

农林复合系统水分生态特征的模拟研究

张劲松, 孟 平

(中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091)

摘要:根据验证后的太行山低山丘陵区苹果-小麦复合系统及单作小麦系统 SPAC 水分运移模型, 模拟计算小麦拔节-腊熟期间复合系统和单作系统蒸腾、根系吸水和土壤水分的时空变化值, 继而分析复合系统水分生态特征, 旨在为该地区发展果农复合模式提供一定的理论依据, 并以期进一步丰富复合农林业水分生态理论研究内容。结果表明: (1) 对比单作小麦系统, 复合系统具有明显的小麦蒸腾需水及耗水降低效应, 其值分别可达 18.0% 和 16.8%; 实际区域面积上, 复合系统中作物和果树蒸腾耗水量的比值为 1.7, 说明小麦耗水是复合系统耗水的主要特征方式。(2) 分布林带区和作物区的果树吸水量分别约占系统内果树吸水总量的 47.6% 和 52.4%, 说明果树所消耗的土壤水分至少有 50% 以上来自作物区内; 在作物与果树根系的交错区内, 作物吸水量与果树吸水量的比值达 82.0:1, 因此, 小麦在与果树根系吸水的直接竞争过程中, 将处绝对主导地位。(3) 小麦拔节-腊熟期间各时段内, 复合系统中 0~80cm 土层贮水量随带距的变化均大致呈抛物线状分布, 对比单作小麦系统, 复合系统土壤水分总体平均效应 2.7%。

关键词:农林复合系统; 水分生态特征; 模拟研究

Simulation on water ecological characteristics of agroforestry in the hilly area of Taihang Mountain

ZHANG Jin-Song, MENG Ping (Research Institute of Forestry, CAF, Beijing 100091). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(6): 1172~1177.

Abstract: Based on the well-verified models on water transfer in SPAC of Apple-wheat intercropping and wheat monoculture (as control) system in the hilly region of Taihang Mountain, simulation of spatial and temporal variation of transpiration, water uptake by roots and soil water content during the period of from wheat jointing to wax ripeness was conducted for both the intercropping and monoculture system. The water ecology of the intercropping was then characterized by quantitative analysis. This study was intended to provide theoretical basis for developing fruit tree-crop intercropping in the region. Results showed that: (1) The intercropping significantly reduced potential and actual transpiration of wheat by 18.0% and 16.8% compared with monoculture system respectively. The average wheat to apple tree ratio of actual transpiration was 1.7 in actual area of the intercropping, indicating that water consumption of the intercropping were dominated by wheat transpiration; (2) The water uptake by apple-tree roots in the apple zone and the wheat zone counted for respectively 47.6% and 52.4% of the total water uptake by tree roots. The wheat to tree ratio of water uptake by roots was 82.0 in area where occur roots of trees and crops, indicating that the wheat was dominant absolutely in competing for water with apple directly. (3) The soil water content at the depth of 0~80cm varied with the distance from the tree row in a parabola trend in the intercropping, reflecting an average increase of water content by 2.7% compared with the monoculture system.

Key words: agroforestry system; water ecological characteristics; simulation

文章编号: 1000-0933(2004)06-01172-06 中图分类号: S157, S718.5 文献标识码: A

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(39770624); 国家“九五”科技攻关专题资助项目(96-007-04-05)

收稿日期: 2003-12-25; 修订日期: 2003-04-30

作者简介: 张劲松(1968~), 浙江人, 博士, 副研究员, 主要从事复合农林业、农业气象研究。E-mail: zhangjs@forestry.ac.cn

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 39770624); the National “Ninth Five-year” Key Project of Science and Technology (No. 96-007-04-05)

Received date: 2003-12-25; Accepted date: 2004-04-30

Biography: ZHANG Jin-Song, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in agroforestry and agricultural meteorology. E-mail: zhangjs@forestry.ac.cn

农林复合系统(Agroforestry)又可称复合农林业,既是一种传统而又新型的土地利用方式,也是一门新兴的交叉性及边缘性学科。最近 10 年来,随着“人口剧增、食短缺、资源危机、环境恶化”等全球性问题的日益严峻,农林复合系统不仅受到众多发展中国家和地区的普遍关注和高度重视,而且一些发达国家,如美国、英国、澳大利亚等也都非常重视农林复合系统的研究^[1~7]。水分生态特征问题一直是水资源紧缺地区农林复合系统的重要研究内容之一,主要涉及蒸腾耗水、土壤水分、根系吸水等水分生态因子的时空变化规律、影响机理及其与单作作物系统的差异特征等问题。由于蒸腾耗水、根系吸水和土壤水分的运动变化是 3 个十分复杂的、互为耦合的物理过程和生理过程。因此,要想清楚阐明复合系统的水分生态特征问题,必须全面考虑植物、大气和土壤的综合作用。近些年来兴起的土壤-植物-大气连续体(SPAC)水分运移理论及综合模拟模型,可为上述问题的研究提供可行性途径。但因农林复合系统结构的特殊性和各类物理、生物参数的处理更加复杂性,基于 SPAC 水分运移理论及模拟模型,系统地模拟研究水分生态特征问题,至今未见有详尽的文献报道。

复合农林业是太行山林业生态工程建设的重要内容之一,果农复合模式是其中一大主要类型。但该地区大多地处半干旱气候带区,且土层薄瘠,土壤保水能力差,水分紧缺本已是限制农业与林业发展的主要生态因子。因此,若将根深叶茂而大量蒸腾耗水的果树引入原本单作的农田生态系统,所产生的“农林争水”与“水分胁迫”等不可回避的负效应,极有可能导致农田土壤更加干旱以至恶化整个农田生态环境。因此,如何科学地选择节水型间作模式,如何优化灌溉方案、加强水分集约管理,是该地区发展果农复合模式亟待解决的主要配套技术,为此,需对果农复合系统本身的水分生态特征进行系统的、定量的研究,以能取得理论依据。所以,水分生态特征问题的研究对该地区农林复合经营具有更加重要的理论指导意义。本文将根据验证后的苹果-小麦复合系统及单作小麦系统 SPAC 水分运移模拟模型,模拟计算复合系统及单作系统蒸腾耗水、根系吸水和土壤水分等水分因子,继而分析太行山低山丘陵区复合系统水分生态特性,旨在为该地区发展果农复合模式提供一定的理论依据,并以期进一步丰富复合农林业水分生态理论研究内容。

1 试验区概况及研究对象

试验地设在河南省济源市裴村“太行山低山丘陵区复合农林业综合研究”试验区内(35°11'N, 112°03'E)。试验区内各类农林复合模式总面积达 160hm²,其最主要模式为果农间作,约占 60%。试验区地处太行山南段南麓。温带大陆性季风气候,全年日照时数为 2367.7h,年日照率为 54%,历年平均降水量 641.7mm,6~9 月份多年平均降水量为 438.0mm,占全年 68.3%,并主要集中在 7~8 月份,占全年的 44.3%。试验区土壤以石灰岩风化母质淋溶性褐土为主,土层厚度为 50~80cm;pH 值为 6.8~8.5;石砾含量为 10%~18%,有机质含量在 1.0%左右,速效氮 21.4~80 mg/kg;速效磷 5.4~16 mg/kg,速效钾 50~103mg/kg。

本研究的具体对象为水平梯田条件下的苹果-小麦复合系统内进行。梯田南北宽 36m,东西长 200m。土壤质地:沙壤-轻壤,土层厚度为 80cm,面积为 0.72hm²,有灌溉条件。苹果树栽植于 1992 年,品种为新红星(*Starkrimson*)。果树带行向为东西行,树盘直径为 80cm,株高 2.1m,南北冠幅 1.4m;冬小麦行距 20cm,品种:“温 8”号,播种期:1997 年 9 月 25 日,基本苗 248.0 万株/hm²。模拟研究时期:1998 年冬小麦拔节期~腊熟期(4 月 1 日~6 月 2 日)。

2 模型简介^[8]

在复合系统的中部选择一代表性较好的间作通道,将果树行带-农田剖面简化为立体面处理,如图 1 所示。由于立地条件为水平梯田,故研究时忽略了地表径流,并假设果树行带方向(即 y 方向)土壤物理属性、生物属性及小气候属性具有均一性,并忽略土壤温度对土壤水分运动的影响。取北侧果树带中心($x=0$)至南侧果树带中心($x=Lx$)为计算区域(L 为带距,即林带行距)。模拟模型如下:

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(h)}{\partial z} - SWCR(x, z, t) - SWTR(x, z, t) \quad (1)$$

式中, C 为比水容重; h 为土壤水势; K 为非饱和导水率; t 为时间值; Z 为土层深度, X 为果树带距; $SWCR$ 、 $SWTR$ 分别为作物、果树根系吸水量,分别采用 Silem 及 Delong 吸水函数形式,其计算模式如下:

$$SWCR(x, z, t) = k_s \frac{TRCR_p(t) \times RDCR(x, z, t) \times K(h)}{\int_0^{Lz} RDCR(x, z, t) \times k(h) dz} \quad (2)$$

$$SWTR(x, z, t) = k_s \frac{TRTR_p(t) \times RDTR(x, z, t)}{\int_0^{Lx} \int_0^{Lz} RDTR(x, z, t) dz dx} \quad (3)$$

式中, $TRCR_p$ 、 $TRTR_p$ 分别为作物和果树潜在蒸腾量,其建立过程分别可见参考文献^[9,10]。 $RDCR$ 、 $RDTR$ 分别为作物和果树吸收根根长密度,其分布模式参见文献^[11,12]; Lz 为根区深度; k_s 为土壤水分胁迫系数,与 $TRCR_p$ 、 $TRTR_p$ 的乘积可分别作物和果树实际蒸腾量。

模型(1)的求解采用数值计算法,本研究中的土壤水分流动具有二维性质,为此,差分格式采用交替隐式差分(ADI),并采用迭代法进行线性化处理,前后两次迭代相对误差最大值取 0.01,采用追赶法求解所形成的线性化方程组。具体求解过程并采用实测土壤容积含水量对模型进行验证。结果表明,168 对模拟值与实测值相对误差的平均值为 6.89%,最大值为 16.19%,最小值为 0.09%,线性相关系数 r 可达 0.8367($n=168$), $t=0.197 < t_{0.01}^{334}=2.568$,说明模拟值与实测值无显著性差异。由于土壤水分运移、植物蒸腾耗水与根系吸水本就是互为耦合的水分传输过程,所以,土壤水分的验证结果完全可以间接地验证了根系吸水模型和蒸腾模型的合理性。因此,可以利用所建立的模型,模拟计算复合系统中作物与果树的日蒸腾耗水、根系吸水量和土壤水分的时空变化量。模型的具体建立及验证过程可见文献^[8]。单作作物系统 SPAC 水分运移模型可被视为复合系统模型的简化式。

3 模型的应用及水分生态特征分析

采用所建立的复合系统及单作系统 SPAC 水分运移模拟模型,模拟计算复合系统及单作系统蒸腾耗水、根系吸水和土壤水分等水分因子,继而分析复合系统的水分生态特征。为便于分析,将距南北果树带各 0、40、80、120、160cm 及间作中心处分别记为“S0”、“S40”、“S80”、“S120”、“S160”、“N0”、“N40”、“N80”、“N120”、“N160”及“SN200”。

3.1 复合系统蒸腾总量及小麦与果树所占比例的比例关系

计算表明,1998 年 4 月 1 日~6 月 4 日期间(小麦拔节~腊熟期),苹果-小麦复合系统中小麦和果树潜在蒸腾需水量的日平均分别为 1.9 mm/d、4.6mm/d,二者比例为 0.4 : 1;实际蒸腾耗水量的日平均值分别为 1.7 mm/d、3.9 mm/d,二者比例为 0.4 : 1,即:在单位面积上,无论是潜在蒸腾需水量,还是实际蒸腾耗水量,均为小麦低于果树,分别低 59.96%和 57.0%。作物蒸腾需水或耗水低于果树,是由作物与果树自身生理生态特性的差异所决定的。

试验区域面积上(总面积 7200m²,其中:小麦种植面积 5760m²、果树用地 1440m²),1998 年 4 月 1 日~6 月 4 日期间,复合系统总蒸腾需水量(果树与作物潜在蒸腾量之和)为 1125.1m³,其中小麦占 61.6%,为 692.6m³,果树占 38.4%,为 432.4m³,二者比值为 1.6 : 1;总蒸腾耗水量(果树与作物实际蒸腾量之和)为 1000.6m³,小麦和果树各占 63.2%和 36.8%,分别为 632.7m³、367.8m³,二者比值为 1.7 : 1。因此,从实际区域面积上作物与果树的蒸腾比值而言,作物蒸腾是复合系统潜在需水或实际耗水的主要特征方式,所以从合理利用水资源角度而言,在太行山低山丘陵区发展果农复合经营是可行的。

3.2 小麦与果树根系吸水时空分布特征及二者间比例关系

3.2.1 小麦根系吸水量时空分布特征 在水平方向上,复合系统中小麦根系吸水量在拔节~腊熟期间具有明显的极值点,最小值点在成熟期之前一直位于 N40 带距处,但最大值点随生育期的变化而变动(见图 2)。就拔节~腊熟期(见图 3)全生时段总

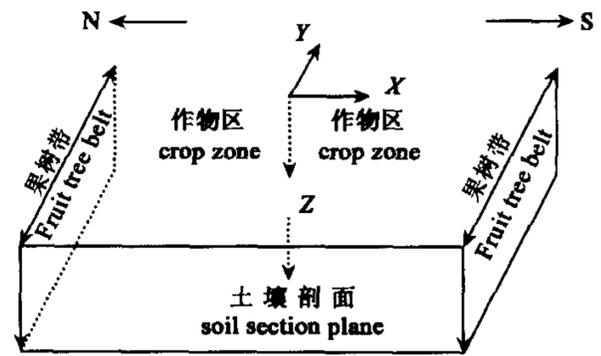


图 1 果树行带-农田剖面示意图

Fig. 1 Sketch map of section plant of farmland-fruit tree belt

Fig. 1 Sketch map of section plant of farmland-fruit tree belt

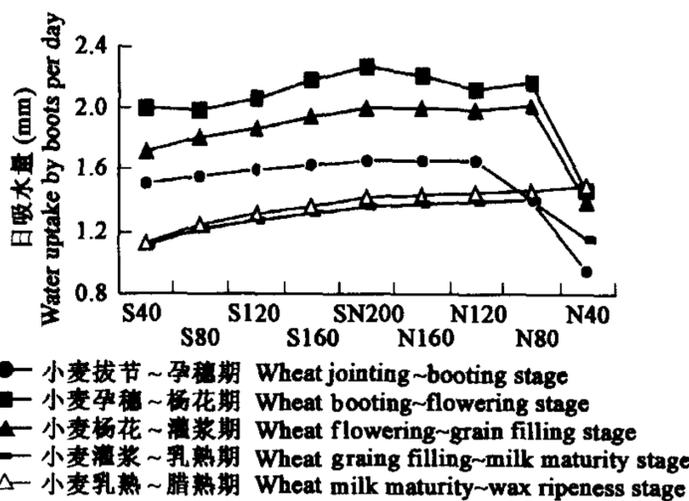


图 2 不同时期复合系统小麦根系日吸水量水平分布特征

Fig. 2 Horizontal distribution of water uptake by wheat roots in the inter-cropping per day in different stage

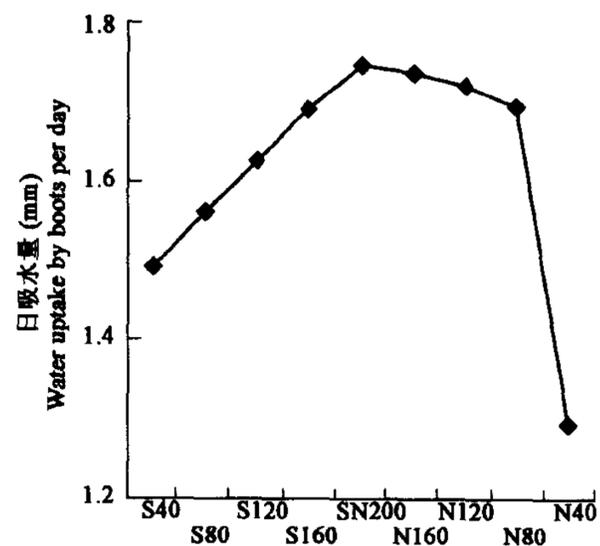


图 3 各时期复合系统小麦根系吸水量总体平均水平分布特征

Fig. 3 Horizontal distribution of the average of water uptake by wheat roots in the inter-cropping per day in all stages

体平均而言,吸水量的水平分布特征尤为明显,总趋势是“两侧小、中间大”,即随带距的变化,大致呈开口向下的抛物线状分布,最大值和最小值分别在间作中心(南北带距各 200cm 处)、N40。经计算,拔节-腊熟期间,S40~N40 范围内根系吸水量平均值为 1.6mm/d,SN200 和 N40 处的吸水量分别为 1.9 mm/d、1.3mm/d,分别比平均值高 7.9 %和低 20.0%。

3.2.2 果树根系吸水量时空分布特征 水平方向上,小麦拔节~腊熟期各时段内,果树吸水量在水平方向上均具有明显的差异性分布特征(图 4),最大值在 0~40cm 带距范围内,最小值在 160~200cm 带距范围内。经计算小麦拔节-腊熟全时段内,果树在 S0~N0 范围内吸水总量为 289.36mm,其中分布在林带区(S0~S40、N40~N0)的为 137.78mm,日均 2.1197mm,占总量的 47.6%,分布在作物区(S40~N40)为 151.58mm,占总量的 52.4%,二者比例为 0.9,说明:果树所消耗的土壤水分至少有 50%以上来自作物区内。

在作物区的果树吸水量,主要来自 40~120cm 带距围内,约占作物区内的 74.%,吸水总量的 38.8%,160~200cm 范围内吸水量相对最低,仅占作物区内的 7.3%和总量的 3.8%。因此,从果树吸水的水平分布特征而言,40~120cm 带距范围将是果树与作物根系吸水的主要交织区,即水分竞争的主要区域。

3.2.3 作物与果树根系吸水比例 计算表明:在作物区内作物与果树根系水量的比值为 251.6,即小麦吸水量远远大于果树吸水量。所以,尽管果树根系吸水量有 50%左右来自作物区内,但在作物区内小麦与果树吸水竞争过程中,小麦将处绝对主导地位,小麦吸水将是复合系统作物区内土壤水分减少的主要方式。

由小麦根系吸水量时空分布特征可知,40~120cm 带距范围将是果树与作物根系吸水的主要交织区,即水分竞争的主要区域。经计算:该区域内作物与果树根系水量的比值为 82.0,因此,如若不考虑林带区果树吸水作用可能导致周边土壤水分侧向移至林带区,致使作物区土壤水分减少的间接效应。那么,即使在果树与作物吸水竞争区域内,小麦吸水仍将是根系吸水的最主要方式,即:果农根系吸水的直接竞争过程中,小麦将处主导地位。

3.3 土壤水分时空分布特征及土壤水分效应

3.3.1 不同时期时空分布特征 土壤含水量模拟结果分析表明(图 5),小麦拔节~腊熟期各时段内,果农复合系统中 0~80cm 土层贮水量随带距的变化趋势大致均呈抛物线状分布,回归分析表明,全时段内 0~80cm 土层时段平均贮水量(W)和带距(X)之间具有很好的相关关系,相关系数 $r = \pm 0.9599$,关系表达式如下:

$$W(X) = - 3 \times 10^{-4} X^2 + 0.1065 X + 146.45 \quad 0 = < X > = 400 \tag{4}$$

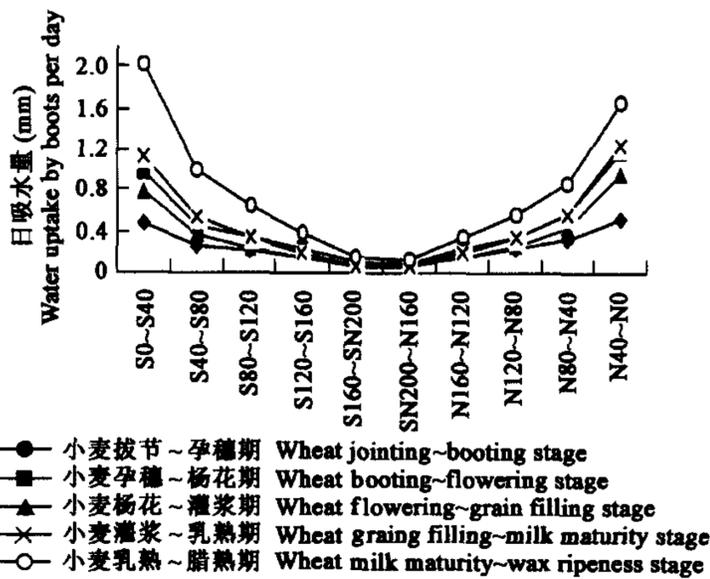


图 4 复合系统果树根系日吸水量水平分布特征

Fig. 4 Horizontal distribution of water uptake by apple tree root in the inter-cropping per day

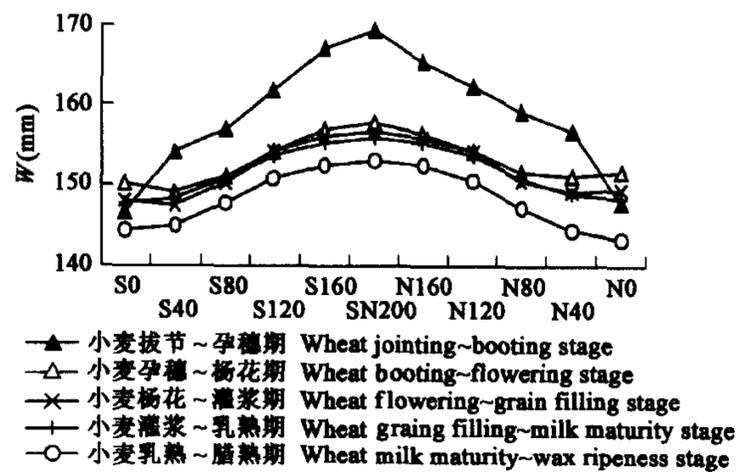


图 5 复合系统不同时期的 0~80cm 土层土壤贮水量(W)的水平分布特征

Fig. 5 Horizontal distribution of soil water storage capacity(W) at 0~80cm soil depth in the inter-cropping in different stage

3.3.2 复合系统土壤水分效应的计算与分析 以 0~80cm 土层土壤贮水量为研究对象,对比单作系统计算表明(图 6):复合系统土壤水分效应的水平分布具有明显的差异特征,效应值大致呈“间作中心大,近带距处小”的分布趋势,但在不同生育时期,这种分布趋势又有所差异,即具有一定的时间差异特征,如:拔节~孕穗期间,土壤水分效应值在 S100~N40 带距范围内为正,在 S0~S100 及 N40~N0 范围内为负;孕穗~灌浆期间,土壤水分正效应区已扩大到复合系统内所有带距处;灌浆~乳熟时,在南北带距各 0~150cm 范围又出现负效应值,正效应区仅分布 S150~N150 范围内,而到乳熟~腊熟期时,正效应区进一步缩小至 S160~N160 范围。就拔节~腊熟全时段土壤水分平均而言,S20~N40 为土壤水分正效应区,S0~S20 和 N0~N40 为负效

应区。

土壤水分正效应的存在,是由于复合系统综合小气候效应的作用,降低了作物蒸腾耗水和根系吸水强度,提高了根层土壤贮水量,在负效应区,这种降低蒸腾耗水和根系吸水效应,尚不能抵消果树根系吸水对农田土壤水分的消耗。

经统计,小麦拔节~孕穗期、孕穗~扬花期、扬花~灌浆期、灌浆~乳熟期、乳熟~腊熟期时段内复合系统整体土壤水分效应分别为 0.5%、5.4%、10.7%、-1.1%、-2.1%,总体平均为 2.7%,土壤水分效应值大于零说明本试验模式不会恶化土壤水分生态环境,因此,从水资源角度而言,太行山低山丘陵区发展苹果-小麦复合经营在理论上具有可行性。

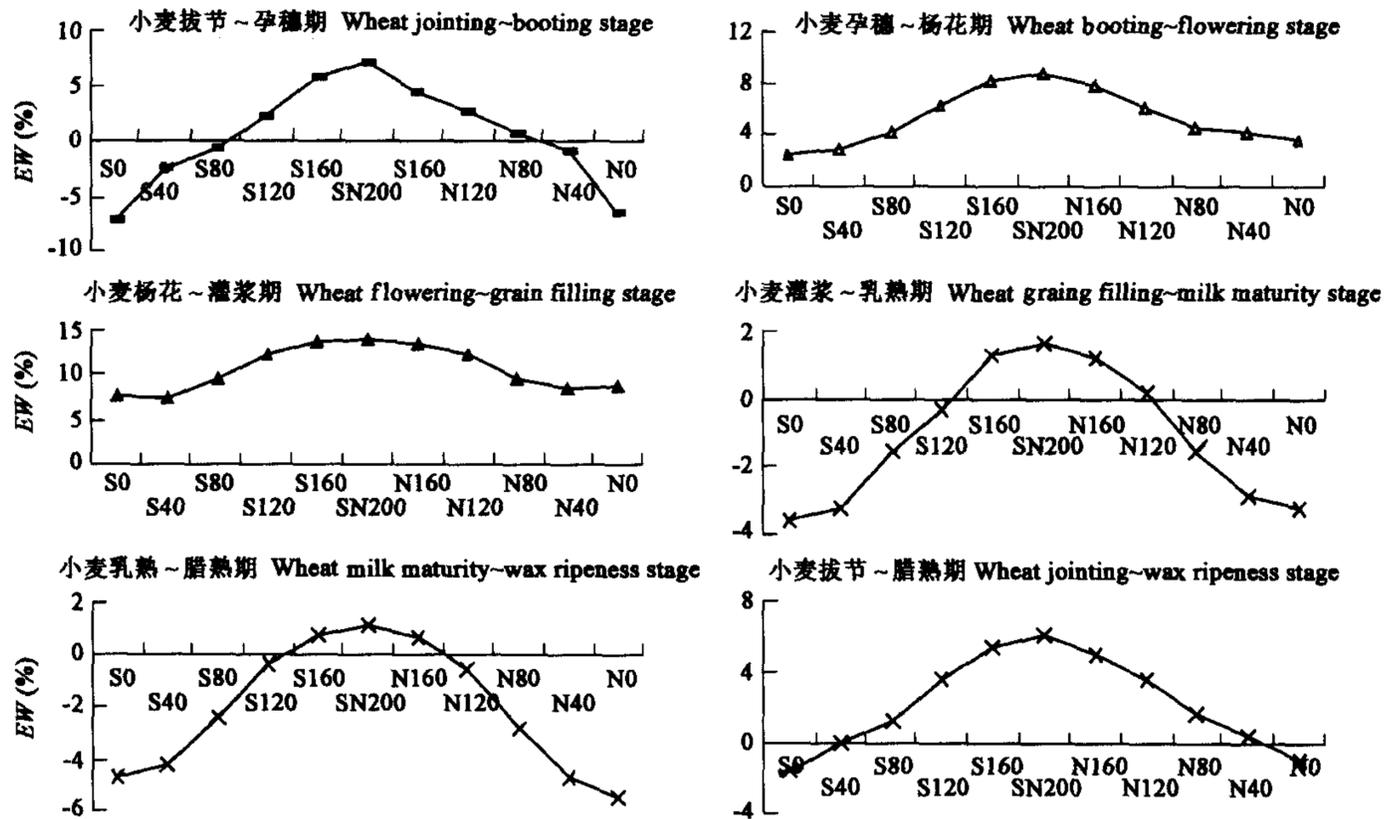


图 6 不同时段复合系统土壤水分效应(EW)水分分布特征

Fig. 6 Horizontal distribution of effect of the inter-cropping on soil water storage capacity at 0~80cm soil depth(EW) in different stage

但鉴于灌浆~腊熟期间土壤水分效应为负值,此时又正处小麦产量形成关键期,所以,该时期内要及时加强农田水分管理,特别是 40~80cm 带距范围小麦,因正处土壤水分负效应区,负效应平均值达-5.40%,故要特别注意管理。

5 结论与讨论

(1)对比单作小麦系统,小麦拔节~腊熟期间,苹果-小麦复合系统具有明显的小麦蒸腾降低效应;实际区域面积上,小麦和果树蒸腾耗水量的比值为 1.7,小麦耗水是复合系统耗水的主要特征方式。

(2)小麦各生长时段内,果树所消耗的土壤水分至少有 50%以上来自作物区内;在小麦与果树根系的交错区内,小麦与果树吸水量的比值达 82.0,因此,如不考虑林带区果树吸水作用而导致周边土壤水分侧向移至林带区,那么,小麦在与果树根系吸水的直接竞争过程中,将处绝对主导地位。

(3)小麦各生长时段内,复合系统中 0~80cm 土层贮水量随带距的变化均大致呈抛物线状分布;对比单作小麦系统,复合系统土壤水分总体平均效应为正值,说明本试验模式不会恶化农田土壤水分生态环境。土壤水分效应在灌浆期之前为正,进入灌浆期后,转为负值,由于此时正值小麦产量形成关键期,所以要及时补充作物区土壤水分。

(4)鉴于复合系统小麦蒸腾效应的显著性、小麦耗水是复合系统耗水的主要特征方式、小麦在种间根系吸水的直接竞争中所处的绝对主导性、土壤水分效应总体平均为正值,可以认为太行山低山丘陵区发展苹果-小麦复合系统,在理论上完全具有可行性。

References:

- [1] Buck L E. Agroforestry policy issues and research directions in the US and less developed countries: insights and challenges from recent experience. *Agroforestry Systems*, 1995, **30**(1/2): 57~73.
- [2] Garrett H E G. Agroforestry practice and policy in the United states of America. *Forestry Ecology and Management*, 1997, **91**(1): 5~15.
- [3] Herzog G. Streuobst: a traditional agroforestry system as a model for agroforestry development in temperature Europe. *Agroforestry*

Systems, 1998, **42**:61~80.

- [4] Mead R, Willey R W. The concept of a "land Equivalent Ration" and advantages in yields from intercropping. *Exp. Agr.*, 1980, **16**:217~228.
- [5] Schultz R C, Colletti J P, Faltonson R R. Agroforestry opportunities for the United states of America. *Agroforestry Systems*, 1995, **31**:117~132.
- [6] Zinkhan F C, Mercer D E. An assessment of agroforestry systems in the southern USA. *Agroforestry Systems*, 1997, **35**:303~321.
- [7] Zhang J S, Meng P. Model on water transfer of SPAC in apple—wheat multiplex system. *Scientia silvaesinicae*, 2004, **40**(4).
- [8] Zhang J S, Meng P. Model on wheat potential evapotranspiration in apple-wheat intercropping. *Forestry Research*, 2004, **17**(3):284~290.
- [9] Zhang Jinsong, Meng Ping, Yin Changjun, *et al.* Estimation Transpiration-water Requirement from An Apple Tree in Apple-crop Intercropping System. *Forestry Research*, 2001, **14**(3):383~387.
- [10] Zhang J S, Meng P, Yin C J, *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics of wheat Roots in apple-wheat intercropping. *Forestry Research*, 2002, **15**(5):537~541.
- [11] Zhang J S, Meng P, Yin C J. spatial distribution characteristics of apple tree roots in the apple-wheat intercropping. *Scientia Silvaesinicae*, 2002, **38**(4):30~33.

参考文献:

- [8] 张劲松,孟平. 2004. 农林复合系统 SPAC 水分运移模拟模型. 林业科学, 2004, **40**(4).
- [9] 张劲松,孟平. 苹果-小麦复合系统小麦潜在蒸散模拟模型. 林业科学研究, 2004, **17**(3):284~290.
- [10] 张劲松,孟平,尹昌君,等. 果粮复合系统中单株苹果蒸腾需水量的计算. 林业科学研究, 2001, **14**(4):383~387.
- [11] 张劲松,孟平,尹昌君,等. 苹果-小麦复合系统中作物根系时空分布特征. 林业科学研究, 2002, **15**(5):537~541.
- [12] 张劲松,孟平,尹昌君. 果农复合系统中果树根系空间分布特征, 林业科学, 2002, **38**(4):30~33.