:tianf1979@163.com.

**收稿日期:**2015-03-25

的一种古老的温带落叶果树,广泛分布于我国的“三北”地区,是该地区的主要经济林树种之一。光合作用是影响果树产量和品质的决定性因素,其过程对环境条件变化十分敏感<sup>[1]</sup>。现运用灰色系统理论,分析了干旱处理与正常管理下杏叶片净光合速率与其相关生理、生态因子的相互关系,旨在找出各影响因子间的主次关系,以

## Simulation of Water Productivity and Soil Water Use of Different Planting Density Apple Orchard

GUO Zheng<sup>1</sup>, LI Jun<sup>2</sup>, ZHANG Yujiao<sup>2</sup>, CAO Yu<sup>2</sup>, ZHANG Lina<sup>1</sup>, FAN Peng<sup>1</sup>

(1. College of Forestry, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100; 2. College of Agronomy, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100)

**Abstract:** Taking apple orchards under six different planting density treatments during 1965—2009 at Luochuan as research object. The WinEPIC model was used to simulated the dynamic changes of water productivity and deep soil desiccation of apple orchards. The results showed that simulated annual apple yield of different density apple orchards increased in the early growth stage and then decreased with fluctuation in Luochuan. The higher planting density, the higher annual yield was obtained at early growth stage, but the yield at late growth stage was decreased more for excessive consumption of soil water. Water stress days of apple orchards showed a growth trend which was opposed to the change trend of annual rainfall. With planting density increasing, water stress occurred earlier and water stress days got larger, simulated annual available soil water amounts in 0—15 m soil layer of apple orchards decreased. The higher planting destiny of treatment had, the faster increasing rate of desiccated soil layer depth could have and the earlier time for desiccated soil layer occurred as well. To summarize, taking yield and sustainable utilization of soil water into consideration, it suggested the suitable planting densities of apple orchards was 833—1 000 plants/hm<sup>2</sup> and reasonable years for soil water sustainable use was 20—25 years in Luochuan.

**Keywords:** apple orchard; planting density; yield; soil desiccation; WinEPIC model