

近 30 年我国棉花需水特征

马有绚¹ 张 武^{1*} 张立祯²

(¹兰州大学大气科学学院半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州 730000; ²中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘 要 利用 1981—2010 年我国棉花全生育期和各生育阶段降水资料, 分析在不同年降水量保证率条件下, 棉花全生育期降水和需水量的变化特征。结果表明: 我国棉花全生育期降水分布总体稳定少变, 由南至北降水量递减; 棉花全生育期需水量分布情况相似, 新疆地区需水量较全国其他地方多; 降水盈亏 0 毫米线在 35° N 附近, 最大亏缺量在 1000 mm 左右, 最大盈余量在 800~1200 mm。各生育阶段需水量以下降趋势为主, 尤其是开花-吐絮期更为明显, 棉花全生育期需水量 Kendall 倾斜度为 -3.6673~-0.3733。

关键词 降水保证率; 棉花需水量; 降水盈亏

Cotton water requirement character during recent 30 years in China. MA You-xuan¹, ZHANG Wu^{1*}, ZHANG Li-zhen² (¹Ministry of Education Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; ²School of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China).

Abstract: Variation of precipitation in the whole growing period and water requirement of cotton under different levels of annual precipitation assurance from 1981 to 2010 were analyzed based on precipitation data during the whole growing period and each growing stage. The results indicated that the China's precipitation distribution over the whole growing period, in general, was stable but decreased from south to north, and so was the distribution of water requirement, although it was higher in Xinjiang region. The precipitation deficit existed around the 35° N area, the maximum value was about 1000 mm, and the maximum surplus value was between 800 and 1200 mm. The water requirement declined during each growing stage, especially at flowering and boll opening stage, while the Kendall tendency varied from -3.6673 to -0.3733 in the whole growing period of cotton.

Key words: rainfall insurance rate; cotton water requirement; precipitation deficit.

水资源短缺是我国旱地作物种植中面临的重要问题, 尤其在占我国国土面积 40% 左右的干旱、半干旱区, 水资源严重不足是这些地区农作物生产的主要瓶颈。即使在水资源条件较好的地区, 在作物发育期的某些时段农田水分也难以满足作物生长发育的要求。因此, 研究棉花水分需求及亏缺状况可以为农业生产中进行合理的水分调配, 提高水分利用效率提供科学依据^[1-2]。作物需水量系指作物在适宜的土壤水分和肥力水平下, 经过正常生长发育获得高产时的植株蒸腾、棵间蒸发以及构成植株体的水量之和。由于组成植株体的水量一般小于总蒸腾量的

0.2%, 而且其影响因素复杂、不易测定, 因此在生产实践中人们就近似地认为作物需水量等于作物生长发育正常条件下的作物蒸发蒸腾量^[3]。作物需水量大小及其变化规律决定于作物特性、地区自然条件和农业技术措施等^[4-5]。

多年来, 对作物需水量的研究主要采用经验公式法、水量平衡法、微气象学法(包括能量平衡法、空气动力学法、结合 Penman 法和遥感表面温度法)等, 以能量平衡原理为基础的 Penman 公式法, 已成为计算参考作物需水量的一种主要方法, 只需利用常规气象资料便可较为准确地计算出参考作物的需水量^[6]。对于棉花需水量的研究较多, 随着新的种植技术和研究方法的进一步发展, 棉花需水量相关研究内容更是层出不穷。Taghvaeian 等^[7]用两种遥感技术对棉花作物系数进行探究, 并与多种方法获得

本文由国家重大科学研究计划项目(2012CB955302)资助 This work was supported by the National Basic Research Program of China (2012CB955302)。

2015-11-20 Received, 2016-02-25 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wzhang@lzu.edu.cn

的 k_c 值进行对比,用来分析棉花生育期的需水量. Silva 等^[8]在气候变化情景下用超过 30 年的日降水量、作物系数、可能蒸散等数据对巴西东北部旱作系统陆地棉进行了研究.曹秀清等^[3]通过对江淮丘陵地区棉花的需水量与需水规律进行了研究.刘钰等^[9]基于逐日气象资料和作物生育阶段的调查统计资料,采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 方法和作物系数法,计算了 30 种作物的需水量和净灌溉需水量,用实测资料进行了检验,并利用 GIS 相关功能得到主要作物多年平均作物需水量与净灌溉需水量的等值线图.左余宝等^[10-11]通过大田试验,以水量平衡法计算作物需水量、以 Penman-Monteith 公式计算参照作物蒸散量和作物系数.金建华等^[12]运用 3 种试验方法对运城市棉花需水规律进行了研究,得出该市全生育期及各生育期棉花需水量.由于覆膜栽培技术的广泛使用,对于棉花覆膜以后的水分状况研究也比较多,张振华等^[13]依据 FAO Penman-Monteith 公式,对膜下大田作物的需水量及作物系数进行了研究,确定了沙漠绿洲区棉花各生育阶段的作物系数.柴付军等^[14]用田测法对灌溉杂交棉花需水规律进行了研究,同时开展膜下滴灌杂交棉花的灌溉制度研究.

本文利用我国棉花种植区 320 个气象站点 1981—2010 年的常规气象观测、农业气象站棉花生育期观测数据、作物系数等,研究了 1981—2010 年我国棉花全生育期和各生育阶段的降水特征和需水特征,及保证率分别为 25%、50% 和 75% 条件下棉花全生育期降水情况和不同降水保证率下棉花需水量的变化特征,以期对棉田的水利规划、水利工程设计或水资源规划与管理提供一定帮助.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区域

本文选择全国棉花种植区作为研究区域.在研究区域内,根据气象资料以及作物资料的时间序列长度和完整程度,选取 320 个气象台站作为研究站点(图 1).

1.2 资料来源和分析方法

数据资料来源于国家气象局气候信息中心.气象数据为我国棉花种植区 320 个气象站点 1981—2010 年的气象要素值,包括最高温度、最低温度、平均温度、气压、相对湿度等要素.同时包含农业气象站棉花生育期观测数据、作物系数及地理底图.

对气象要素数据根据研究需要进行加工整理

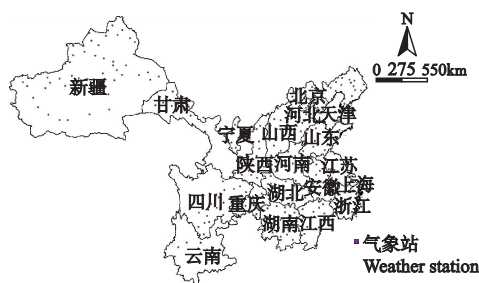


图 1 研究区域与气象站点分布

Fig.1 Location of the study area and distribution of the weather stations.

后,在 GIS 系统的支持下,利用克里金插值法进行插值、提取,绘制全国棉花种植区各个水分指标的等值线图.

1.3 各数据指标的意义和计算方法

某界限降水量在一定时段内出现的次数与同时段降水总次数的百分比称为降水频率,高于(或低于)某界限降水量的频率总和称为降水保证率.降水保证率表示某一界限降水量出现的可靠程度.本文采用经验频率法进行计算.

根据降水保证率,可以将降水年份划分为不同的年型,一般把保证率为 25% 的降雨年份作为湿润年,50% 保证率的降水年份作为平水年,75% 的降水年份作为干旱年.

计算作物需水量最常用的方法是联合国粮农组织推荐的作物系数法^[15],首先计算参考作物蒸散量 ET_0 ,然后利用作物系数 k_c 进行修正,得到作物的需水量 ET_c .

参考作物蒸散量 ET_0 采用联合国粮农组织 (FAO) 于 1998 年推荐的 Penman-Monteith 公式进行计算^[16],其计算的总公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{t + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$$

式中: U_2 为 2 m 高处的风速 ($m \cdot s^{-1}$); e_s 为饱和水汽压 (kPa); e_a 为实际水汽压 (kPa); t 为日平均气温 ($m \cdot s^{-1}$); Δ 为饱和水汽压曲线在空气平均温度下的斜率 ($kPa \cdot ^\circ C^{-1}$); R_n 为地表净辐射 ($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$); G 为土壤通量密度 ($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$); γ 为干湿表常数 ($kPa \cdot ^\circ C^{-1}$); ET_0 为日参考蒸散量 ($mm \cdot d^{-1}$); ET_c 为作物需水量 ($mm \cdot d^{-1}$); k_c 为作物系数.由于公式计算相对比较复杂,式中各项都可进行分步计算.

作物系数 k_c 是指某一阶段的作物需水量与相应阶段内的参考作物蒸发蒸腾量的比值,它反映了

作物本身的生物学特性、产量水平、土壤耕作条件等对作物需水量的影响.它的值不仅受作物种类的影响,而且还与土壤平均含水量、受水分胁迫程度以及是否出现降水和灌溉等过程息息相关.

本文 k_c 的确定主要采用 FAO 推荐的方法,将作物的生育期分为初始生长期、快速发育期、生育中期和成熟期 4 个阶段,然后分别对 4 个阶段的 3 个 k_c 值($k_{c\text{ ini}}$ 、 $k_{c\text{ mid}}$ 、 $k_{c\text{ end}}$)进行计算和确定^[16].棉花作物系数的变化过程见图 2.

从 FAO-56 中查出棉花在标准条件下的作物系数,本研究中 $k_{c\text{ ini}}$ 取 0.35,对非标准条件下的 $k_{c\text{ mid}}$ 和 $k_{c\text{ end}}$,按照下式进行修正:

$$k_{c\text{ mid}} = k_{c\text{ mid(Tab)}} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{\min} - 45)](\frac{h}{3})^{0.3}$$
$$k_{c\text{ end}} = k_{c\text{ end(Tab)}} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RI_{\min} - 45)](\frac{h}{3})^{0.3}$$

式中: $k_{c\text{ mid(Tab)}}$ 和 $k_{c\text{ end(Tab)}}$ 是作物生长中期和后期作物系数的标准值,可通过查表得到,对棉花来说, $k_{c\text{ mid(Tab)}}$ 值的大致范围为 1.15~1.20, $k_{c\text{ end(Tab)}}$ 值的大致范围为 0.50~0.70,本研究中, $k_{c\text{ mid(Tab)}}$ 的值取 1.20, $k_{c\text{ end(Tab)}}$ 的值取 0.70; u_2 为 2 m 高处风速; RH_{\min} 为作物生长期内的最小相对湿度; h 为棉花株高^[17],西北和东北地区棉花株高为 60~70 cm^[18],黄河流域地区为 80~100 cm^[19],长江流域地区为 100~120 cm^[20],本研究中西北和东北地区取 70 cm,黄淮海地区取 100 cm,长江地区取 120 cm.修正后各棉区的 k_c 值见表 1.

作物系数 k_c 是涉及气象、土壤、植株本身的一个综合系数,它综合反映各种环境因素和作物对蒸散发的影响,包括空气动力学阻力、表面阻力、作物品种、作物长势、栽培技术^[21].由于棉花整个生育期

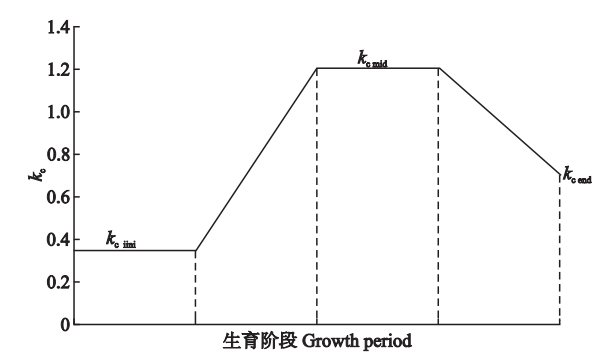


图 2 棉花作物系数(k_c)变化过程
Fig.2 Changing process of crop coefficient (k_c) of cotton.

表 1 各棉区修正的 k_c 值
Table 1 Modified k_c values in different cotton planting regions

棉区 Cotton planting region	$k_{c\text{ ini}}$	$k_{c\text{ mid}}$	$k_{c\text{ end}}$
西北地区 Northwest region	0.35	1.18	0.68
西南地区 Southwest region	0.35	1.07	0.57
长江流域地区 Yangtze River Basin	0.35	1.08	0.58
黄淮海地区 Huang-Huai-Hai region	0.35	1.10	0.60
辽河地区 Liaohe River Basin	0.35	1.11	0.61

较长,在全国的分布也比较广,其全生育期的作物系数变化比较大.陈玉民^[22]研究表明,棉花全生育期作物系数除新疆地区不到 0.7 以外,其他棉区为 0.7~0.97;各生育阶段 k_c 值相差也较大,苗期的作物系数一般在 0.4~0.6,而棉花生长旺盛的花铃期一般在 1~1.4,棉花停止生长前的作物系数一般在 0.6~0.8;彭世彰等^[23]通过试验研究发现,棉花苗期 k_c 值在 0.5 左右,蕾期 0.8 左右,花铃期在 1.3 左右,吐絮期降至 0.7 左右.本文所得 k_c 值,除生长初期为 0.35 以外,生育中期和后期基本与陈玉民^[22]、彭世彰等^[23]的研究结果基本一致.

在计算棉花需水量变化趋势时,采用 Mann-Kendall 趋势检验法.Mann-Kendall 法是关于观测值序列的秩次和时序的秩相关检验.假设 H_0 为时间序列 x_1, x_2, \dots, x_n 服从 n 个独立的、随机变量同分布的样本,那么统计变量 S 的计算公式为:

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(x_i - x_j)$$

式中:sign 为符号函数,当 $x_i - x_j$ 小于、等于或大于零时,sign($x_i - x_j$) 分别为 -1、0 或 1.当 $n > 8$,实测数据服从独立且同分布的假设时,统计变量 S 服从正态分布,其均值和方差满足下式:

$$E(S) = 0$$
$$\text{Var}(S) = n(n-1)(2n-5)/18$$

式中: $E(S)$ 为均值; $\text{Var}(S)$ 为方差.则标准统计变量 Z 为:

$$Z = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{\text{Var}(S)} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ (S+1)/\sqrt{\text{Var}(S)} & S < 0 \end{cases}$$

对于给定置信水平 α ,若 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$,则不接受原假设,即在置信水平 α 上,时间序列数据存在明显的上升或下降趋势.统计变量 $Z > 0$ 时,表示序

列存在上升趋势; $Z<0$ 时,表示序列存在下降趋势. Z 的绝对值 ≥ 1.28 、 1.64 、 2.32 时,分别通过了置信度90%、95%和99%的显著性检验^[24-25].

为评估需水量变化趋势幅度,利用非参数方法来估计趋势变化幅度.假定线性变化趋势函数如下:

$$f(t)=Qt+B$$

式中: Q 为 Kendall 倾斜度; B 为常数.当 Kendall 倾斜度 Q 为正时表示增加趋势,当 Q 为负时表示减少趋势.为了获得 Q 的估计值,首先得计算所有序列对的斜率:

$$Q_k=\frac{x_i-x_j}{i-j}$$

式中: $i>j$.如果时间长度序列为 n ,那么将得到 $N=n(n-1)/2$ 个斜率估计值 Q_k , N 个 Q_k 值从小到大排列,最终的 Kendall 倾斜度 Q 为 Q_k 序列的中位数^[26].

2 结果与分析

2.1 不同降水保证率下棉区全生育期需水量空间分布特征

2.1.1 不同降水保证率下我国棉花全生育期降水量

图3a是全国棉花种植区320个站点30年平均棉花全生育期降水量分布.除新疆外,我国棉花全生育期降水量由东南至西北逐渐递减,新疆和甘肃西北部棉区降水量 <200 mm,甘肃、宁夏和内蒙地区降水量在200~400 mm,华北地区、陕西和四川等地降水量在400~800 mm,湿润的长江流域和西南省区降水量 >800 mm.

图3b和图3c分别是年降水保证率为25%和75%时我国棉花全生育期的降水分布情况.可以看出,我国棉花全生育期降水量分布由南至北递减,纬向分布明显.与30年平均全生育期降水相比,75%保证率下的棉花全生育期降水较少,同值的等值线分布偏南;而25%保证率下的全生育期降水量较多,同值的等值线分布偏北.

2.1.2 不同降水保证率下我国棉花全生育期需水量和水分盈亏

棉花需水量是保证棉花全生育期不缺水状态下的最大需水量.不同棉区需水量受气候、栽培等条件的影响.作物蒸散量的多少受辐射、风速和相对湿度等气象因子的影响,在不同降水保证率下,辐射、风速和相对湿度等气象因子发生了改变,因而棉花需水量也存在一定的差异.

图4a是50%降水保证率下棉花全生育期需水量分布情况,其值为30年平均状态下的需水量,新

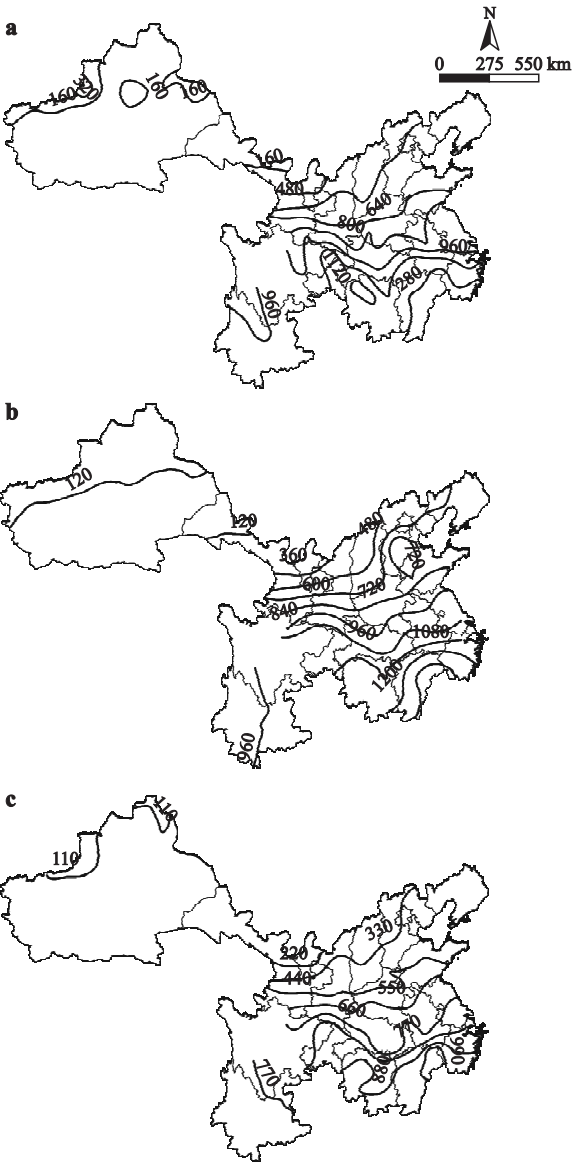


图3 不同降水保证率下棉花全生育期降水量分布
Fig.3 Distribution of total precipitation in the cotton growth period under different precipitation insurance rates (mm).
a) 50%降水保证率 50% precipitation insurance rate; b) 25%降水保证率 25% precipitation insurance rate; c) 75%降水保证率 75% precipitation insurance rate. 下同 The same below.

疆地区由于降水量较少,太阳辐射强烈,作物蒸发蒸腾量较大,所以需水量较全国其他地方多,全生育期需水量在700~1000 mm,而全国其他地区需水量在500~600 mm.图4b是25%降水保证率下棉花全生育期需水量分布,新疆地区需水量多在600~900 mm,个别地区在900 mm以上,甘肃西北部需水量在700 mm左右,其他地区需水量多在480~600 mm.图4c是75%降水保证率下的需水量,新疆地区需水量较大,在700~1000 mm,个别区域需水量在1000 mm以上,其余棉区则在400~600 mm.与50%降水保证率下的需水量相比,75%降水保证率下全

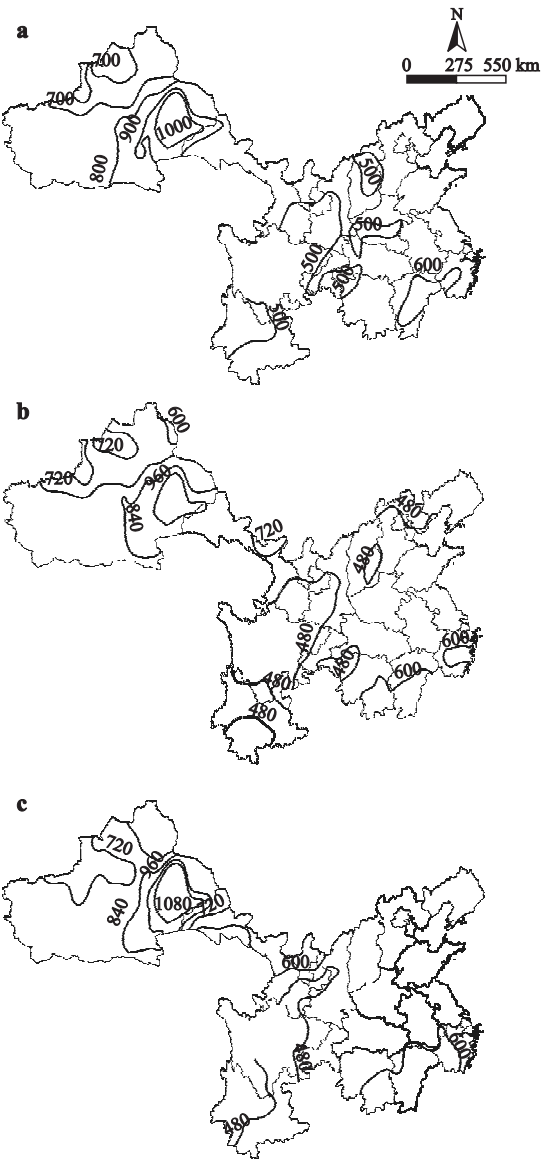


图 4 不同降水保证率下棉花全生育期需水量分布
Fig.4 Distribution of total water demand in the cotton growth period under different precipitation insurance rates (mm).

国棉花需水量较高,新疆地区尤为明显,需水量达 1000 mm 以上,而其他地区不太明显.25%降水保证率下全国棉花需水量较 50%降水保证率下低,新疆地区差异较为明显,其他地区相差不大.

通过对降水量和需水量的分析,可以得到棉花生育期的降水亏缺情况及水分满足程度.不同降水保证率下棉花全生育期降水量和需水量分布情况存在一些差异,其降水盈亏状况总体来看虽然相似,但其亏缺程度存在一定差异.

图 5a 是 50%降水保证率下棉花全生育期水分亏缺量分布,由于新疆地区降水量太少、蒸发较大,降水量几乎可以不计,所以其降水亏缺量与需水量相差无几,为 460~1000 mm,甚至在新疆东北部降

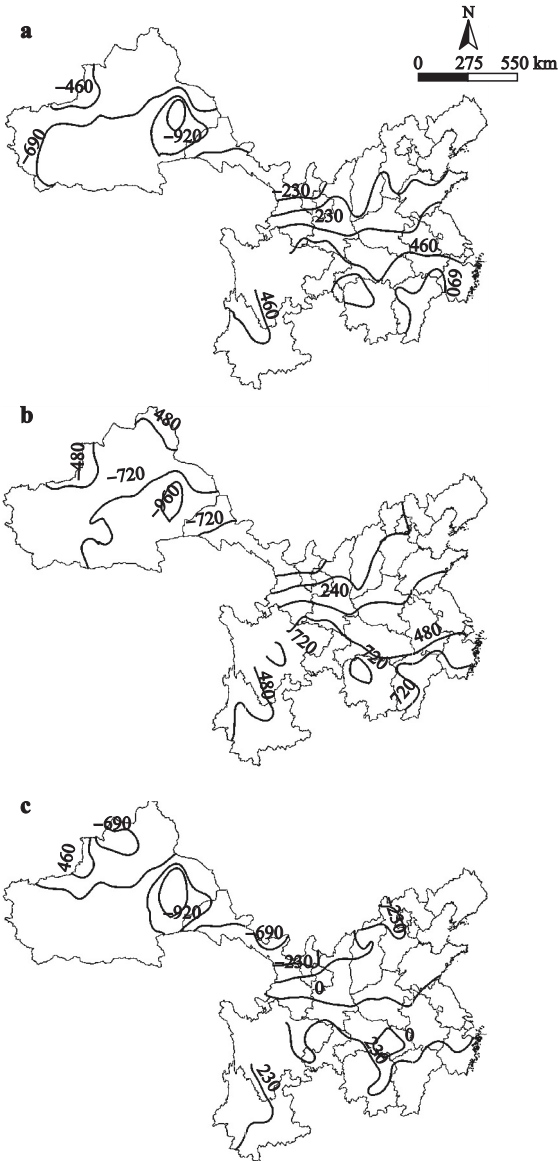


图 5 不同降水保证率下棉花全生育期水分亏缺量分布
Fig.5 Distribution of precipitation deficit in the cotton growth period under different precipitation insurance rates (mm).

水亏缺达 1000 mm 以上.甘肃、宁夏等地降水亏缺量在 230 mm 以上,山西、河北大部分地区降水也有亏缺.长江流域及云南等地降水盈余,江西、浙江和两湖部分地区降水盈余量在 690 mm 以上.总体来说,包括新疆在内的西北及 35°N 以北的棉区降水亏缺,而 35°N 以南地区降水盈余.30°N 以南棉区降水盈余量在 460 mm 以上.

75%降水保证率下棉花全生育期降水盈亏量 0 毫米线在 35°N 以南(图 5c),以降水盈亏量 0 毫米线为界,南部棉花生育期降水充足,降水盈余量在 0~200 mm,部分地区在 230 mm 以上.北部地区降水不足,华北地区降水亏缺量为 0~230 mm,甘肃、宁

夏地区亏缺量较多,0~700 mm.新疆地区缺水相当严重,水分亏缺量在450~1150 mm.50%降水保证率下棉花全生育期水分盈亏0毫米线较75%降水保证率0毫米线偏北,在35°N以北.以降水盈亏量0毫米线为界,南部地区降水盈余较75%降水保证率下的盈余量多,0~690 mm,长江流域棉区降水盈余量在400 mm以上.北部地区水分亏缺,其亏缺量与75%降水保证率下的亏缺量差异不大,新疆地区亏缺量在460~1150 mm.25%降水保证率下棉花全生育期水分盈亏量(图5b)与50%降水保证率下相比水分盈亏0毫米线相近,华北地区0毫米线较50%降水保证率偏北,山东、河北以南地区降水盈余.同样,0毫米线以北降水亏缺,新疆地区较为严重,亏缺量在480~960 mm,比75%和50%降水保证率下的亏缺量稍小.南部地区棉花生育期降水充足,盈余量与50%降水保证率下的相差不大,为0~720 mm.

2.2 棉花各生育期需水量空间分布特征

2.2.1 棉花各生育期降水量空间分布 虽然全国降水集中分布于夏秋季节,但在全国各地棉花生育期存在一定的差异,因而棉花不同生育期降水量存在差异.从图6可以看出,播种期至现蕾期,降水量大致分布南多北少,由南至北递减,长江流域大部分棉区降水量在180~300 mm,江西、浙江、湖南等地区降水量>300 mm,甚至能达500 mm以上.黄淮海地区降水量为60~180 mm,西北甘肃、宁夏等地为60~120 mm,新疆地区降水量较少,大多在60 mm以下.现蕾期至开花期,新疆地区降水较少,大多在30 mm左右,甘肃、宁夏、山西部分地区略多,降水量在30~90 mm,黄淮海地区降水量在90~180 mm,而长江流域地区降水量在180 mm以上,浙江、江西等地能达到300 mm以上.从开花期至吐絮期,新疆降水较少,大多在75 mm以下,甘肃、宁夏和陕西等地降水量稍多,为150~300 mm,长江流域和黄淮海地区降水量差异不大,多在300 mm以上,四川等地降水量能达450 mm以上.此阶段受副热带高压的影响,除新疆以外的地区降水量由南至北纬向分布不明显,从而形成了两个以四川和江苏为中心的降水较高的区域.

比较各个阶段的降水量分布发现,各个棉区降水量,播种至现蕾阶段的降水量较多,现蕾至开花阶段较少,开花至吐絮阶段降水量又增多.而东南江西、湖南等地在棉花生长前期降水量较多,在棉花生长后期降水量减少.西南四川、重庆等地棉花生长前期降水量较少,后期增多.

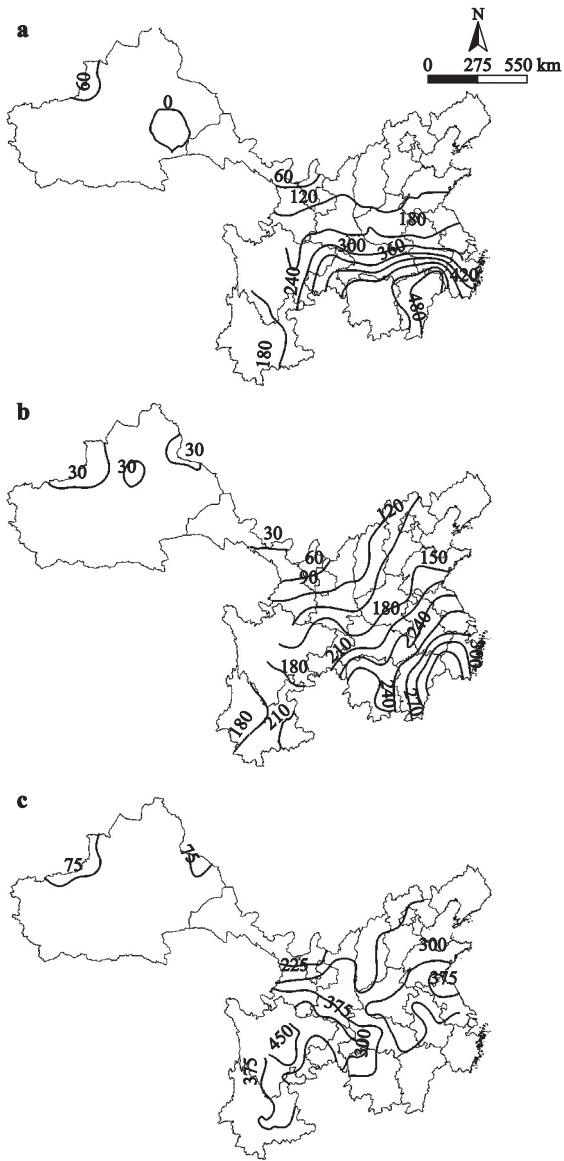


图6 棉花不同生育时期降水量分布
Fig. 6 Precipitation distribution at different cotton stages (mm).

a) 播种-现蕾 From sowing to squaring stage; b) 现蕾-开花 From squaring to flowering stage; c) 开花-吐絮 From flowering to boll opening stage. 下同 The same below.

2.2.2 棉花各生育期需水量空间分布 由图7可以看出,棉花播种至现蕾阶段,全国棉花种植区需水量差异不大,都在同一水平上,多为90~102 mm,两湖、江浙及四川重庆一带需水量较少,在80 mm以下.棉花现蕾至开花阶段,全国需水量差异较为明显.新疆地区需水量较大,在125~175 mm之间,部分地区在175 mm以上.甘肃、宁夏地区需水量稍小,为100~125 mm,其余地区需水量在75~100 mm.棉花开花至吐絮阶段,蒸散量较大,棉花需水量较多,分布差异也较为明显.新疆及甘肃宁夏地区需水量较大,其需水量在300~480 mm,新疆个别区域需水

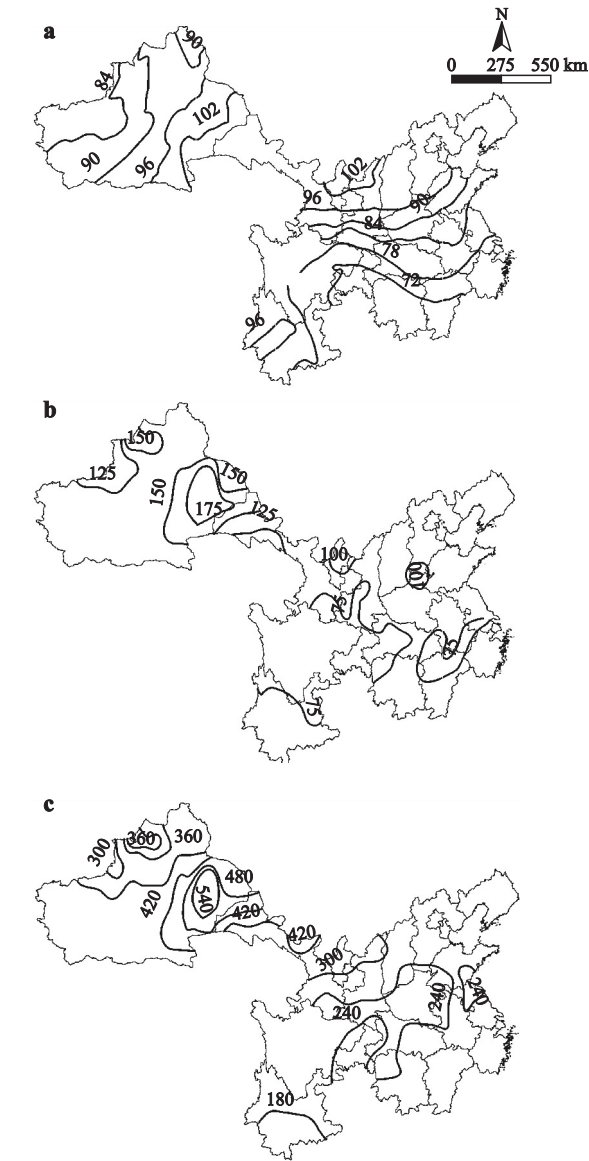


图 7 棉花不同生育时期需水量分布
Fig.7 Distribution of cotton water demand at different growth stages (mm).

量达到 500 mm 以上.其他地区需水量在 200~350 mm.云南省需水量更少,低于 200 mm.

棉花各个生长发育阶段对水分的消耗和需要受气候、栽培条件等的影响很大,但总的来说还是有规律可循.棉花需水量从播种期至吐絮期是不断增加的.播种至现蕾阶段,因需水量最少,全国棉花不同地区需水量均在同一层次,为 70~102 mm;现蕾至开花阶段,气温逐渐升高,营养生长与生殖生长并进,生长加快,因而对水分的要求较上一阶段增多,尤其是新疆地区比较明显,需水量多在 125~175 mm,其余地区增加不明显;开花至吐絮阶段,由于温度高,棉株生长发育旺盛,是棉花需水量最多的时

期,新疆地区需水量多在 400 mm 以上,其余地区多在 200~400 mm.

2.3 各棉区需水量分布特征

表 2 显示我国各大棉区不同生育阶段降水量、需水量、降水盈亏量、降水满足率以及不同降水保证率下全生育期的水分特征.就全国来看,西北地区需水量最多,全生育期需水量为 673.7 mm;其次是长江流域棉区和黄淮海棉区,全生育期需水量分别为 565.4 和 523.9 mm;西南棉区和辽宁地区需水量最少,全生育期需水量分别为 489.6 和 474.2 mm.西北地区棉花各个生育阶段都存在降水亏缺,降水满足率仅为 30%~63.2%,干旱年全生育期降水满足率仅为 25.1%;从整个生育阶段来看,开花至吐絮期需水量最多,为 349.3 mm,而降水量为 104.9 mm,降水严重亏缺,降水盈亏量为 -244.4 mm,满足率仅为 30.0%;其次是现蕾至开花阶段,满足率为 37.2%.西南棉区和长江流域棉区,降水量大于西北棉区,而需水量小于西北棉区,降水盈余,降水满足率均大于 100%,播种至现蕾期盈余最多,西南棉区和长江流域棉区播种至现蕾期降水满足率分别为 283.0%和 468.6%.黄淮海棉区和辽河流域棉区各生育阶段降水盈余,但盈余量远少于长江流域和西南地区,盈余量分别为 17~26 和 53~80 mm,开花至吐絮期降水量刚能满足所需,黄淮海地区和辽河地区棉花开花至吐絮期降水满足率为 106.7%和 119.9%;75%降水保证率下(干旱年),辽河流域和黄淮海棉区全生育期降水亏缺,亏缺量分别为 34.6 和 135.0 mm.

2.4 棉花各生育阶段需水量的年际变化趋势

为了研究 1981—2010 年棉花需水量的年际变化趋势,分别在西北地区、西南地区、长江流域、黄淮海流域和辽河流域五大棉区各选取一个典型站点进行分析.结果显示,各大棉区 5 个典型站点在全生育期的需水量均呈下降趋势(图 8a),其中乌苏、青岛、大连的 Kendall 倾斜度分别为 -0.5183、-3.6673、-2.7130,分别通过了 0.1 和 0.05 水平的显著性检验(表 3).乌苏和武汉在播种-现蕾、现蕾-开花阶段需水量均呈上升趋势(图 8b 和 8c),但均未通过显著性检验;昆明在播种-现蕾阶段需水量呈略微下降趋势,青岛呈显著下降趋势;青岛和大连在现蕾-开花阶段需水量呈显著下降趋势(倾斜度分别为 -0.6803 和 -0.7067,均通过 0.01 水平的显著性检验);开花-吐絮阶段各站点需水量均呈下降趋势(图 8d),除昆明外均通过 0.05 水平的显著性检验.通过几个典型站点的研究发现,棉花整个生育期中,只有播种-现

表 2 各棉区水分特征
Table 2 Cotton water requirement characteristics in different planting regions

棉区 Cotton planting region	省份 Province	生育阶段 Growth period	降水量 Precipitation (mm)	需水量 Water requirement (mm)	降水盈亏 Precipitation deficit (mm)	降水满足率 Precipitation satisfaction rate (%)
西北棉区 Northwest region	新疆、甘肃、宁夏、陕西、内蒙 Xinjiang, Gansu, Ningxia, Shaanxi, Inner Mongolia	播种-现蕾	59.3	93.8	-34.5	63.2
		现蕾-开花	45.1	121.1	-76.0	37.2
		开花-吐絮	104.9	349.3	-244.4	30.0
		全生育期(25%)	249.5	659.9	-410.4	37.8
		全生育期(50%)	244.8	673.7	-428.9	36.3
		全生育期(75%)	171.8	684.5	-512.7	25.1
西南棉区 Southwest region	四川、云南、重庆 Sichuan, Yunnan, Chongqing	播种-现蕾	227.6	80.4	147.2	283.0
		现蕾-开花	170.3	64.3	106.0	264.8
		开花-吐絮	415.6	225.6	190.0	184.2
		全生育期(25%)	1020.8	473.0	547.8	215.8
		全生育期(50%)	1055.6	489.6	566.0	215.6
		全生育期(75%)	777.9	497.0	280.9	156.5
辽河流域棉区 Liaohe River Basin	辽宁 Liaoning	播种-现蕾	151.0	86.2	64.8	175.2
		现蕾-开花	150.8	72.6	78.2	207.8
		开花-吐絮	323.8	270.0	53.7	119.9
		全生育期(25%)	684.9	459.6	225.4	149.0
		全生育期(50%)	658.0	474.2	183.8	138.8
		全生育期(75%)	460.6	495.2	-34.6	93.0
长江流域棉区 Yangtze River Basin	上海、江苏、浙江、湖北、湖南、江西、安徽 Shanghai, Jiangsu, Zhejiang, Hubei, Hunan, Jiangxi, Anhui	播种-现蕾	352.9	75.3	277.6	468.6
		现蕾-开花	245.0	81.7	163.3	299.8
		开花-吐絮	296.1	258.1	38.0	114.7
		全生育期(25%)	1057.6	582.8	506.4	181.5
		全生育期(50%)	1090.0	565.4	524.6	192.8
		全生育期(75%)	771.6	551.2	188.8	140.0
黄淮海棉区 Huang-Huai- hai region	北京、天津、河北、河南、山东、山西 Beijing, Tianjin, Hebei, Henan, Shandong, Shanxi	播种-现蕾	119.7	93.6	25.8	127.5
		现蕾-开花	128.8	88.7	40.1	145.2
		开花-吐絮	270.8	253.7	17.1	106.7
		全生育期(25%)	651.5	509.7	141.7	127.8
		全生育期(50%)	583.0	523.9	59.1	111.3
		全生育期(75%)	403.6	538.6	-135.0	74.9

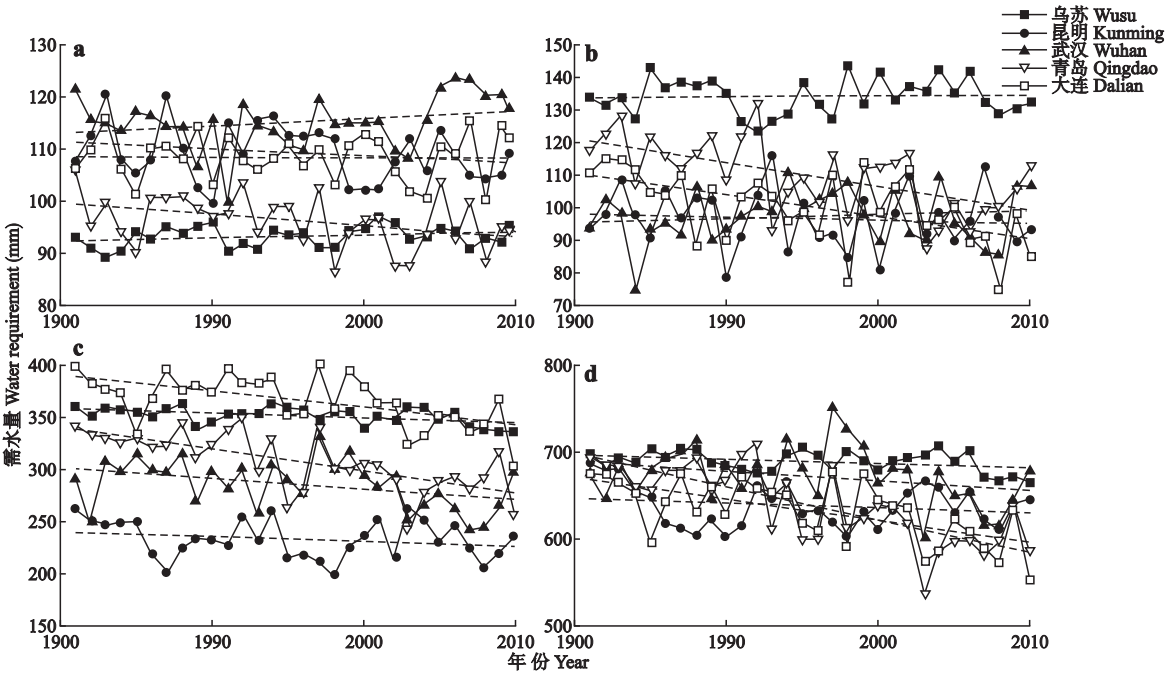


图 8 棉花各个生育期需水量年际变化趋势
Fig.8 Annual variation tendency of cotton water requirement in different growth periods (mm).
d) 全生育期 Whole growth period.

表 3 棉花不同生育阶段需水量变化趋势及显著性检验
Table 3 Variation tendency of cotton water requirement in different growth periods and significance test

棉区 Cotton planting region	站点 Station	生育期 Growth period	M-K 趋势检验 Z 值 M-K trend test Z value	Kendall 倾斜度 Variation tendency of water requirement
西北地区 Northwest region	乌苏	播种-现蕾 Sowing to squaring	1.1775	0.0595
		现蕾-开花 Squaring to flowering	0.1427	0.0288
		开花-吐絮 Flowering to boll opening	-2.5334 * * *	-0.4666
		全生育期 The whole growth period	-1.6057 *	-0.5183
西南地区 Southwest region	昆明	播种-现蕾 Sowing to squaring	-1.0348	-0.1421
		现蕾-开花 Squaring to flowering	-0.8564	-0.1557
		开花-吐絮 Flowering to boll opening	-1.2132	-0.5534
		全生育期 The whole growth period	-0.6779	-0.3733
长江流域 Yangtze River Basin	武汉	播种-现蕾 Sowing to squaring	0.9634	0.0862
		现蕾-开花 Squaring to flowering	0.3211	0.0999
		开花-吐絮 Flowering to boll opening	-2.1409 * *	-1.1536
		全生育期 The whole growth period	-1.6057 *	-0.8226
黄淮海流域 Huang- Huai-Hai region	青岛	播种-现蕾 Sowing to squaring	-1.9268 * *	-0.2270
		现蕾-开花 Squaring to flowering	-2.9616 * * *	-0.6803
		开花-吐絮 Flowering to boll opening	-3.8893 * * *	-2.0245
		全生育期 The whole growth period	-4.2105 * * *	-3.6673
辽河流域 Liaohe River basin	大连	播种-现蕾 Sowing to squaring	0.1427	0.0095
		现蕾-开花 Squaring to flowering	-3.1757 * * *	-0.7067
		开花-吐絮 Flowering to boll opening	-3.0330 * * *	-1.5812
		全生育期 The whole growth period	-3.7109 * * *	-2.7130

* $P<0.1$; ** $P<0.05$; *** $P<0.01$.

蕾和现蕾-开花阶段的需水量有略微上升的变化趋势,其余均呈下降趋势,而且开花至吐絮阶段的需水量下降更为明显.

3 讨 论

30 年来,五大棉区典型站点的全生育期需水量主要呈下降趋势,这与崔日鲜等^[27]、顾晶等^[28]的研究结果一致.各个生育期需水量也以下降为主,尤其是开花-吐絮阶段更为明显,各生育阶段的变化趋势存在一些差异,这与王鹤龄等^[29]的研究结果不同.存在差异的原因可能与研究区域典型站点的选取和

采样年份等因素有关.棉花需水量受气候、土壤、品种、栽培条件等影响,在时间、空间上都有一定的变化.从多年平均来看,由于新疆地区作物蒸发蒸腾量较大,所以需水量较全国其他地方多,全生育期需水量在 700~1000 mm,而其他棉区需水量在 500~600 mm,这与王景雷等^[30]的研究结果总体分布趋势一致,但各棉区需水量范围存在差异,存在差别的原因可能与研究区代表站点选取、资料序列长度的差异和各大棉区划分有关.左余宝等^[11]研究表明,研究区棉花覆膜栽培比露天栽培生育期内的作物需水量减少 101.5 mm,说明多年来全国各地棉花的品种、种植密度、种植方式和覆盖方式的重大变化,对棉花的需水特征产生了重要的影响.

本研究表明,西北地区棉花各个生育阶段都存在降水亏缺,开花至吐絮期需水量最多,降水严重亏缺;西南棉区和长江流域棉区降水盈余;黄淮海和辽河流域棉区降水基本能满足棉花生育期的需求.利用本文研究结果,结合我国棉花需水量、降水盈亏量的空间分布和需水量变化趋势,以及各个生育时期的需水特征,可以合理、科学地分配各个生育阶段的灌溉量,达到充分利用并节约灌溉水资源的目的.比如,西北地区降水量亏缺严重,整个棉花生育期(尤其是开花至吐絮阶段)都需要进行灌溉或者采取保墒措施,应根据各个生育阶段的需水量而确立适当的灌溉定额,杜绝大水漫灌;立体种植、膜下滴灌等也是节水保墒的重要方法.西南棉区和长江流域棉区降水较多,但土壤水分的过饱和状态不利于棉苗恢复根系活力和加快转化生长,因此在降水盈余较多的阶段(如播种、现蕾期)应注意清沟理墒、排涝降渍.

各个气象因子的综合作用会引起需水量的变化,各因子的贡献也存在区域差异.受全球气候变暖的影响,区域气候特征,包括日照时数、降水量、空气湿度等出现明显的变化,这些变化又导致作物需水量的变化^[31].研究表明,相对湿度的增加、日照的减少和风速的降低是造成作物需水量下降的主要原因;相对湿度的增加造成土壤湿度的增加,同时降低田间温度,减少蒸发;日照的减少使到达地面的能量减弱,导致地面蒸发减少;风速的降低使空气与土壤水分的交换强度变低,有利于水分的保持^[25-32].李萍等^[32]研究表明,灌区气温的上升、湿度的下降、降水量的减少以及日照时数的增大使得作物需水量明显增大;刘晓英等^[33]认为,近 50 年日照和风速的减小是华北作物需水量下降的主要原因;王鹤龄等^[29]

认为,气候变暖对河西绿洲灌区棉花需水量的影响较大。

樊引琴等^[34]和刘钰等^[16]研究表明,通过对FAO-56提供的作物系数法计算的作物需水量与实际作物需水量十分接近,初步证明在缺少实测资料的情况下可以采用FAO推荐的方法确定主要作物的作物系数。但齐述华等^[35]认为,作物系数主要受植被生长状况的影响和控制,其次是反照率、气象因子的影响,它与作物生长状况直接相关,仅根据作物生长阶段确定作物系数存在不合理性;李金华等^[36]对甘肃张掖地区不同种植模式的需水特征和作物系数分析结果也表明,试验值与FAO推荐值相差较大。因此,根据试验资料确定的棉花作物系数 k_c 才具有较好的代表性与实用性。FAO推荐的作物系数主要通过北美的田间试验得到,其试验地气候特点、作物品种以及作物方式与我国差异较大,所得结果可能与实际值存在一定的差异。本文由于缺少作物系数 k_c 试验数据,根据各地气候条件,采用FAO推荐的作物系数值,虽对棉花全生育期和各个生育时期的作物系数进行了订正,但所得结果可能与实际值存在一定差异,在以后的研究中需分地区进行进一步验证。

4 结 论

我国棉花全生育期降水分布由东南至西北降水量递减。新疆和甘肃西北部降水量 <200 mm,湿润的长江流域和西南省区降水量 >800 mm。不同降水保证率下棉花全生育期需水量分布情况相似。不同降水保证率下,降水盈亏0毫米线均在 35° N附近。与平水年(50%保证率)相比,湿润年(25%保证率)降水盈亏0毫米线偏北,干旱年(75%保证率)0毫米线偏南。

棉花各个生长发育阶段,对水分的消耗和需要存在差异,需水量从播种期至吐絮期是不断增加的。50%降水保证率下(平水年),棉花播种至现蕾阶段的降水量较多,需水量最少,在 $70\sim102$ mm;现蕾至开花阶段的降水较少,但对水分的要求较上一阶段增多,尤其是新疆地区,需水量多在 $125\sim175$ mm;开花至吐絮阶段是棉花需水量最多的时期,新疆地区需水量达400 mm以上,其余地区多在 $200\sim400$ mm。

1981—2010年,五大棉区典型站点的全生育期需水量变化趋势(Kendall 倾斜度)在 $-0.3733\sim-3.6673$,主要呈下降趋势;各个生育期需水量也以

下降为主,尤其是开花-吐絮阶段更为明显。

参考文献

- [1] Li Y-L (李应林), Gao S-H (高素华), Guo J-P (郭建平), *et al.* The analysis of water supply and demand for crops of dry cropland in China and improving countermeasures. *Climatic and Environmental Research* (气候与环境研究), 2004, **9**(2): 331–341 (in Chinese)
- [2] Shen X-J (申孝军), Sun J-S (孙景生), Li M-S (李明思), *et al.* Real-time irrigation forecast of cotton mulched with plastic film under drip irrigation based on meteorological date. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2015, **26**(2): 443–449 (in Chinese)
- [3] Cao X-Q (曹秀清), Pan Q (潘强). Specific property of water requirement of cotton and the effect of the irrigation in the drought area of Jianghuai Hill on the cotton yield. *Anhui Agricultural Sciences* (安徽农业科学), 2006, **34**(4): 639–640 (in Chinese)
- [4] Ji X-J (姬兴杰), Cheng L (成林), Fang W-S (方文松). Estimating the impacts of future climate change on water requirement and water deficit of winter wheat in Henan Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2015, **26**(9): 2689–2699 (in Chinese)
- [5] Zhang H-X (张和喜), Chi D-C (迟道才), Liu Z-X (刘作新), *et al.* The research progress of crop water requirement and water consumption. *Modern Agricultural Science and Technology* (现代农业科技), 2006(3): 52–54 (in Chinese)
- [6] Han W-F (韩伟锋), Wu J-C (武继承), He F (何方). Summarization on researches on the crop water requirement. *Journal of North China Institute of Water Resources and Hydropower* (华北水利水电学院学报), 2008, **29**(5): 30–33 (in Chinese)
- [7] Taghvaeian S, Neale CMU, Santos CACD, *et al.* Two different remote sensing techniques for monitoring crop coefficient and water requirement of cotton. *Remote Sensing and Hydrology*, 2012, **352**: 89–92
- [8] Silva MT, Silva VPR, Azevedo PV. Cultivation of upland cotton in the rainfed system in Northeastern Brazil in the climate change scenario. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental*, 2012, **16**: 80–91
- [9] Liu Y (刘钰), Wang L (汪林), Ni G-H (倪广恒), *et al.* Spatial distribution characteristics of irrigation water requirement for main crops in China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2009, **25**(12): 6–12 (in Chinese)
- [10] Zuo Y-B (左余宝), Tian C-Y (田昌玉), Tang J-W (唐继伟), *et al.* Studies on ET_c and K_c of main crops in Northern Shandong Province. *Chinese Journal of Agrometeorology* (中国农业气象), 2009, **30**(1): 70–73 (in Chinese)

- [11] Zuo Y-B (左余宝), Pang H-C (逢焕成), Li Y-Y (李玉义), *et al.* Effects of plastic mulching on ET_c , K_c and WUE of cotton in Northern Shandong Province. *Chinese Journal of Agrometeorology* (中国农业气象), 2010, **31**(1): 37–40 (in Chinese)
- [12] Jin J-H (金建华), Xie A-G (解爱国), Wang Y-R (王仰仁), *et al.* Study on cotton water requirement law in Yuncheng. *Yellow River* (人民黄河), 2011, **33**(9): 98–100 (in Chinese)
- [13] Zhang Z-H (张振华), Cai H-J (蔡焕杰), Yang R-Y (杨润亚). Evapotranspiration estimation model for film-mulched and drip-irrigated crop under water stress condition. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2005, **23**(5): 148–151 (in Chinese)
- [14] Chai F-J (柴付军), Cheng P (程 鸿), Guo J-G (郭建国), *et al.* Research on dripping irrigation hybrid cotton water requirement and irrigation system test. *Xinjiang Farmland Reclamation Science & Technology* (新疆农垦科技), 2010, **33**(5): 59–60 (in Chinese)
- [15] Allen RG, Smith M, Pereira LS, *et al.* An update for the calculation of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin*, 1994, **43**: 35–92
- [16] Liu Y (刘 钰), Pereira LS. Validation of FAO methods for estimating crop coefficients. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2000, **16**(5): 26–30 (in Chinese)
- [17] Allen RG, Pereira LS, Raes D, *et al.* Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 1998
- [18] Chen G-W (陈冠文). A simulation model for dynamics of cotton height and prediction. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2008, **24**(10): 211–216 (in Chinese)
- [19] Mao L-L (毛丽丽). Crop Growth and Yield Affected by Plant Density and Mepiquat Chloride in Relay Inter-cropped Cotton. PhD Thesis. Beijing: China Agricultural University, 2015 (in Chinese)
- [20] Li Y (李 雨). Simulation of Above-Ground Morphogenesis and Square-Boll Abcission of Cotton. Master Thesis. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013 (in Chinese)
- [21] Chen Q-F (陈秋帆), Dai X-M (代兴梅), Chen J-S (陈劲松), *et al.* The different response of potato plant height to FAO-56 corrected crop coefficients and measured crop coefficients. *Jiangsu Agricultural Sciences* (江苏农业科学), 2015, **43**(10): 128–130 (in Chinese)
- [22] Chen Y-M (陈玉民). China's Major Crop Water Requirement Contours Research. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1993 (in Chinese)
- [23] Peng S-Z (彭世彰), Suo L-S (索丽生). Water requirement model for crop under the condition of water-saving irrigation. *Journal of Hydraulic Engineering* (水利学报), 2004(1): 17–21 (in Chinese)
- [24] Zhang S-L (张盛霖), Deng G-Y (邓高燕), Huang Y-Q (黄勇奇). Implement and application of Man-Kendall test method in Excel [EB/OL]. (2014-06-27) [2016-01-14]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201406-448> (in Chinese)
- [25] Zeng L-H (曾丽红), Song K-S (宋开山), Zhang B (张 柏). Spatial and temporal structure of water deficit over Northeast China during the period of 1951–2008. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2011, **26**(5): 858–870 (in Chinese)
- [26] Zhao L-N (赵丽娜), Song S-B (宋松柏), Hao B (郝博), *et al.* Identification of annual runoff series trend. *Journal of Northwest A&F University* (Natural Science) (西北农林科技大学学报: 自然科学版), 2010, **38**(3): 194–198 (in Chinese)
- [27] Cui R-X (崔日鲜), Chen M-L (陈明利). Spatial and temporal variation analysis of rainfall and crop water requirements of cotton in Shandong. *Journal of Qingdao Agricultural University* (Natural Science) (青岛农业大学学报: 自然科学版), 2014, **31**(4): 255–265 (in Chinese)
- [28] Gu J (顾 晶), Lu J (卢 健), Jiao X-Y (缴锡云), *et al.* The impacts of climate change on cotton water requirements in Heilonggang Basin in recent 50 years. *Jiangsu Agricultural Sciences* (江苏农业科学), 2015, **43**(2): 115–117 (in Chinese)
- [29] Wang H-L (王鹤龄), Niu J-Y (牛俊义), Wang R-Y (王润元), *et al.* Impact of climate change on water requirement of main crops in irrigated oasis of Hexi corridor. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 2011, **20**(5): 245–251 (in Chinese)
- [30] Wang J-L (王景雷), Sun J-S (孙景生), Zhang J-Y (张寄阳), *et al.* Water resources and developing directions of irrigation and drainage of main cotton region in China. *Journal of Irrigation and Drainage* (灌溉排水学报), 2010, **29**(4): 21–25 (in Chinese)
- [31] Song N (宋 妮), Sun J-S (孙景生), Wang J-L (王景雷), *et al.* Temporal and spatial variation of water requirement of winter wheat and its influencing factors in Henan Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2014, **25**(6): 1693–1700 (in Chinese)
- [32] Li P (李 萍), Wei X-M (魏晓妹). Impacts of climate change on agriculture water requirement in irrigation district. *Journal of Water Resources and Water Engineering* (水资源与水工程学报), 2012, **23**(1): 81–85 (in Chinese)
- [33] Liu X-Y (刘晓英), Lin E-D (林而达). Impact of climate change on water requirement of main crops in North China. *Journal of Hydraulic Engineering* (水利学报), 2004(2): 77–82 (in Chinese)

[34] Fan Y-Q (樊引琴), Cai H-J (蔡焕杰). Comparison of crop water requirements computed by single crop coefficient approach and dual crop coefficient approach. *Journal of Hydraulic Engineering* (水利学报), 2002(3): 50-54 (in Chinese)

[35] Qi S-H (齐述华), Li Z-Z (李子忠), Wang C-Y (王长耀). Retrieving crop coefficient for cotton under different growth status with Landsat ETM⁺ image. *Journal of China Agricultural University* (中国农业大学学报), 2007, 12(3): 19-24 (in Chinese)

[36] Li J-H (李金华), Yang X-G (杨晓光), Cao S-Y (曹

诗瑜), *et al.* Water requirement and crop coefficient of different planting patterns in Zhangye Area of Gansu Province. *Acta Agriculturae Jiangxi* (江西农业学报), 2009, 21(4): 17-20 (in Chinese)

作者简介 马有绚,女,1990年生,硕士研究生. 主要从事大气辐射与大气遥感和气候变化研究. E-mail: mayx13@lzu.edu.cn

责任编辑 张凤丽