

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.08.013

近34年玛纳斯河流域棉花生长和耗水特征研究*

王进^{1,2} 白洁³ 罗格平³ 王绍明¹

(1. 新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室, 石河子 832003; 2. 乌兰乌苏农业气象试验站, 石河子 832003;
3. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011)

摘要: 利用1980—2013年北疆玛纳斯河流域乌兰乌苏农业气象站长期的农气观测实验资料,对3个典型棉花种植时期:裸地沟灌(NF,1980—1993年)、覆膜沟灌(MF,1994—2004年)以及膜下滴灌时期(MD,2005—2013年)的棉花生长和耗水特征进行对比研究。结果表明:在充分灌溉的条件下,棉花籽粒产量主要受温度影响,而蒸散量的变化与灌水量有关。近34年,该站棉花籽棉产量和棉田蒸散量均呈增加趋势,每年籽棉产量的增加率大于蒸散量的增加率,棉田水分利用效率(WUE)和灌溉水利用效率(IWUE)也随之呈增加趋势。MD时期的WUE和IWUE值最大,分别为 (0.7 ± 0.1) 、 $(1.0 \pm 0.3) \text{ kg/m}^3$,在我国和世界其他干旱、半干旱棉花产区均处于较高水平。

关键词: 棉花 籽棉产量 蒸散量 水分利用效率 灌溉水利用效率

中图分类号: S161; S152.7⁺5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)08-0083-07

Growth and Water Consumption Characteristics of Cotton in Manas Basin during Recent 34 Years

Wang Jin^{1,2} Bai Jie³ Luo Geping³ Wang Shaoming¹

(1. Key Laboratory of Oasis Ecology Agriculture, Xinjiang Production and Construction Groups, Shihezi 832003, China

2. Wulanwusu Agrometeorological Experiment Station, Shihezi 832003, China

3. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

Abstract: Xinjiang is one of the three major cotton-producing areas in China, and provided 45% of the nation's production. Due to the intensive agricultural management, the cotton planting in Xinjiang go through three cropping periods in 1980—2013. The three cropping periods are as following: period of furrow irrigation with non-mulching (NF period, 1980—1993), period of furrow irrigation with mulching (MF period, 1994—2004) and period of drip irrigation with mulching (MD period, 2005—2013). Under the condition of sufficient irrigation, the seed yield of cotton was closely influenced by air temperature, and the evapotranspiration was more related to irrigation water amount. The seed yield reached the maximum value of $4\,493.3 \text{ kg/hm}^2$ in MD period, while ET had the peak value of 714 mm in NF period. In the recent 34 years, the seed yield and evapotranspiration of cotton were generally increased. The annual increasing rate of seed yield (83.97 kg/hm^2) was greater than that of evapotranspiration (5.46 mm). Thus water use efficiency (WUE) and irrigation water use efficiency (IWUE) of cotton were also increased. WUE and IWUE reached the peak value of $(0.7 \pm 0.1) \text{ kg/m}^3$ and $(1.0 \pm 0.3) \text{ kg/m}^3$, respectively, which were close to the levels in humid regions.

Key words: Cotton Seed cotton yield Evapotranspiration Water use efficiency Irrigation water use efficiency

收稿日期: 2015-04-23 修回日期: 2015-06-06

* 国家自然科学基金青年基金资助项目(41101101)、中国科学院“西部之光”人才培养计划资助项目(XBBS201110)和国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2014CB460603)

作者简介: 王进, 博士生, 乌兰乌苏农业气象试验站工程师, 主要从事干旱区绿洲农业生态研究, E-mail: apple6405@sohu.com

通讯作者: 白洁, 助理研究员, 博士, 主要从事干旱区绿洲农田生态系统过程和模拟研究, E-mail: baijie@ms.xjb.ac.cn

引言

新疆作为我国产量和种植面积最大的商品棉生产基地,主要得益于独特的干旱区内陆荒漠气候和自然条件,但也受水资源供需矛盾日益紧张的制约^[1-2]。近半个世纪以来,新疆气候逐渐转为暖湿,为绿洲农业发展提供了良好的气候条件。在气候变化背景下,如何优化棉花种植模式,高效利用有限的农业水资源,实现棉花高产节水,对新疆棉花产业的可持续发展具有现实意义。

从20世纪80年代至今,新疆的棉花种植模式经历了从粗放型到集约型的转变过程。3种主要种植模式:裸播沟灌种植模式(20世纪90年代初以前)、地膜沟灌种植模式(20世纪90年代初—21世纪初)以及地膜和滴灌技术结合的膜下滴灌种植模式(21世纪初至今)。目前,全疆95%以上的棉田采用膜下滴灌的节水种植技术^[3]。国内很多学者围绕该技术对绿洲农田生态环境影响开展了大量的野外观测和对比试验研究^[4-8]。主要集中在3个方面:对土壤微气象环境的影响,如土壤温度、湿度、土壤微生物活性、土壤有机质含量、土壤水盐运移等。对作物生长过程的影响,如光合作用、地上地下生物量分配、根系分布、产量构成等。对农业水资源利用的影响,如:蒸腾作用、耗水量、水分利用效率、灌溉水利用效率。目前,关于不同种植模式下棉花产量和耗水量的研究大部分集中在以空间代替时间变化的田间对比试验上,而对气候变化的影响作用考虑较少。本文以新疆天山北坡玛纳斯河流域棉田为研究对象,利用34年连续的农气观测试验数据,分析3个时期典型种植模式下棉田产量和耗水量的时间变化特征规律,探讨种植模式优化对棉田水分利用效率(Water use efficiency, WUE)和灌溉水利用效率(Irrigation water use efficiency, IWUE)的影响。

1 研究区和研究方法

1.1 研究区概况

本研究的长期农气观测试验在中国气象局乌兰乌苏农业气象试验站内进行(44°17'N, 85°49'E, 海拔高度469 m)。该研究区属于温带干旱大陆性气候区,热量和日照条件良好,但降水偏少,蒸发量较大。该站1980—2013年平均气温为7.5℃,大于等于10℃年均有效积温为(4 064.7 ± 204.2)℃,年均日照时间为(2 876.7 ± 138.7)h,年均降水量仅为(226.1 ± 58.5)mm,而年均蒸发量高达(1 604.2 ± 137.3)mm。试验地的土壤质地为粘壤土,其中表层

0~50 cm的土壤田间持水率平均为(27.9 ± 1.8)%,凋萎含水率平均为(6.1 ± 0.9)% (均为质量含水率),土壤容重平均为(1.3 ± 0.1) g/cm³。地下水埋藏较深(8~20 m以下^[9]),因此地下水向上的补给可以忽略不计。

1980—2013年该站的棉花种植可分为3个时期,其中,前期(1980—1993年)为裸地沟灌种植模式(简称NF时期),中期(1994—2004年)为覆膜沟灌种植模式(简称MF时期),后期(2005—2013年)为膜下滴灌种植模式(简称MD时期)。

1.2 棉花生育期观测项目和方法

依据《农业气象观测规范》^[10],在棉花主要生长期(五真叶、现蕾、初花、盛花、裂铃、吐絮、盛絮及停止生长期)进行生育期的观测记录和量测试验,包括:叶面积指数、地上各部分生物量、植株密度和株高。此外,棉花从播种到成熟期,每旬第8天利用土钻法取土,并采用干燥法测定0~50 cm深度的土壤含水率。同时,记录整地(耕地、开沟)、田间管理(包括:施肥、灌溉等)、收获方式等田间管理工作信息。在长期的观测中,灌水量用水表进行量测,棉花收获时进行考种测产。试验站内设有自动气象站,可以获得逐日的气象资料,包括降水量、温度、空气相对湿度、日照时间等。

1.3 棉花生育期内蒸散量计算

棉田实际蒸散量(ET)利用水量平衡原理计算,其计算式为

$$ET = P + I \pm \Delta W + U + R - F \quad (1)$$

式中 ET——棉田实际蒸散量,mm

P——生育期内降水量,mm

I——生育期内灌水量,mm

ΔW ——生育期内土壤储水量的变化量,mm

U——生育期内地下水对作物耗水的补给量,mm

R——生育期内地表径流量,mm

F——生育期内的深层渗漏量,mm

由于试验区地下水位在20 m以下,多年均降水量不足200 mm,且耕种前都会进行地块平整,因此U、R和F项可忽略不计。

2 结果与分析

2.1 3个种植时期棉田耗水量的月变化特征

由图1可见,3个时期的月平均灌水量均远高于月平均降水量,且季节分布不同。3个种植时期的春季(4、5月份)平均降水量高于夏季(6—8月份);灌水量主要集中在夏季,较好地补充了夏季降水量的不足。3个时期的灌水量均从苗期(4、5月

份)开始,至花蕾期(6—8 月份)达到最大,随后逐渐减少至铃期(9 月份)。但是,不同灌溉方式的月灌水量分配比例有所不同。采用沟灌方式的 NF 和 MF 时期,花蕾期各月的灌水量差异较大,其中 7 月份的灌水量最大(约 40% 以上),其次为 8 月份(20% ~ 30%),6 月份的灌水量最小(20% 左右)。采用滴灌方式的 MD 时期,花蕾期各月的灌水量变化稳定,6 月份和 7 月份的灌水量最大(分别约 30% 以上),其次为 8 月份的灌水量(20% 左右)。此外,

在铃期,MD 时期灌水量比例约为 7% 左右,是 NF 和 MF 时期的 2 ~ 3 倍。可见,在棉花需水量较大时,膜下滴灌不但能够及时合理的供给作物生长需要,还可以抑制土壤无效蒸发。虽然 MF 时期全生育期的总灌水量和最大灌水量均比 MD 时期高,但其土壤水分总储量(11.83 mm)却比 MD 种植时期(12.47 mm)低,说明在覆膜条件下,滴灌比沟灌方式更能有效地保持土壤湿度,且可以节约灌水量约 20% 左右。

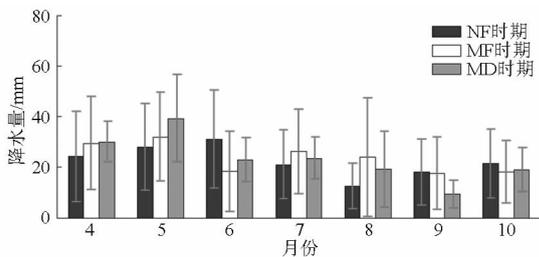
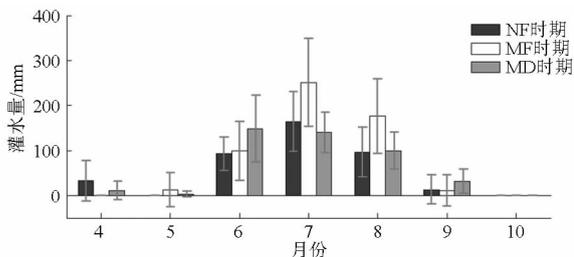


图 1 3 个种植时期的棉花生长季(4—10 月)平均灌水量和降水量的月变化

Fig. 1 Monthly changes of irrigation and precipitation amounts of cotton fields during growing seasons (Apr.—Oct.) of three planting periods

2.2 3 个种植时期棉田产量和耗水量年际变化特征

由图 2 可见,棉花籽棉的实际产量和趋势产量(即从实际产量中分离气候要素对产量的影响)均随时间的增加而呈增加趋势,年增加幅度分别为 83.97 kg/hm²和 84.57 kg/hm²。棉花籽棉趋势产量的增加说明以覆膜技术为代表的绿洲棉田种植模式的优化,可以延长作物的生长时间,提高种植密度和收获指数,从而实现棉花的高产。棉花籽棉的平均实际产量从 NF 时期的 2 430.1 kg/hm²增加到 MF 时期的 3 542.9 kg/hm²,到 MD 时期达 4 493.3 kg/hm²。除了棉田种植模式的优化外,棉花生育期内的温度提高也为其增产提供了良好的热量条件。当生育期内

的平均气温每升高 1℃时,棉花籽棉的实际产量增加 1 020.7 kg/hm²。2000 年是 34 年来棉花籽棉产量最高的一年,产量达 5 083.1 kg/hm²(较平均值偏高 52.36%);而 1994 年是棉花籽棉产量最低的年份,产量为 750 kg/hm²(较平均值低 77.51%)。低温霜冻(1986 年和 2001 年)和蚜虫(1994 年)等灾害是导致棉花大幅度减产的主要原因。由图 2 可见,棉田蒸散量和灌水量都随时间延长呈先增加后减小的趋势。蒸散量和灌水量最大的年份均发生在 2003 年,分别为 931.8、802.5 mm。近 34 年,蒸散量的总变化趋势为增加(增幅为 5.46 mm),棉花蒸散量的年际增加率略低于棉花籽棉产量。由于该研究区降水量远低于灌水量,棉花蒸散量主要受灌水量

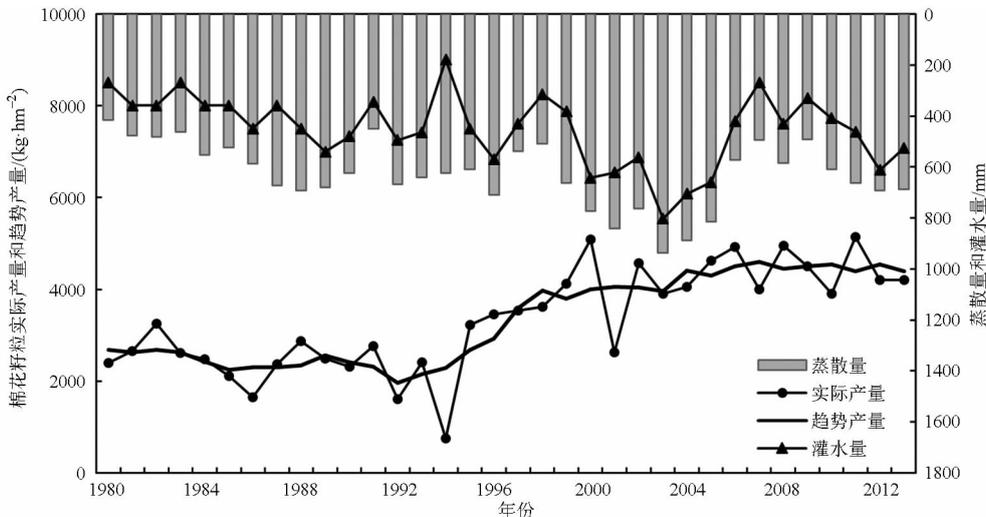


图 2 1980—2013 年棉花籽棉产量、蒸散量和灌水量年际变化曲线

Fig. 2 Annual changes of seed yield, evapotranspiration and irrigation amount in cotton fields during 1980—2013

的影响,这两者的相关系数为 0.8。由表 1 可见,MD 时期的平均棉花籽棉实际产量较 NF 和 MF 时期分别增加了 45.9% 和 21.2%。同时,MD 时期的平均蒸散量和灌水量比 NF 时期增加 9.1% 和 13.1%;而比 MF 时期分别减小 14.6% 和 12.5%。可见,这 3 个时期棉花实际产量的变化大于蒸散量和灌水量的变化,产量提高是导致 MD 时期 WUE 和 IWUE 显著提高的主要因素。

如图 3 所示,该流域棉花 WUE 和 IWUE 从 1980 年以来均呈增加趋势,且 IWUE 年际增加率 (0.011 kg/m^3) 略高于 WUE (0.009 kg/m^3)。2009 年是棉花 WUE 和 IWUE 最高的年份,分别高达 0.9 、 1.4 kg/m^3 ;而 1994 年是棉花 WUE 和 IWUE 最

低的年份,分别为 0.1 、 0.4 kg/m^3 。MD 时期的平均 WUE 和 IWUE 最高,分别为 (0.7 ± 0.1) 、 $(1.0 \pm 0.3) \text{ kg/m}^3$;而 NF 时期的平均 WUE 和 IWUE 最低,分别为 (0.4 ± 0.1) 、 $(0.6 \pm 0.2) \text{ kg/m}^3$ 。从近 34 年该站生育期内平均气温与 WUE 和 IWUE 的变化曲线看,随着平均气温的升高,棉花的 WUE 和 IWUE 呈增加趋势,相关系数分别为 0.5 和 0.3。MD 时期的平均温度较 NF 和 MF 时期分别升高了 1.4 、 0.7°C ;棉花的 WUE 分别提高了 0.3 、 0.2 kg/m^3 ;同时 IWUE 分别提高了 0.4 、 0.3 kg/m^3 。当平均气温每升高 10°C ,棉花 WUE 和 IWUE 分别提高 1.7 、 1.9 kg/m^3 ,说明气温升高有助于提高干旱灌溉区棉花的 WUE 和 IWUE。

表 1 3 个种植时期棉田水量平衡要素、棉花籽棉产量、水分利用效率及灌溉水利用效率

Tab. 1 Features of water balance, cotton seed yield, WUE and IWUE in three cotton planting periods

项目	种植时期		
	NF	MF	MD
年份	1980—1993	1994—2004	2005—2013
蒸散量/mm	566.6 ± 94.2	714.0 ± 133.7	623.3 ± 97.3
灌水量/mm	397.5 ± 79.7	514.9 ± 174.1	457.7 ± 118.2
降水量/mm	156.0 ± 54.3	167.2 ± 49.1	161.6 ± 38.3
籽棉产量/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	2430.1 ± 422.4	3542.9 ± 1083.5	4493.3 ± 420.8
水分利用效率/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	0.4 ± 0.1	0.5 ± 0.2	0.7 ± 0.1
灌溉水利用效率/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	0.6 ± 0.2	0.7 ± 0.2	1.0 ± 0.3

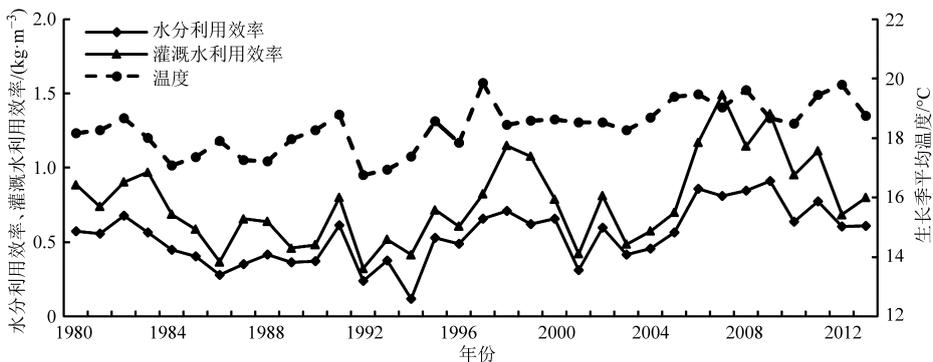


图 3 1980—2013 年棉花水分利用效率、灌溉水利用效率与生育期年平均温度变化曲线

Fig. 3 Annual changes of water use efficiency, irrigation water use efficiency of cotton and average temperature during growth period of 1980—2013

3 讨论

近 30 年新疆棉花产量增加是棉田水分利用效率和灌溉水利用效率显著提高的一个重要因素。棉花产量与气候变化、品种改良、管理措施改进等因素有关。本研究利用长期气候资料分析发现近 34 年该站的多年平均温度、降水量、大于等于 10°C 积温、日照时间均呈增加趋势,日趋良好的水、热条件有利于棉花播种期提前和生育期延长,以及棉花产量和品质提高。这与新疆石河子棉区^[11]、南疆渭干河—

库车河三角洲绿洲棉区^[12]以及甘肃河西走廊棉区^[13]等地的研究结果一致。此外,干旱区绿洲棉田的灌水量远高于降水量,棉花产量受温度的影响程度大于降水,气温正常时,产量较为稳定,气温异常时,产量波动较大。

种植密度、植株高度和冠层结构的变化也会影响棉花光合、蒸腾速率以及水分利用效率。适宜的植株密度和株高是保证棉花高产的重要栽培措施之一。从 20 世纪 80 年代开始,全疆棉花产区就开始逐渐建立“矮、密、早、膜”的高密度栽培体系。种植

密度在20世纪80年代为11.2~15.0株/m²,20世纪90年代增加到18.0株/m²,进入21世纪初期增加到23.9~26.9株/m²[14]。该地区3个棉花种植时期的植株密度与全疆棉花种植密度发展阶段和水平较为一致,都经历了由稀到密的发展过程。由表2可见,MD和MF时期的种植密度比NF时期增加近1倍。此外,有研究表明新疆较为理想的棉花株高为70cm左右[15]。本研究中,3个种植时期的棉花最大株高呈增加趋势,其中最大值为MD时期,最小值为NF时期(表2)。随着种植密度和植株高度的增加,棉花的收获指数也随之提高,从NF时期的0.44增加到MD时期的0.50。同时,最大叶面积指数(LAI_{max})和地上部分生物量在沟灌和滴灌方式下也有所不同,MD时期的LAI_{max}和地上部分的生物量均比NF时期提高了75.3%和94.8%。

表2 1980—2013年3个种植时期的棉花生长状况

Tab.2 Growth of cotton at three planting periods during 1980—2013

指标	种植时期		
	NF	MF	MD
植株密度/(株·m ⁻²)	12.8	21.1	24.3
收获指数	0.44	0.49	0.50
最大株高/cm	65.4	67.5	71.0
最大叶面积指数/(m ² ·m ⁻²)	—	3.5±1.8	6.2±1.3
地上部分生物量/(kg·m ⁻²)	—	1.3±0.7	2.5±0.5

表3为棉花不同种植方式下,不同地区的WUE和IWUE值。相比全球其他干旱、半干旱棉花主产

区,本研究中的膜下滴灌棉田WUE和IWUE的结果与乌兹别克斯坦和土耳其地区较为一致,高于叙利亚地区。乌兹别克斯坦与中国新疆具有相类似的棉花种植气候条件,也是中亚主要的棉花产区,该国的科研人员通过定量灌溉试验发现覆膜滴灌种植方式下的棉田WUE(0.75 kg/m³)明显高于沟灌种植方式(0.49 kg/m³)(表3)[16]。比我国新疆还要干旱的土耳其西部地区的研究表明,充分漫灌种植方式下的棉花WUE和IWUE(分别为0.63、0.78 kg/m³)[17]均略高于充分滴灌种植方式(分别为0.76、0.81 kg/m³)[18]。在年降水量仅11mm的叙利亚北部地区,滴灌种植方式下棉花的WUE和IWUE仅分别为0.39、0.44 kg/m³[19]。虽然叙利亚的灌水量高达760~870mm,但是该国灌溉系统和灌溉制度的水平较落后,棉花的单位产量较低,导致棉花的WUE仅为新疆的一半[19]。而我国东北黑龙江地区和西北甘肃省民勤地区的定量观测试验也表明:膜下滴灌棉田的WUE比传统沟灌种植方式提高了50%以上(表3)。杨艳敏等[20]利用COTTON2K棉花模型分别模拟依靠雨养的华北平原禹城站和依靠灌溉的新疆石河子地区的棉花产量和耗水量,结果表明在灌溉水分充分供给条件下石河子棉花平均产量几乎为禹城的2倍,因此石河子棉花的水分利用效率是禹城站的2倍。Zwart等[21]通过文献检索分析发现全球棉花WUE为0.41~0.95 kg/m³,目前新疆膜下滴灌棉花的WUE处于中上水平。

表3 棉田水分利用效率和灌溉水利用效率对比

Tab.3 Comparison of mean annual WUE and IWUE among different cotton producing areas

站点	年份	种植方式	降水量 /mm	水分利用效率 /(kg·m ⁻³)	灌溉水利用效率 /(kg·m ⁻³)	文献来源
黑龙江,中国	1994	沟灌	460	0.49	0.40	[22]
黑龙江,中国	1994	膜下滴灌	460	0.80	1.54	[22]
临泽,河南,中国	2003	膜下滴灌	116.8	0.58	0.72	[23]
民勤,甘肃,中国	2004—2005	沟灌	82.5	0.25	0.70	[24]
民勤,甘肃,中国	2004—2005	覆膜+沟灌	82.5	0.60		[24]
乌兹别克斯坦	2003—2005	膜下滴灌	161	0.75	1.01	[16]
乌兹别克斯坦	2003—2005	常规灌溉	161	0.49	0.60	[16]
艾登省,土耳其	2003—2004	沟灌	36.5	0.63	0.78	[17]
爱琴海地区,土耳其	2004—2005	滴灌	53	0.76	0.81	[18]
叙利亚	2004—2006	滴灌	11	0.39	0.44	[19]

4 结束语

由于新疆降水量远低于灌水量,绿洲棉田的蒸散量与灌水量密切相关,灌水量和蒸散量在MF时期最大,相反在NF时期最小。覆膜和滴灌措施

可以有效地减少土壤无效蒸发和保持膜下土壤湿度。3个棉花种植时期的灌水量和蒸散量变化率远低于产量变化率,导致其对应的WUE和IWUE差异较大。其中,MD时期棉田WUE和IWUE最高(分别为(0.7±0.1)、(1.0±0.3) kg/m³),而

NF时期的 WUE 和 IWUE 最低(分别为 (0.4 ± 0.1) 、 $(0.6 \pm 0.2) \text{ kg/m}^3$)。可见,MD 时期的棉花产量增加,是其 WUE 和 IWUE 显著提高的主要原因。而在充分灌溉的绿洲棉区,棉花 WUE 和

IWUE 受温度的影响远大于受降水的影响。因此,近 34 年新疆北疆绿洲棉田 WUE 和 IWUE 提高的主要气候因素是温度升高,而管理因素是集约化节水措施的不断改进。

参 考 文 献

- 1 申孝军,张寄阳,孙景生,等. 基于恒水位蒸发皿蒸发量的膜下滴灌棉花灌溉指标[J]. 应用生态学报,2013,24(11):3153-3161.
Shen Xiaojun, Zhang Jiyang, Sun Jingsheng, et al. Optimal irrigation index for cotton drip irrigation under film mulching based on the evaporation from pan with constant water level[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(11): 3153-3161. (in Chinese)
- 2 苏里坦,虎胆·吐马尔白,张展羽. 分根交替膜下滴灌条件下南疆棉花耗水特性与生长特征[J]. 农业工程学报,2009,25(6):20-25.
Su Litan, Hu Dan·Tumarbay, Zhang Zhanyu. Characteristics of water consumption and growth of cotton with alternate partial root-zone drip irrigation under mulch in South-Xinjiang[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(6): 20-25. (in Chinese)
- 3 黎鸿慧,李俊兰,崔淑芳,等. 中国棉花科技进展现状及展望[J]. 中国农学通报,2004,20(1):54-56.
Li Honghui, Li Junlan, Cui Shufang, et al. The evolutions and prospect of China's scientific and technical current development on cotton[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2004, 20(1): 54-56. (in Chinese)
- 4 闫映宇,赵成义,盛钰,等. 膜下滴灌对棉花根系、地上部分生物量及产量的影响[J]. 应用生态学报,2009,20(4):970-976.
Yan Yingyu, Zhao Chengyi, Sheng Yu, et al. Effects of drip irrigation under mulching on cotton root and shoot biomass and yield[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(4): 970-976. (in Chinese)
- 5 刘梅先,杨劲松,李晓明,等. 滴灌模式对棉花根系分布和水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(25):98-105.
Liu Meixian, Yang Jingsong, Li Xiaoming, et al. Effects of drip irrigation strategy on cotton root distribution and water use efficiency[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(25): 98-105. (in Chinese)
- 6 贾彪,钱瑾,马富裕. 氮素对膜下滴灌棉花叶面积指数的影响[J]. 农业机械学报,2015,46(2):79-87.
Jia Biao, Qian Jin, Ma Fuyu. Simulating effects of nitrogen on leaf area index of cotton under mulched drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 79-87. (in Chinese)
- 7 李志国,张润花,赖冬梅,等. 膜下滴灌对新疆棉田生态系统净初级生产力、土壤异氧呼吸和 CO_2 净交换通量的影响[J]. 应用生态学报,2012,23(4):1018-1024.
Li Zhiguo, Zhang Runhua, Lai Dongmei, et al. Effects of drip irrigation with plastic mulching on the net primary productivity, soil heterotrophic respiration, and net CO_2 exchange flux of cotton field ecosystem in Xinjiang, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(4): 1018-1024. (in Chinese)
- 8 邢旭光,赵文刚,马孝义,等. 覆膜滴灌条件下棉花根层土壤盐分时间稳定性研究[J]. 农业机械学报,2015,46(7):146-153.
Xing Xuguang, Zhao Wen'gang, Ma Xiaoyi, et al. Study on temporal stability of soil salinity in root zone of cotton under plastic drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 146-153. (in Chinese)
- 9 刘绍民,傅玮东. 北疆玉米田实际蒸散量的计算模式[J]. 新疆气象,1998,21(1):28-33.
Liu Shaomin, Fu Weidong. The calculated mode of actual evaporation at the maize field in Northern Xinjiang[J]. Bimonthly of Xinjiang Meteorology, 1998, 21(1): 28-33. (in Chinese)
- 10 国家气象局. 农业气象观测规范[M]. 北京:气象出版社,1993.
- 11 唐湘玲,刘姣娣,吕新. 石河子地区近 48 年来气候变化对棉花产量影响分析[J]. 中国农学通报,2010,26(20):324-329.
Tang Xiangling, Liu Jiaodi, Lü Xin. Climatic change of Shihezi and its influence on cotton production in recent 48 years[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(20): 324-329. (in Chinese)
- 12 玉苏甫·买买提,买合皮热提·吾拉木,满苏尔·沙比提. 气候变暖对渭干河-库车河三角洲绿洲棉花生产的影响[J]. 地理研究,2014,33(2):251-259.
Yusuf Mamat, Mahpiret Ulam, Mansur Sabit. Impact of climate warming on cotton production of Ugan-Kuqa River delta oasis[J]. Geographical Research, 2014, 33(2): 251-259. (in Chinese)
- 13 邓振镛,王鹤龄,李国昌,等. 气候变暖对河西走廊棉花生产影响的成因与对策研究[J]. 地球科学进展,2008,23(2):160-166.
Deng Zhenyong, Wang Heling, Li Guochang, et al. Study on the cause of formation and countermeasure effect of climate warming on cotton produce in Hexi Corridor[J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(2): 160-166. (in Chinese)
- 14 邓福军,林海,宿俊吉,等. 棉花种植密度与产量形成的关系[J]. 新疆农业科学,2011,48(12):2191-2196.
Deng Fujun, Lin Hai, Su Junji, et al. Relation of yield forming and planting density in cotton[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2011, 48(12): 2191-2196. (in Chinese)
- 15 李新裕,陈玉娟. 新疆垦区棉花矮密早栽培体系量化指标研究[J]. 中国棉花,2000,27(3):12-13.

- Li Xinyu, Chen Yujuan. The study of low-dense-early planting pattern in cotton filed of Xinjiang[J]. China Cotton, 2000, 27(3): 12-13. (in Chinese)
- 16 Ibragimov N, Evett S R, Esanbekov Y, et al. Water use efficiency of irrigated cotton in Uzbekistan under drip and furrow irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2007, 90(1-2): 112-120.
- 17 Dağdelen N, Yılmaz E, Sezgin F, et al. Water-yield relation and water use efficiency of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) and second crop corn (*Zea mays* L.) in western Turkey[J]. Agricultural Water Management, 2006, 82(1-2): 63-85.
- 18 Dağdelen N, Başal H, Yılmaz E, et al. Different drip irrigation regimes affect cotton yield, water use efficiency and fiber quality in western Turkey[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(1): 111-120.
- 19 Oweisa T Y, Farahani H J, Hachum A Y. Evapotranspiration and water use of full and deficit irrigated cotton in the Mediterranean environment in northern Syria[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(8): 1239-1248.
- 20 杨艳敏, 欧阳竹, 王淑芬. 基于 COTTON2K 的华北平原和新疆 2 个棉区棉花耗水特征比较[J]. 华北农学报, 2012, 27(增刊): 229-233.
- Yang Yanmin, Ouyang Zhu, Wang Shufeng. Comparison of cotton growth and water use in North China Plain and Xinjiang based on cotton simulation model COTTON2K[J]. Acta Agricultural Boreall-Sinica, 2012, 27(Supp.): 229-233. (in Chinese)
- 21 Zwart S J, Bastiaanssen W G M. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize [J]. Agricultural Water Management, 2004, 69(2): 115-133.
- 22 陈四龙, 裴冬, 王振华, 等. 华北平原膜下滴灌棉花水分利用效率及产量对供水方式响应研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(6): 26-31.
- Chen Silong, Pei Dong, Wang Zhenhua, et al. Influence of irrigation modes on water consumption and yield of cotton with drip irrigation under plastic mulch in North China Plain[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(6): 26-31. (in Chinese)
- 23 苏培玺, 张小军, 关志强. 河西走廊棉花耗水规律及双株双层高产栽培技术研究[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(3): 124-127.
- Su Peixi, Zhang Xiaojun, Guan Zhiqiang. Study on water consumption and high-yield cultivation techniques of cotton in the Hexi Corridor Region[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2003, 11(3): 124-127. (in Chinese)
- 24 杜太生, 康绍忠, 王振昌, 等. 隔沟交替灌溉对棉花生长、产量和水分利用效率的调控效应[J]. 作物学报, 2007, 33(12): 1982-1990.
- Du Taisheng, Kang Shaozhong, Wang Zhenchang, et al. Responses of cotton growth, yield, and water use efficiency to alternate furrow irrigation[J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(12): 1982-1990. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 112 页)

- 24 李鹏, 李占斌, 郑良勇. 黄土坡面径流侵蚀产沙动力过程模拟与研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(4): 444-449.
- Li Peng, Li Zhanbin, Zheng Liangyong. Hydrodynamics process of soil erosion and sediment yield by runoff on Loess Slope [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(4): 444-449. (in Chinese)
- 25 雷阿林, 唐克丽. 黄土坡面细沟侵蚀的动力条件[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(3): 39-43, 72.
- Lei Alin, Tang Keli. Kinetic condition of rill erosion on loess sloping face [J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1998, 4(3): 39-43, 72. (in Chinese)
- 26 吕宏兴, 裴国霞, 杨玲霞. 水力学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002: 90-194.
- 27 潘成忠, 上官周平. 不同坡度草地含沙水流水力学特性及其拦沙机理[J]. 水科学进展, 2007, 18(4): 490-495.
- Pan Chengzhong, Shangguan Zhouping. Hydraulic characteristics of silt-laden flow on different gradient grassplots and its mechanism of sediment retention [J]. Advances in Water Science, 2007, 18(4): 490-495. (in Chinese)
- 28 郑粉莉, 唐克丽, 周佩华. 坡耕地细沟侵蚀的发生、发展和防治途径的探讨[J]. 水土保持学报, 1987, 1(1): 36-48.
- Zheng Fenli, Tang Keli, Zhou Peihua. Approach to the genesis and development of rill erosion on slope land and the way to control[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1987, 1(1): 36-48. (in Chinese)
- 29 肖培青, 姚文艺. WEPP 模型的侵蚀模块理论基础[J]. 人民黄河, 2005, 27(6): 38-39, 50.
- Xiao Peiqing, Yao Wenyi. The theoretical basis of erosion module in WEPP model [J]. Yellow River, 2005, 27(6): 38-39, 50. (in Chinese)
- 30 郑粉莉. 黄土区坡耕地细沟间侵蚀和细沟侵蚀的研究[J]. 土壤学报, 1998, 35(1): 95-103.
- Zheng Fenli. Study on interrill erosion and rill erosion on slope farmland of Loess Area [J]. Acta Pedologica Sinica, 1998, 35(1): 95-103. (in Chinese)
- 31 Di Stefano C, Ferro V, Pampalone V, et al. Field investigation of rill and ephemeral gully erosion in the Sparacia experimental area, South Italy [J]. CATENA, 2013, 101: 226-234.
- 32 和继军, 吕焯, 宫辉力, 等. 细沟侵蚀特征及其产流产沙过程试验研究[J]. 水利学报, 2013, 44(4): 398-405.
- He Jijun, Lü Ye, Gong Huili, et al. Experimental study on rill erosion characteristics and its runoff and sediment yield process [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(4): 398-405. (in Chinese)