

河北省棉花灌溉需水量与灌溉需求指数分析

刘玉春¹, 姜红安², 李存东¹, 黄鹤³, 潘增辉⁴, 柴春岭¹

(1. 河北农业大学城乡建设学院, 保定 071001; 2. 保定中法供水有限公司, 保定 071051;
3. 保定市气象局, 保定 071000; 4. 河北水利科学研究院水资源与水环境研究所, 石家庄 050051)

摘 要: 对不同水文年份作物需水量和灌溉需水量的分析能够为作物灌溉用水定额的制定、作物生育期的水分管理和农业水资源规划提供基础数据。该文基于河北省棉区的气象资料, 采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式和作物系数法计算参照作物需水量和棉花需水量; 利用水文计算应用最广的皮尔逊 III 型分布曲线, 通过频率计算和配线法确定不同水文年份棉花生育期的有效降水量和需水量; 据此分析不同水文年份棉花的灌溉需水量和灌溉需求指数。分析结果表明, 河北省棉花多年平均需水量 648.9 mm, 多年平均灌溉需水量 190.6 mm, 多年平均灌溉需求指数 0.29。枯水年 ($P=75\%$)、平水年 ($P=50\%$) 和丰水年 ($P=25\%$) 河北省棉花灌溉需水量分别为 299.1、182.8 和 84.7 mm, 灌溉需求指数分别为 0.45、0.28 和 0.13。

关键词: 水, 灌溉, 作物, 棉花, 需水量, 需求指数, 河北省

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.19.012

中图分类号: S274.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-19-0098-07

刘玉春, 姜红安, 李存东, 等. 河北省棉花灌溉需水量与灌溉需求指数分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 98—104.
Liu Yuchun, Jiang Hong'an, Li Cundong, et al. Analysis of irrigation water requirement and irrigation requirement index for cotton of Hebei province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(19): 98—104. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

河北省水资源短缺, 又是农业大省, 科学确定主要农作物的需水量和灌溉需水量是进行水资源优化管理、控制农业用水总量的重要依据。棉花是河北省的主要农作物之一, 2012 年播种面积超过 55 万 hm^2 , 占黄河流域棉区实播面积的 31%, 占全国棉花实播面积的 5.3%, 科学的棉花灌溉需水量、灌溉制度有助于棉花优化水肥管理措施的提出, 也能为河北省水资源优化管理提供基础数据。

作物需水量和灌溉需水量资料是进行农业水资源规划的重要依据, 美国等国家自上世纪 30 年代开始对主要农作物的需水量和灌溉需水量进行了深入细致的研究^[1], Zwart 等^[2]分析了至少 25 a 来 84 篇文献资料总结了全球主要农作物的水分生产效率, 为农业水资源规划提供了详实的基础资料。陈玉民^[3]和刘钰等^[4]对中国主要农作物的需水量和灌溉需水量特征进行了研究, 对华北平原的研

究表明该区域棉花需水量 500~600 mm, 灌溉需水量 150~330 mm, 灌溉需求指数 0.30~0.55; 王景雷等^[5]根据中国主要棉区棉花需水特点和降雨情况估算了各分区的灌溉需水量, 研究表明黄河流域棉花需水量 550~683 mm, 缺水 82~311 mm。从区域尺度, 马林等^[6]对华北平原灌溉需水量时空分布的研究表明从山前平原到滨海平原多年平均灌溉需水量 282~238~172 mm, 有逐渐降低的趋势; 杨艳敏等^[7]利用棉花生长模型 COTTON2K 模拟研究了新疆和华北平原棉花的耗水特征, 研究表明充分供水条件下华北平原禹城棉花耗水量 541 mm; 左余宝等^[8]利用田间试验资料分析了鲁北地区主要作物的需水量和作物系数, 分析表明 2006—2007 年度棉花需水量 425.8 mm, 作物系数 0.85; 孔箫铎等^[9]基于 SIMETAW 模型估算了北京地区主要作物的需水量, 估算棉花需水量在 430 mm 以上。国内外对作物需水量和灌溉需水量的研究多为多年平均统计结果, 而年际间降水量和作物需水量的差异较大, 有必要针对不同水文年份作物需水量和灌溉需水量进行统计分析, 为作物的优化水分管理、水资源规划提供更为详实、有针对性的基础数据。

本文基于河北省棉区的气象资料, 采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 方法和作物系数法计算棉花需水量; 利用皮尔逊 III 型分布曲线, 通过频率分析确定不同水文年份的有效降水量和需水量; 据

收稿日期: 2013-05-05 修订日期: 2013-08-28

基金项目: 国家自然科学基金 (31171495); 河北省自然科学基金 (E2012204079)

作者简介: 刘玉春 (1971—), 女, 满族, 河北平泉人, 博士, 副教授, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。中国河北省保定市南市区灵雨寺街 289 号, 河北农业大学城乡建设学院水利系, 071001。

Email: liuyuchun5@163.com

此分析不同水文年份的棉花灌溉需水量和灌溉需求指数。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本文所用气象数据为河北省棉区唐山、沧州、衡水、廊坊、保定、石家庄、邢台和邯郸等冀东平原区、黑龙港区和山区平原区的 8 市 16 个地面气象站自 1955 年（或自建站）—2009 或 2012 年的气象资料（见表 1），包括日平均气温、日最高气温、日最低气温、日降水量、日照时数、日平均风速、日平均相对湿度等气象资料。

表 1 研究区域及数据年限
Table 1 Study area and years of data

分区 Regions	市 City	县 County	年份 Years	样本数 Number of years
冀东平原	唐山	唐山*	1957—2009	53
		乐亭*	1957—2012	56
黑龙港区	衡水	景县	1971—2007	36
		沧州*	1954—1995	44
	沧州		2007—2008	
		东光	1971—2006	36
		泊头*	1996—2012	17
山前平原 (北-南)	廊坊	廊坊*	1957—2009	53
		保定*	1955—2009	55
	保定	定州	1955—2005	50
		高阳	1960—2005	45
		望都	1971—2005	34
	石家庄	徐水	1959—2008	50
		石家庄*	1955—2009	55
	邢台	邢台*	1954—2009	56
		南宫	1971—2006	36
	邯郸	邱县	1974—2006	33

注：未标注*的气象站仅有逐日降水资料。

Note: Weather stations without * only have daily data of precipitation.

1.2 棉花生育期有效降水量

棉花生育期在年际间、地区间均有差异，河北省棉区大体上终霜期均在 4 月中下旬，初霜期均在 10 月中下旬，各地棉花生产中一般以 4 月 20 日和 10 月 20 日为生育期的起讫点进行相关准备工作，并结合气温状况具体确定播种时间和收花管理工作^[10-11]。据此为便于定量分析棉花生育期的降水量和需水量，本文将河北省棉花生育期确定为 4 月 20 日—10 月 20 日，共 184 d，结合棉花的生育过程^[12]确定 4 月 20 日—4 月 30 日为播种出苗期、5 月 1 日—6 月 10 日为苗期、6 月 11 日—7 月 5 日为蕾期、7 月 6 日—8 月 25 日为花铃期、8 月 26 日—10 月 20 日为吐絮期。播种出苗期、苗期、蕾期、花铃期和吐絮期分别 11、41、25、51 和 56 d。棉花生育期的降水量除考虑棉花播种—收获期的降水量外，

同时将 4 月 10 日—4 月 19 日内的降水量作为前期雨量，以便充分利用降水资源。

田面降水可能以植物截留、填洼、地表径流或深层渗漏的形式损失，将能够保存在作物根系层中用于满足作物腾发需要的那部分降水量称为有效降水量。河北省棉区地形较平坦，当日降水量不太大时，一般不会产生地表径流，大都能储蓄在田间土壤中，本文将 3~50 mm 的日降水量视为有效降水量，当日降水量小于 3 mm 时由于冠层截留对土壤的影响较小，不作为有效降水量^[13]，当日降水量大于 50 mm 以上时取日降水量的 0.8 倍作为有效降水量^[14]。

将历年棉花生育期的有效降水量按从大到小的顺序排序，计算经验频率曲线；并采用水文计算应用最广的皮尔逊 III 型分布曲线，利用配线法计算棉花生育期有效降水量的理论频率曲线；通过频率分析、比较棉花生育期有效降水量的经验频率曲线与皮尔逊 III 型理论分布曲线，以平均计算误差最小为依据确定样本参数，据此分析设计水平年丰水年 $P=25\%$ 、平水年 $P=50\%$ 和枯水年 $P=75\%$ 等不同水文年份棉花生育期的有效降水量。

1.3 棉花需水量

采用作物系数法计算棉花需水量 ET_c

$$ET_c = k_c ET_0 \quad (1)$$

式中， ET_c 为作物需水量，mm/d； ET_0 为参考作物腾发量，mm/d，根据日平均温度、日最大温度、日最小温度、日平均风速、日平均湿度和日照时数等逐日气象资料，利用 FAO 推荐的 Penman—Monteith 公式^[15]计算 ET_0

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + r \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + (1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

式中， R_n 为冠层表面净辐射，MJ/(m²·d)； G 为土壤热通量，MJ/(m²·d)； T 为平均温度，℃； e_s 为饱和水汽压，kPa； e_a 为实际水汽压，kPa； Δ 为饱和水汽压与温度关系曲线在 T 处的切线斜率，kPa/℃； r 为湿度计常数，kPa/℃； U_2 为 2 m 高处的风速，m/s。 K_c 为作物系数，采用 FAO 推荐的分段单值平均作物系数法^[15]、参考中国的相关研究成果^[3-4,16]确定棉花各生育阶段作物系数的多年平均值，其中初始生长确定为 0.3，快速发育期始末分别确定为 0.3 和 0.5，生育中期花铃期最大作物系数确定为 1.25，吐絮期末确定为 0.1，见图 1。采用式 (1) 和式 (2) 根据逐日气象资料计算棉花生育期逐日需水量，统计年需水量。

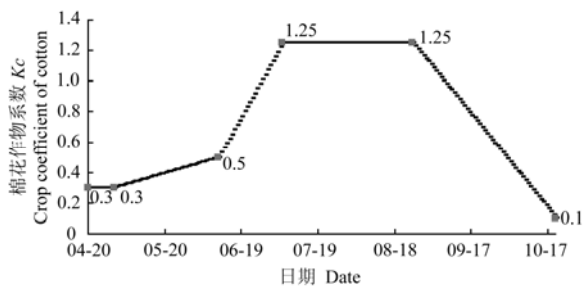


图 1 棉花生育期作物系数
Fig.1 Crop coefficient of cotton

1.4 棉花灌溉需水量和需求指数

考虑到土壤水和地下水对大气降水具有巨大调蓄作用,将作物需水量和有效降水量的差值定义为灌溉需水量 IR ,将灌溉需水量与需水量的比值定义为灌溉需求指数 IDI ,反映作物生长对灌溉的依赖程度^[4]

$$IR = ET_c - P_e \quad IDI = IR / ET_c \quad (3)$$

式中, IR 为作物灌溉需水量, mm; P_e 为作物生育期有效降雨量, mm。根据 1.2 和 1.3 中生育期有效降水量和需水量的计算结果利用式 (3) 计算棉花

生育期灌溉需水量和灌溉需求指数。

1.5 棉花需水量和灌溉需水量的频率分析

采用与降水量相同的频率分析方法,将作物需水量或灌溉需水量按从大到小的顺序排序,计算经验频率曲线;并利用皮尔逊 III 型分布曲线计算需水量或灌溉需水量的理论频率曲线;通过统计和频率分析确定不同水文年份棉花的需水量和灌溉需水量。

2 结果与分析

2.1 棉花生育期有效降水量

棉花生育期有效降水量的多年平均统计结果见表 2。棉花生育期有效降水量多年平均 380.0~509.8 mm,研究区域内平均 436.3 mm,占多年平均棉花生育期降水量的 89.8%,占多年平均年降水量的 82.7%。花铃期有效降水量最大,研究区域平均 232.9 mm,占多年平均棉花生育期有效降水量的 53.4%;其次是吐穗期和蕾期,多年平均有效降水量分别为 74.6 和 67.5 mm,分别占多年平均生育期有效降水量的 17.1%和 15.5%;播种~苗期多年平均有效降水量最少,合计占生育期有效降水量的 12.1%。

表 2 棉花生育期有效降水量 P_e 的多年平均统计结果
Table 2 Average annual effective rainfall P_e in cotton growing period

分区 Regions	气象站 Weather stations	年降水量 Annual precipitation /mm	生育期 降水量 (04-10—10-20) Precipitation in growth period /mm	棉花生育期有效降水量 Effective precipitation in cotton growth period /mm						
				生育期 (04-10— 10-20) Whole growth period	前期雨量 (04-10— 04-19) Before growth period	播种出苗 (04-20— 04-30) Sowing and seedling stage	苗期 (05-01— 06-10) Seedling stage	蕾期 (06-11— 07-05) Bud stage	花铃期 (07-06—08-25) Blossing and boll-forming stages	吐絮期 (08-26—10-20) Boll opening stage
冀东平原	唐山	595.0	561.2	508.4	6.9	9.2	54.4	80.3	278.8	78.8
	乐亭	590.6	551.1	495.5	4.7	12.1	58.2	73.0	267.6	79.9
	平均	592.8	556.2	502.0	5.8	10.7	56.3	76.7	273.2	79.4
黑龙港 区	景县	528.6	485.0	435.0	5.7	12.3	44.0	78.0	230.6	64.4
	沧州	597.2	563.3	509.8	7.2	8.8	55.7	84.5	272.8	80.8
	东光	529.1	482.7	428.8	5.7	10.1	47.3	80.5	220.7	64.5
	泊头	526.1	485.9	436.8	5.2	13.1	40.2	79.6	224.7	74.0
	平均	545.3	504.2	452.6	6.0	11.1	46.8	80.7	237.2	70.9
山前平原 (北- 南)	廊坊	499.6	470.4	423.0	5.4	8.5	40.5	65.4	237.0	66.2
	保定	530.2	489.9	442.4	4.6	9.1	43.3	64.2	247.0	74.2
	定州	495.6	453.6	406.8	5.1	10.0	42.6	52.2	225.6	71.3
	高阳	489.2	448.1	400.0	4.9	9.7	38.3	59.3	219.3	68.5
	望都	498.2	457.1	408.8	3.7	9.3	41.0	65.9	212.0	76.9
	徐水	532.6	490.1	438.1	4.3	9.7	42.4	61.5	245.6	74.6
	石家庄	520.9	477.2	430.5	6.6	8.5	49.5	53.6	222.9	89.4
	邢台	511.3	469.9	419.6	6.1	9.8	45.5	56.2	217.7	84.3
	南宫	475.0	423.9	380.0	5.7	9.1	43.6	60.5	185.7	75.4
	邱县	520.6	467.6	416.8	7.1	10.9	45.3	64.8	218.1	70.6
	平均	507.3	464.8	416.6	5.4	9.5	43.2	60.4	223.1	75.1
区域 统计	最大	597.2	563.3	509.8	7.2	13.1	58.2	84.5	278.8	89.4
	最小	475.0	423.9	380.0	3.7	8.5	38.3	52.2	185.7	64.4
	平均	527.5	486.1	436.3	5.6	10.0	45.7	67.5	232.9	74.6

表 3 给出了棉花生育期有效降水量的频率分析结果, 丰水年、平水年和枯水年有效降水量分别为 462.1~614.4、368.3~495.5 和 281.2~406.5 mm, 均值分别为 525.9、421.4 和 330.5 mm, 丰水年与平水年、枯水年与平水年的有效降水量差值分别为 104.5 和 90.9 mm。

表 3 棉花生育期有效降水量 P_e 的频率分析结果

Table 3 Frequency analysis results of average annual effective rainfall P_e in cotton growing period

分区 Regions	气象站 Weather Stations	均值 Mean	丰水年 Wet year ($P=25\%$)	平水年 Median year ($P=50\%$)	枯水年 Dry year ($P=75\%$)
冀东平原	唐山	508.4	595.8	495.1	406.5
	乐亭	495.5	594.4	482.8	382.8
	平均	502.0	595.1	489.0	394.7
黑龙港区	景县	435.0	516.3	428.8	346.8
	沧州	509.8	614.4	495.9	390.0
	东光	428.8	509.4	415.1	333.3
	泊头	436.8	521.3	430.3	345.2
	平均	452.6	540.4	442.5	353.8
山前平原北-南	廊坊	423.0	513.4	404.8	312.8
	保定	442.4	554.7	430.8	317.6
	定州	406.8	494.8	371.9	281.2
	高阳	400.0	485.5	382.8	295.8
	望都	408.8	483.9	386.9	310.1
	徐水	438.1	536.1	429.2	330.4
	石家庄	430.5	526.8	421.8	324.7
	邢台	419.6	497.6	388.9	308.6
	南宮	380.0	462.1	368.3	285.0
	邱县	416.8	507.4	408.7	317.3
	平均	416.6	506.2	399.4	308.4
区域统计	最大	509.8	614.4	495.9	406.5
	最小	380.0	462.1	368.3	281.2
	平均	436.3	525.9	421.4	330.5

分析研究区域内的降水分布, 包括唐山在内的冀东平原区棉花生育期有效降水量最大, 多年平均约 502 mm, 丰水年、平水年和枯水年分别为 595、489 和 395 mm。包括沧州在内的黑龙港区棉花生育期有效降水量较小, 多年平均 453 mm, 比冀东平原区少 49 mm, 丰水年、平水年和枯水年分别为 540、443 和 354 mm。包括廊坊、保定、石家庄和邢台在内的山前平原区棉花生育期有效降水量多年平均 417 mm, 分别比冀东平原区和黑龙港区低 85 和 36 mm, 丰水年、平水年和枯水年分别为 506、399 和 308 mm。

2.2 参照作物需水量和棉花需水量

河北省棉区多年平均参照作物需水量 ET_0 的计算结果见表 4, 研究区域多年平均年参照作物需水量 ET_0 为 1110.3 mm, 折合 3.0 mm/d; 多年平均棉花生育期参照作物需水量 813.8 mm, 折合 4.5 mm/d, 为多年平均年参照作物需水量的 73.3%。研究区域内包括沧州和泊头在内的黑龙港区参照

作物需水量较大, 棉花生育期内平均为 845 mm; 包括唐山和乐亭在内的冀东平原区较低, 平均为 788 mm; 山前平原区各气象站平均约 811 mm。

表 4 参照作物需水量 ET_0 的多年平均统计结果

Table 4 Average annual reference crop evapotranspiration

分区 Regions	气象站 Weather Stations	ET_0			
		多年平均年 ET_0		棉花生育期 ET_0	
		Average annual ET_0		ET_0 in cotton growth period	
		mm	mm/d	mm	mm/d
冀东平原	唐山	1082.8	3.0	789.1	4.3
	乐亭	1027.1	2.8	786.9	4.3
	平均	1055.0	2.9	788.0	4.3
黑龙港区	沧州	1195.0	3.3	865.7	4.8
	泊头	1138.2	3.1	824.5	4.5
	平均	1166.6	3.2	845.1	4.7
山前平原北-南	廊坊	1111.5	3.0	817.9	4.5
	保定	1096.1	3.0	807.1	4.4
	石家庄	1108.0	3.0	801.1	4.4
	邢台	1123.8	3.1	817.8	4.5
	平均	1109.9	3.0	811.0	4.5
区域统计	最大	1195.0	3.3	865.7	4.8
	最小	1027.1	2.8	786.9	4.3
	平均	1110.3	3.0	813.8	4.5

注: %表示棉花生育期潜在腾发量与多平均年潜在腾发量的比值。

Note: Symbol % means the ratio of reference crop evapotranspiration in cotton growth period to average annual reference crop evapotranspiration.

研究区域棉花需水量 ET_c 的统计结果见表 5, 研究区域棉花需水量 ET_c 多年平均为 648.9 mm, 折合 3.5 mm/d, 其中播种~苗期较小, 分别为 14.4 和 85.8 mm, 折合 1.3 和 2.1 mm/d, 分别占棉花全生育期需水量的 2.2%和 13.2%; 蕾期和花铃期较大, 为需水关键期, 分别为 121.7 和 299.0 mm, 折合 4.9 和 5.9 mm/d, 分别占棉花全生育期需水量的 18.8%和 46.1%; 吐穗期需水量较小, 为 128.1 mm, 折合 2.3 mm/d, 占棉花全生育期需水量的 19.7%。黑龙港区棉花需水量最大, 山前平原区次之, 冀东平原最小, 分别为 619.1、673.6 和 651.4 mm。

研究区域棉花需水量的频率分析表明(表 6) 丰水年、平水年和枯水年棉花需水量分别为 587.8~658.1、602.8~677.3 和 619.9~702.4 mm, 均值分别为 629.9、646.0 和 665.3 mm, 丰水年、平水年和枯水年差值 20 mm 左右。以沧州和泊头为代表的黑龙港区棉花需水量较大, 多年平均 673.6 mm, 丰水年、平水年和枯水年分别为 653.9、669.8 和 689.4 mm; 以唐山和乐亭为代表的冀东平原区棉花需水量较小, 多年平均 619.1 mm, 丰水年、平水年和枯水年分别为 601.4、616.8 和 636.2 mm, 平均比黑龙港区低 53 mm。包括廊坊、保定、石家庄和邢台在内的山前平原区棉花需水量多年平均 651.4 mm, 丰水年、平水年和枯水年分别为 632.2、648.8 和 667.9 mm, 比黑龙港区低 22 mm。

表 5 研究区域棉花需水量 ET_c 的多年平均统计结果

Table 5 Average annual cotton water requirement ET_c of study area

分 区 Regions	气象站 Weather Stations	全生育期 184 d Whole growth period		播种出苗期 11 d Sowing and Seedling stage		苗期 41 d Seedling stage		蕾期 25 d Bud stage		花铃期 51 d Blossing and boll-forming stages		吐絮期 56 d Boll opening stage	
		mm	mm/d	mm	mm/d	mm	mm/d	mm	mm/d	mm	mm/d	mm	mm/d
冀东平原	唐山	632.9	3.4	14.2	1.3	83.7	2.0	115.4	4.6	292.9	5.7	126.9	2.3
	乐亭	605.2	3.3	13.2	1.2	78.0	1.9	109.6	4.4	282.1	5.5	122.3	2.2
	平均	619.1	3.4	13.7	1.3	80.9	2.0	112.5	4.5	287.5	5.6	124.6	2.3
黑龙港区	沧州	683.5	3.7	15.9	1.4	94.7	2.3	128.4	5.1	307.3	6.0	137.9	2.5
	泊头	663.6	3.6	14.1	1.3	86.2	2.1	125.8	5.0	306.2	6.0	131.2	2.3
	平均	673.6	3.7	15.0	1.4	90.5	2.2	127.1	5.1	306.8	6.0	134.6	2.4
山前平原北-南	廊坊	653.3	3.6	14.8	1.3	87.5	2.1	125.1	5.0	299.1	5.9	126.8	2.3
	保定	649.4	3.5	14.2	1.3	85.3	2.1	123.0	4.9	300.7	5.9	126.1	2.3
	石家庄	646.4	3.5	14.0	1.3	83.9	2.0	121.4	4.9	300.9	5.9	126.2	2.3
	邢台	656.5	3.6	14.5	1.3	87.3	2.1	124.7	5	302.8	5.9	127.2	2.3
	平均	651.4	3.6	14.4	1.3	86.0	2.1	123.6	5.0	300.9	5.9	126.6	2.3
区域统计	最大	683.5	3.7	15.9	1.4	94.7	2.3	128.4	5.1	307.3	6.0	137.9	2.5
	最小	605.2	3.3	13.2	1.2	78.0	1.9	109.6	4.4	282.1	5.5	122.3	2.2
	平均	648.9	3.5	14.4	1.3	85.8	2.1	121.7	4.9	299.0	5.9	128.1	2.3

表 6 棉花需水量 ET_c 和灌溉需水量 IR 的频率分析结果

Table 6 Frequency analysis results of cotton water requirement ET_c and cotton irrigation requirement IR

分区 Regions	气象站 Weather Stations	棉花需水量 ET_c cotton water requirement/mm						棉花灌溉需水量 IR cotton irrigation requirement/mm					
		统计参数 Statistical parameters			枯水年 Dry year	平水年 Median year	丰水年 Wet year	统计参数 Statistical parameters			枯水年 Dry year	平水年 Median year	丰水年 Wet year
		均值 Mean	C_v	C_d/C_v				均值 Mean	C_v	C_d/C_v			
冀东平原	唐山	632.9	0.04	14	652.5	630.8	614.9	124.5	1.0	0.2	206.2	120.4	38.4
	乐亭	605.2	0.04	15	619.9	602.8	587.8	109.7	1.5	0.2	217.0	103.5	—
	平均	619.1			636.2	616.8	601.4	117.1			211.6	112.0	—
黑龙江 港区	沧州	683.5	0.05	20	702.4	677.3	658.1	173.7	1.7	0.2	298.7	166.8	41.3
	泊头	663.6	0.03	13	676.3	662.3	649.6	226.8	0.6	1.2	307.6	210.6	128.4
	平均	673.6			689.4	669.8	653.9	200.3			303.2	188.7	84.9
山前平原 北-南	廊坊	653.3	0.05	12	675.1	650.9	628.1	230.3	0.8	0.5	347.2	218.2	100.3
	保定	649.4	0.04	11	662.3	647.5	631.3	207.0	1.2	0.2	368.3	196.9	34.4
	石家庄	646.4	0.03	14	660.7	641.6	632.4	215.9	0.6	0.2	301.7	213.2	127.1
	邢台	656.5	0.04	6	673.3	655	637.1	236.9	0.7	0.2	346.4	232.9	123.0
	平均	651.4			667.9	648.8	632.2	222.5			340.9	215.3	96.2
区域统计	最大	683.5			702.4	677.3	658.1	236.9			368.3	232.9	128.4
	最小	605.2			619.9	602.8	587.8	109.7			206.2	103.5	34.4
	平均	648.9			665.3	646.0	629.9	190.6			299.1	182.8	84.7

注: C_v 和 C_s 分别为棉花生育期有效降水量的变差系数和偏态系数。

Note: C_v and C_s is respectively variation coefficient and skewness coefficient of effective rainfall in cotton growing period.

2.3 棉花灌溉需水量和灌溉需求指数

研究区域棉花灌溉需水量 IR 和灌溉需求指数 IDI 的统计结果见表 7。研究区域棉花灌溉需水量多年平均 190.6 mm, 其中苗期、蕾期、花铃期和吐穗期灌溉需水量分别占全生育期的 19.6%、27.3%、27.8%和 26.0%, 蕾期和花铃期较大, 其次苗期和吐絮期。多年平均棉花全生育期灌溉需求指数 0.29, 苗期和蕾期最大均为 0.43, 吐絮期次之为 0.39, 花铃期最小为 0.18。

包括唐山在内的冀东平原区和包括沧州在内的黑龙港区灌溉需水量较小, 多年平均分别为 117.1 和 200.3 mm, 灌溉需求指数分别为 0.19 和 0.30; 泊头站气象数据年份少由此计算的灌溉需水量和灌溉需求

指数与沧州站相比偏大; 石家庄等山前平原区灌溉需水量多年平均 207.0~236.9 mm, 灌溉需求指数 0.32~0.36, 除廊坊外, 由北向南呈逐渐增大的趋势。

灌溉需水量 IR 的频率分析结果也列在表 6 中, 研究区域平均枯水年、平水年和丰水年分别为 299.1、182.8 和 84.7 mm, 据此计算灌溉需求指数 IDI 分别为 0.45、0.28 和 0.13。冀东平原区和黑龙港区灌溉需水量较山前平原区小, 冀东平原区枯水年、平水年分别为 211.6 和 112.0 mm; 黑龙港区枯水年、平水年和丰水年分别为 303.2、188.7 和 84.9 mm; 石家庄等山前平原区枯水年、平水年和丰水年分别为 340.9、215.3 和 96.2 mm。

表 7 棉花灌溉需水量 IR 和灌溉需求指数 IDI 的多年平均统计结果Table 7 Average annual irrigation requirement IR and irrigation demand index IDI of cotton

分区 Regions	气象站 Weather Stations	灌溉需水量 IR Cotton irrigation requirement/mm						灌溉需水指数 IDI Cotton irrigation demand index					
		全生 育期 (04-20— 10-20)	播种 出苗期 (04-20— 04-30)	苗期 (05-01— 06-10)	蕾期 (06-11— 07-05)	花铃期 (07-06— 08-25)	吐絮期 (08-26— 10-20)	全生 育期 (04-20— 10-20)	播种 出苗期 (04-20— 04-30)	苗期 (05-01— 06-10)	蕾期 (06-11— 07-05)	花铃期 (07-06— 08-25)	吐絮期 (08-26— 10-20)
		Whole growth period	Sowing and Seedling stage	Seedling stage	Bud stage	Blossing and boll-forming stages	Boll opening stage	Whole growth period	Sowing and seedling stage	Seedling stage	Bud stage	Blossing and boll-forming stages	Boll opening stage
冀东 平原	唐山	124.5	5.0	29.3	35.1	14.1	48.1	0.20	0.35	0.35	0.30	0.05	0.38
	乐亭	109.7	1.1	19.8	36.6	14.5	42.4	0.18	0.08	0.25	0.33	0.05	0.35
	平均	117.1	3.1	24.6	35.9	14.3	45.3	0.19	0.2	0.30	0.32	0.05	0.37
黑龙 港区	沧州	173.7	7.1	39.0	43.9	34.5	57.1	0.25	0.45	0.41	0.34	0.11	0.41
	泊头	226.8	1.0	46.0	46.2	81.5	57.2	0.34	0.07	0.53	0.37	0.27	0.44
	平均	200.3	4.1	42.5	45.1	58.0	57.2	0.30	0.26	0.47	0.36	0.19	0.43
山前 平原 北-南	廊坊	230.3	6.3	47.0	59.7	62.1	60.6	0.35	0.43	0.54	0.48	0.21	0.48
	保定	207.0	5.1	42.0	58.8	53.7	51.9	0.32	0.36	0.49	0.48	0.18	0.41
	石家庄	215.9	5.5	34.4	67.8	78	36.8	0.33	0.39	0.41	0.56	0.26	0.29
	邢台	236.9	4.7	41.8	68.5	85.1	42.9	0.36	0.32	0.48	0.55	0.28	0.34
区域 统计	平均	222.5	5.4	41.3	63.7	69.7	48.1	0.34	0.38	0.48	0.52	0.23	0.38
	最大	236.9	7.1	47.0	68.5	85.1	60.6	0.36	0.45	0.54	0.56	0.28	0.48
	最小	109.7	1.0	19.8	35.1	14.1	36.8	0.18	0.07	0.25	0.30	0.05	0.29
	平均	190.6	4.5	37.4	52.1	52.9	49.6	0.29	0.31	0.43	0.43	0.18	0.39

3 结论与讨论

本文基于河北省棉区的气象资料，采用 Penman-Monteith 公式和作物系数法确定棉花需水量，通过频率分析确定不同水文年棉花生育期的有效降水量和需水量，据此分析不同水文年份的灌溉需水量和灌溉需求指数。分析结果表明：

1) 河北省棉花生育期有效降水量、需水量和灌溉需水量的多年平均值分别为 436.3、648.9 和 190.6 mm，灌溉需求指数多年平均 0.29。频率分析表明丰水年 $P=25\%$ 、平水年 $P=50\%$ 和枯水年 $P=75\%$ 棉花生育期有效降水量分别为 525.9、421.4 和 330.5 mm，需水量分别为 629.9、646.0 和 665.3 mm，灌溉需水量分别为 84.7、182.8 和 299.1 mm，灌溉需求指数分别为 0.13、0.28 和 0.45。

2) 河北省冀东平原区、黑龙港区和山前平原区棉花生育期有效降水量多年平均分别为 502.0、452.6 和 416.6 mm，需水量多年平均分别为 619.1、673.6 和 651.4 mm，灌溉需水量多年平均分别为 117.1、200.3 和 222.5 mm，灌溉需求指数多年平均分别为 0.19、0.30 和 0.34，山前平原区灌溉需求指数由北向南呈逐渐增大的趋势。

河北省地处沿海与内陆交接地带，11 个省辖市中 7 个大面积种植棉花，棉区内地貌类型多，降水资源和光热资源空间变异也较大，本文仅以棉区内几个气象站为依据进行了分析，如果增加气象站的个数，研究结果将更为精确。

[参 考 文 献]

[1] Blaney H F, Criddle W D. Determining Consumptive Use and Irrigation water Requirements[M]. US Department of Agriculture, 1962.

[2] 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.

[3] 陈玉民. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 水利电力出版社, 1995.

[4] 刘钰, 汪林, 倪广恒, 等. 中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 6—12.
Liu Yu, Wang Lin, Ni Guangheng, et al. Spatial distribution characteristics of irrigation water requirement for main crops in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(12): 6—12. (in Chinese with English abstract)

[5] 王景雷, 孙景生, 张寄阳, 等. 我国主要棉区水资源状况及灌溉排水发展方向[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(4): 21—25.
Wang Jinglei, Sun Jingsheng, Zhang Jiyang, et al. Water resources and developing directions of irrigation and drainage of main cotton region in China[J]. Journal of irrigation and drainage, 2010, 29(4): 21—25. (in Chinese with English abstract)

[6] 马林, 杨艳敏, 杨永辉, 等. 华北平原灌溉需水量时空分布及驱动因素[J]. 遥感学报, 2011, 15(2): 324—339.
Ma Lin, Yang Yanmin, Yang Yonghui, et al. Spatial and temporal distribution and influencing factors of irrigation requirement of North China Plain[J]. Journal of Remote Sensing, 2011, 15(2): 324—339. (in Chinese with English abstract)

[7] 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(B12): 229—233.
Yang Yanmin, Ouyang Zhu, Wang Shufen. Comparison of cotton growth and water use in north China plain and Xinjiang based on cotton simulation model COTTON2K[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2012, 27(B12): 229—233. (in Chinese with English abstract)

[8] 左余宝, 田昌玉, 唐继伟, 等. 鲁北地区主要作物不同生育期需水量和作物系数的试验研究[J]. 中国农业气象, 2009, 30(1): 70—73.
Zuo Yubao, Tian Changyu, Tang Jiwei, et al. Studies on ET_c and K_c of main crops in Northern Shandong

- Province[J]. Chinese Journal of Agro-meteorology, 2009, 30(1): 70—73. (in Chinese with English abstract)
- [9] 孔箐铨, 张海林, 陈阜, 等. 基于 SIMETAW 模型的北京地区主要作物需水量估算[J]. 中国农业大学学报, 2009, 14(5): 109—115.
- Kong Jingxin, Zhang Hailin, Chen Fu, et al. Estimation of main crop water requirement in Beijing based on SIMETAW model[J]. Journal of China Agricultural University, 2009, 14(5): 109—115. (in Chinese with English abstract)
- [10] 姚树然, 王鑫, 李二杰. 河北省棉花气候适宜度及其时空变化趋势分析[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(5): 24—29.
- Yao Shuran, Wang Xin, Li Erjie. Climatic suitability of cotton and its spatial and temporal trend in Hebei Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(5): 24—29. (in Chinese with English abstract)
- [11] 王恒铨, 梁志隐. 河北省棉花播种适期温度指标的探讨[J]. 河北农业大学学报, 1982, 5(4): 1—14.
- [12] 于振文. 作物栽培学各论(北方本)[M]. 中国农业出版社, 2003.
- [13] 单新兰, 苏占胜, 张智, 等. 宁夏山区春季降水对冬小麦生长发育的影响[J]. 干旱气象, 2012, 30(3): 426—430.
- Shan Xinlan, Su Zhansheng, Zhang Zhi, et al. Impact of spring precipitation on the growing period and production of winter wheat in Ningxia southern mountain region[J]. Journal of Arid Meteorology, 2012, 30(3): 426—430. (in Chinese with English abstract)
- [14] 郭元裕. 农田水利学(第三版)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.
- [15] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirement[Z]. Irrigation and Drainage Paper No.56, Rome: FAO 1998.
- [16] 刘钰, Pereira L S. 对 FAO 推荐的作物系数计算方法的验证[J]. 农业工程学报, 2000, 16(5): 26—30.
- Liu Yu, Pereira L S. Validation of FAO methods for estimating crop coefficients[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2000, 16(5): 26—30. (in Chinese with English abstract)

Analysis of irrigation water requirement and irrigation requirement index for cotton of Hebei province

Liu Yuchun¹, Jiang Hong'an², Li Cundong¹, Huang He³, Pan Zenghui⁴, Chai Chunling¹

(1. Urban and Rural Construction College, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China; 2. Baoding Sino French Water Supply Co., Ltd, Baoding 071051, China; 3. Baoding Meteorology Bureau, Baoding 071000, China; 4. Water Resources and Water Environment Research Department, Hebei Water Conservancy Science Research Institute, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: The analysis of water requirement and irrigation water requirement for crop in different hydrological years can provide a basis for determining the irrigation quota and for optimal water management in crop growing season. Based on some meteorological data in Hebei Province, water requirement and irrigation demand index of cotton were analyzed to provide detailed and targeted data for agricultural water resources planning of Hebei Province and for cotton optimal water management. Cotton water requirement (ET_c) was estimated by using FAO Penman-Monteith equation and crop coefficient method. The average annual value of effective precipitation (P_e), cotton water requirement (ET_c) and cotton irrigation demand (IR) in different cotton growth stages were statistically analyzed. And the effective precipitation (P_e), cotton water requirement (ET_c) and cotton irrigation demand (IR) in different hydrological years were analyzed by P-III distribution frequency calculation with frequency analysis. According to the above calculations, cotton irrigation demand index (IDI), the ratio of cotton irrigation demand (IR) to cotton water requirement (ET_c), was analyzed. Cotton water requirement and cotton irrigation demand index of Eastern Hebei Plain, Heilonggang region and Piedmont Plain of Taihangshan in the study area were also analyzed respectively to provide detailed data for regional water resources planning. The results of cotton effective precipitation (P_e) analysis showed that the average annual effective precipitation in cotton growth period was 436.3 mm, and the effective precipitation in wet year ($P=75\%$), in median year ($P=50\%$) and in dry year ($P=25\%$) was 525.9, 421.4 and 330.5 mm respectively for the study area. The results of cotton water requirement (ET_c) analysis showed that the average annual cotton water requirement for the study area was 648.9 mm, and the cotton water requirement was 629.9, 646.0 and 665.3 mm in wet year ($P=25\%$), median year ($P=50\%$) and dry year ($P=75\%$) respectively. The results of cotton irrigation demand (IR) analysis showed that the average annual cotton irrigation demand was 190.6 mm, and the cotton irrigation demand was 299.1, 182.8 and 84.7 mm in dry year ($P=75\%$), median year ($P=50\%$) and wet year ($P=25\%$) respectively for the study area. According to the above analysis, the average annual cotton irrigation demand index (IDI) for the study area was 0.29, and the cotton irrigation demand index was 0.45, 0.28 and 0.13 in dry year ($P=25\%$), median year ($P=50\%$) and wet year ($P=25\%$) respectively for the study area. Based on the regional analysis of the study area, the average annual effective precipitation for Eastern Hebei Plain, Heilonggang region and Piedmont Plain of Taihangshan was 502.0, 452.6 and 416.6 mm respectively, the average annual cotton water requirement for the three regions was 619.1, 673.6 and 651.4 mm respectively, the average annual cotton irrigation demand for the three regions was 117.1, 200.3 and 222.5 mm respectively, and the average annual cotton irrigation demand index for the three regions was 0.19, 0.30 and 0.34 respectively. Cotton irrigation demand and cotton irrigation demand index for Piedmont Plain of Taihangshan in the study area were in an upward tendency from north district to south district.

Key words: water, irrigation, crops, cotton, water requirement, requirement index, Hebei province

(责任编辑: 曾懿婷)