

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.15.0083



## 滇东北作物耗水特性及影响因素

万梦丹, 王露, 张岩, 刘小刚, 杨启良, 吴昊

(昆明理工大学现代农业工程学院, 云南 昆明 650500)



万梦丹

**摘要:** 基于滇东北地区3个气象站点(会泽站、昭通站、沾益站)1955—2013年逐日气象资料,采用FAO-56 Penman-Monteith公式,计算并分析滇东北地区水稻、春玉米和冬小麦全生育期需水量及其变化趋势,同时采用偏相关分析和逐步回归分析探讨各气象因子对主要粮食作物需水量影响的程度。结果表明:昭通站主要粮食作物需水量随时间呈不同程度减少,每10 a水稻需水量减少10.07 mm,春玉米减少1.44 mm,冬小麦减少1.06 mm。而其他站点呈增加趋势,水稻需水量每10 a分别增加8.85、4.48 mm,春玉米分别增加8.38、4.57 mm,冬小麦分别增加7.39、3.10 mm。3个站点同一种作物各生育阶段需水量规律基本一致,水稻各生育期需水量从大到小依次为:分蘖,拔节,抽穗,乳熟,黄熟,返青;玉米的依次为:拔节,灌浆,苗期,孕穗,成熟;小麦的依次为:乳熟,开花,成熟,苗期。日照和平均风速是影响水稻和玉米需水量最主要的气象因子,且呈显著正相关关系,就各站点而言,影响冬小麦需水量的气象因子存在差异,其中会泽站和沾益站同日照时数和平均气温呈显著正相关,而昭通站与平均湿度呈显著负相关,同日照时数呈显著正相关关系。

**关键词:** 作物需水量;滇东北;气候因素;偏相关;逐步回归

**中图分类号:** S274 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2015)08-0708-08

万梦丹, 王露, 张岩, 等. 滇东北作物耗水特性及影响因素[J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33(8): 708-715.

Wan Mengdan, Wang Lu, Zhang Yan, et al. Characteristics and influencing factors of crop water requirements in northeastern Yunnan[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering(JDIME), 2015, 33(8): 708-715. (in Chinese)

## Characteristics and influencing factors of crop water requirements in northeastern Yunnan

Wan Mengdan, Wang Lu, Zhang Yan, Liu Xiaogang, Yang Qiliang, Wu Hao

(Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China)

**Abstract:** Based on daily meteorological data from three typical meteorological stations (Huize, Zhaotong and Zhanyi stations) during 1955—2013, rice, spring maize and winter wheat water requirements were calculated by FAO-56 Penman-Monteith equation and their changing trends were analyzed; simultaneously the influence of meteorological factors on main crops water requirements were probed by partial correlation and stepwise regression analysis. The results show that at Zhaotong station, the main crops water requirements decrease in various degree with the time. An decreasing tendency of rice, spring maize and winter wheat is 10.07 mm/10 a, 1.44 mm/10 a and 1.06 mm/10 a, respectively. However, the main crops water requirements at other stations show an increasing trend. Rice water requirements at Huize and Zhanyi stations are increased by 8.85 mm/10 a and 4.48 mm/10 a, respec-

收稿日期: 2015-04-16; 网络出版时间: 2015-07-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20150714.2033.011.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51109102, 51379004, 51469010); 云南省应用基础研究资助项目(2014FB130, 2013FB024); 云南省教育厅科学研究基金资助重点项目(2011Z035)

作者简介: 万梦丹(1990—), 女, 江西上饶人, 硕士研究生(wmd202@126.com), 主要从事水资源高效利用研究。

刘小刚(1977—), 男, 甘肃庆阳人, 副教授, 博士(通信作者, liuxiaogangjy@126.com), 主要从事水资源高效利用研究。

tively; spring maize water requirements are increased by 8.38 mm/10 a and 4.57 mm/10 a, respectively; winter wheat water requirements are increased by 7.39 mm/10 a and 3.10 mm/10 a, respectively. Moreover, the water requirements of the same crop during different growth stages at the three stations are similar. The decreasing order of rice water requirements at every growth stage is tillering > jointing > earing > milk > yellow maturity > turning green; for spring maize the decreasing order is jointing > grouting > seeding > booting > maturity; for winter wheat the decreasing order is milk > flowering > maturity > seeding. The influences of different meteorological factors on crop water requirements are different. Sunshine and mean wind speed are main factors, which have a significant positive correlation with rice and spring maize water requirements. The climatic factors which affect winter wheat water requirements are different for every station. The winter wheat water requirements at Huize and Zhanyi stations have a significantly positive correlation with mean temperature and sunshine hours, while those at Zhaotong station have a significant positive correlation with sunshine hours, but a significant negative correlation with relative humidity.

**Key words:** crop water requirement; northeastern Yunnan; meteorological factors; partial correlation; stepwise regression

作物需水量是在正常的发育状况和适宜的水肥条件下,高产时作物植株蒸腾、裸间蒸发以及构成植株体所需水量之和<sup>[1]</sup>,受作物生理和生物特性、气象条件、土壤水分状况等综合因素的影响<sup>[2]</sup>。作为农田水利规划、设计和灌溉用水管理的重要依据,作物需水量长期以来深受水利及农业科学界重视<sup>[3-7]</sup>。国内外学者对作物需水量变化特征及气候变化对耗水量的影响研究较多。刘宏谊等<sup>[8]</sup>统计分析了1960—2000年甘肃省主要粮食作物生育期内逐日需水量的变化特征和不同作物生育期日均需水量的变化规律,研究表明作物需水量在近40 a内呈现下降趋势,开花至乳熟期为需水高峰期。方文松等<sup>[9]</sup>发现黄淮平原冬小麦灌溉需水量等值线基本呈纬向分布,自南向北增加。Robert等<sup>[10]</sup>研究气候变化对亚洲地区作物的影响,结果发现温度升高1.5℃,农作物略有增产;而温度升高3℃会导致840亿美元的经济损失。Chattaraj等<sup>[11]</sup>预测发现沙特阿拉伯阿尔朱夫地区从2011—2050年温度每升高1℃,作物需水量平均增加2.9%;作物需水量最主要影响气象因子是平均气温,受降雨量影响很小。王宏等<sup>[12]</sup>采用FAO推荐的彭曼公式和气象资料以及生育期资料,计算承德玉米生育期需水量,并通过回归分析法研究了其需水规律,进而得到影响春玉米需水量的主要气象因子。刘晓英等<sup>[13]</sup>利用FAO推荐的间接计算方法计算了华北地区6个站点近60 a主要作物需水量,分析了气候变化对作物需水量的影响程度,结果发现温度上升1~4℃,可使整个地区冬小麦、夏玉米和棉花需水量均呈增加

的趋势;棉花的需水量增加1.35~16.50亿m<sup>3</sup>。符娜等<sup>[14]</sup>研究了元谋灌区不同时间尺度下小粒咖啡需水规律,结果发现近55 a来小粒咖啡需水量呈波动递减趋势,并且风速和日照时数是影响小粒咖啡需水量的最主要气象因子。

国内作物需水量研究主要集中在平原地区,而平原地区与滇东北地区的气候特征差异较大,同时气候持续变化必然影响到主要粮食作物对水分的需求。因此,文中利用滇东北地区3个典型气象站点1955—2013年逐日的气象资料,计算主要粮食作物(水稻、春玉米和冬小麦)全生育期需水量,并分析各站点作物需水量的变化趋势。同时确定作物需水量的主要影响因素,旨在为滇东北地区农作物合理配置灌水资源和提高水分利用效率提供理论依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究站点概况

滇东北地处云贵高原地区,地势南高北低。北部倾向四川盆地,南部属云贵高原主体,属低纬高原季风气候。滇东北地区是云南省主要粮食产区,主要粮食作物有水稻、小麦和玉米。在研究区选取3个有代表性站点,分别是会泽(103°17'E,26°25'N)、昭通(103°43'E,27°21'N)和沾益(103°50'E,25°35'N)。

### 1.2 数据来源

研究数据选取中国气象科技共享网提供的会泽、昭通以及沾益站1955—2013年逐日地面气象资料,包括日降雨量、日平均水汽压、日平均气压、日

平均气温、日最高气温、日平均气温、日照时数、日相对湿度等。

## 2 研究方法

### 2.1 作物需水量计算

#### 2.1.1 作物需水量计算方法

作物需水量的估算在水资源开发中占重要的作用,也是水利工程建设等所需要的基础数据,文中采用间接计算法,通过FAO推荐的彭曼公式和作物系数 $K_c$ 计算,即

$$(ET_c)_j = \sum K_{ci} ET_0, \quad (1)$$

式中: $(ET_c)_j$ 为第 $j$ 种作物全生育期的需水量,mm; $K_{ci}$ 为第 $j$ 种作物第 $i$ 月的作物系数; $ET_0$ 为参考作物蒸散量,mm/d。

#### 2.1.2 $ET_0$ 计算方法

1988年FAO-56分册推荐的Penman-Monteith方程是以能量平衡和空气动力学原理为基础,具有较高的计算精度,被国内外研究人员广泛使用。计算公式为

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}, \quad (2)$$

式中: $\Delta$ 为饱和水汽压与温度关系曲线切线斜率, kPa/°C; $R_n$ 为作物表面净辐射量, MJ/(m<sup>2</sup>·d); $G$ 为土壤热通量, MJ/(m<sup>2</sup>·d); $\gamma$ 为湿度计常数, kPa/°C; $T$ 为平均温度, °C; $U_2$ 为地面上2 m高处的平均风速, m/s; $e_a$ 为空气实际水汽压, kPa; $e_d$ 为饱和水汽压, kPa。其中 $\Delta, R_n, G, U_2$ 可利用气象资料计算获得。

#### 2.1.3 $K_c$ 值确定

水稻不同生育阶段的作物系数参考陈玉民相关研究成果<sup>[2]</sup>和生育期具体情况确定;春玉米作物系数由云南玉米需水规律研究成果<sup>[15]</sup>确定;而冬小麦滇东北地区试验资料不足,文中在FAO推荐值<sup>[16]</sup>基础上,结合冬小麦生长发育情况,采用分段单值平均法计算生育中期的作物系数。生育期分为生育初期(播种期—开花期);生育中期(开花期—乳熟期);成熟期(乳熟期—成熟期)。根据当地气候条件,修正生育中期作物系数,即

$$K_{c\text{mid}} = K_{c\text{mid}}(\text{Tab}) + [0.04(U_2 - 2) - 0.04(RH_{\text{min}} - 45)](h/3)^{0.3}, \quad (3)$$

式中: $U_2$ 为地面上2 m高度处的日平均风速, m/s; $RH_{\text{min}}$ 为日最低相对湿度的平均值; $h$ 为作物的平均高度, m。主要粮食作物不同生育阶段作物系数如表1所示。

表1 主要粮食作物作物系数  
Tab.1 Crop coefficients of main crops

水稻		春玉米		冬小麦	
生育阶段	$K_c$	生育阶段	$K_c$	生育阶段	$K_c$
返青—分蘖	1.066	播种—出苗	0.80	播种—出苗	0.40
分蘖—拔节	1.216	出苗—抽雄	1.26	出苗—开花	0.40
拔节—抽穗	1.298	抽雄—乳熟	1.17	开花—乳熟	1.15
抽穗—乳熟	1.344	抽雄—乳熟	0.97	乳熟—成熟	0.25
乳熟—成熟	1.213	乳熟—成熟	0.71		

### 2.2 分析方法

#### 2.2.1 气候趋势分析

利用气候趋势分析方法研究气象要素和作物需水量的变化趋势,气候倾向率由最小二乘法确定,计算公式为

$$\bar{Y}_i = a + b \cdot i \quad (i=1, 2, 3, \dots), \quad (4)$$

式中: $\bar{Y}_i$ 为要素拟合值; $a$ 为回归常数; $b$ 为回归系数,10 $b$ 表示气候要素每10 a的气候倾向率; $i$ 为时间系列,代表年份序号;气候要素序号 $\bar{Y}_i$ 与自然数列 $i$ 之间相关系数称为气候趋势系数。

#### 2.2.2 偏相关分析法

偏相关分析是以每对变量之间的相关系数作为基础,其他相关变量保持固定不变,计算其中2个变量之间的线性关系,排除第三变量干扰<sup>[14]</sup>。表达式为

$$r_{xy.z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1-r_{xz}^2)(1-r_{yz}^2)}}, \quad (5)$$

式中: $r_{xy.z}$ 为在控制了 $z$ 因子的情况下, $x, y$ 之间的偏相关系数; $r_{xy}, r_{xz}, r_{yz}$ 分别为两变量间的Pearson相关系数。偏相关系数 $r$ 的数值在 $[-1, 1]$ 变化。当 $r > 0$ 时,表明两变量关系呈正相关,越靠近1,正相关越显著;当 $r < 0$ 时,表明两变量关系呈负相关,越靠近-1,负相关越显著;当 $r = 0$ 时,则表示两变量相互独立。

#### 2.2.3 线性逐步回归分析法

线性逐步回归分析首先是分别把每个变量都选入模型中,然后保留系数显著水平最高的变量,剔除不显著变量,最后经过多次的选入和剔除,获得显著性回归方程的决定系数,可用于估计变量对因变量影响的程度。文中选用SPSS软件进行线性逐步回归分析,研究作物需水量与主要气候因素之间的关系。

### 3 结果与分析

#### 3.1 气候要素变化特征

表 2 为 1955—2013 年的 3 个典型站点各气象要素的变化趋势. 其中  $P_e$  为有效降雨量;  $H_R$  为相对湿度;  $T_A$  为平均温度;  $S_W$  为风速;  $P_R$  为气压;  $S$  为日照时数.

表 2 不同站点各气象要素倾向率  
Tab. 2 Climatic tendency rate of each meteorological factor at different stations

站点	$P_e$ /mm	$H_R$ /%	$T_A$ /°C	$S_W$ /( $m \cdot s^{-1}$ )	$P_R$ /kPa	$S$ /h
会泽	-6.585	-2.930	0.694	-0.098	0.009	61.196
昭通	-5.897	-0.941	0.479	-0.224	0.019	-29.089
沾益	-14.991	-1.340	0.500	0.012	0.010	-7.594

近 60 a 会泽站、昭通站、沾益站的有效降雨量和相对湿度均呈减少趋势,会泽站和昭通站有效降雨减少量较少,每 10 a 分别为 -5.897 mm 和 -6.585 mm,沾益站有效降雨量减少趋势最明显,为 -14.991 mm. 站点之间相对湿度变化量存在一定的差异性,会泽站降低趋势最为明显. 3 个典型站点的平均温度和平均气压均呈增加趋势. 3 个站点日照和平均风速变化趋势不一致,会泽站日照时数呈明显增加趋势,而昭通

站和沾益站呈减少趋势. 沾益站平均风速呈小幅度增加,其他站呈减少趋势,其中昭通站减少明显,每 10 a 变化速率为 0.224 m/s.

#### 3.2 作物需水量变化特征

##### 3.2.1 水稻

图 1 为水稻、春玉米、冬小麦全年需水量  $ET_c$  变化曲线. 由图 1a 可知,水稻全生育期需水量均值为 335.70 mm,在 205.0 ~ 500.0 mm 范围内变化. 会泽站点水稻需水量年际差异最大,最大变幅为 85.9%. 昭通站与沾益站水稻需水量年际变化趋势基本一致. 采用趋势分析法分析可知,昭通站水稻全生育期需水量呈减少趋势,每 10 a 变化速率为 10.07 mm,而会泽站和沾益站的呈增加趋势,每 10 a 变化速率分别为 8.85 mm 和 4.48 mm.

水稻各生育阶段需水量  $ET$  及日平均需水量  $ET_d$  如表 3 所示. 会泽站全生育期平均需水量和日平均需水量最大,分别为 372.3 mm 和 3.8 mm/d. 3 站点水稻各生育阶段耗水规律一致,年均需水量由大到小依次为:分蘖,拔节,抽穗,乳熟,黄熟,返青;日平均需水量由大到小依次为抽穗,乳熟,拔节,分蘖,黄熟,返青.

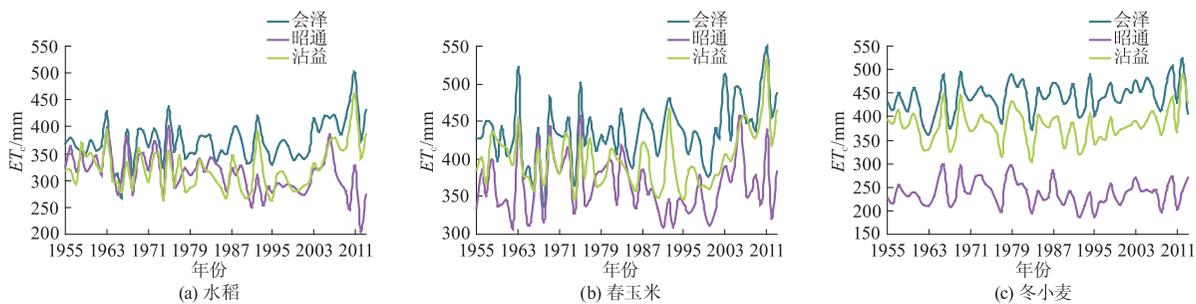


图 1 主要粮食作物全年需水量变化曲线

Fig. 1 Variation curves of main crops annual water requirements

表 3 滇东北地区水稻各生育阶段需水量  
Tab. 3 Rice water requirement during different growth stages

站点	$ET$ /mm							$ET_d$ /( $mm \cdot d^{-1}$ )						
	返青	分蘖	拔节	抽穗	乳熟	黄熟	全生育期	返青	分蘖	拔节	抽穗	乳熟	黄熟	全生育期
会泽	28.3	132.7	64.6	55	54.6	37.2	372.3	3.1	3.8	3.8	4.2	4.2	3.1	3.8
昭通	25.4	102.9	57.2	44.3	43.9	38.8	312.5	2.8	2.9	3.4	3.4	3.4	3.2	3.2
沾益	29.2	111.1	55.2	44.5	43.7	38.8	322.4	3.2	3.2	3.2	3.4	3.4	3.2	3.3
平均	27.6	115.6	59	47.9	47.4	38.3	335.7	3.1	3.3	3.5	3.7	3.6	3.2	3.4

##### 3.2.2 春玉米

春玉米全生育期需水量均值为 400.5 mm,变化范围为 309.0 ~ 549.0 mm(见图 1b). 沾益站春玉米全生育期需水量整体偏小,会泽站和沾益站春玉米全生育阶段需水量变化范围基本一致. 近 60 a 来,昭通站春玉米全生育期需水量呈减少趋势,每 10 a 变化速

率为 1.44 mm,而会泽站和沾益站变化趋势相反,每 10 a 变化速率分别为 8.38 mm 和 4.57 mm.

玉米各生育阶段需水量见表 4. 会泽站全生育期平均需水量和日平均需水量最大,分别为 400.5 mm 和 2.9 mm/d;昭通站最小,分别为 365.7 mm 和 2.4 mm/d. 各生育阶段平均需水量从大到小依次为

拔节,灌浆,苗期,孕穗,成熟;日平均需水量依次为 拔节,孕穗,灌浆(苗期),成熟.

表4 玉米各生育阶段需水量  
Tab.4 Spring maize water requirements during different growth stages

站点	ET/mm					ET <sub>d</sub> /(mm·d <sup>-1</sup> )						
	苗期	拔节	孕穗	灌浆	成熟	全生育期	苗期	拔节	孕穗	灌浆	成熟	全生育期
会泽	81.1	146.0	72.2	90.7	47.8	437.8	2.7	3.7	3.3	2.9	1.7	2.9
昭通	68.3	115.4	56.8	75.5	49.7	365.7	2.3	2.9	2.6	2.4	1.8	2.4
沾益	86.6	125.6	64.2	75.0	46.5	397.9	2.9	3.1	2.9	2.4	1.7	2.6
平均	78.7	129.0	64.4	80.4	48.0	400.5	2.6	3.2	2.9	2.6	1.7	2.7

### 3.2.3 冬小麦

由图1c可知,冬小麦全生育期需水量变化范围为186.0~524.0 mm,其均值为350.4 mm.会泽站与沾益站冬小麦需水量年际变化趋势比较一致.昭通与其他站点相比,需水量整体上偏少.采用气候趋势分析法分析小麦全生育期需水量变化趋势.昭通站每10 a减少1.06 mm,而会泽站和沾益站每10 a分别增加7.39 mm和3.10 mm.

冬小麦各生育阶段需水量和日均需水量如表5所示.会泽站全生育期平均需水量和日平均需水量最大,分别为442.3 mm和2.5 mm/d,其次为沾益站和昭通站.各站点冬小麦各生育阶段需水量和日平均需水量排序规律基本一致,各生育阶段平均需水量从大到小依次为乳熟,开花,成熟,苗期;各阶段日平均需水量从大到小依次为乳熟,开花,成熟,苗期.

表5 冬小麦各生育阶段需水量  
Tab.5 Winter wheat water requirements during different growth stages

站点	ET/mm					ET <sub>d</sub> /(mm·d <sup>-1</sup> )				
	苗期	开花	乳熟	成熟	全生育期	苗期	开花	乳熟	成熟	全生育期
会泽	17.5	119.2	272.4	33.2	442.3	0.9	2.0	3.9	1.1	2.5
昭通	15.1	60.7	130.2	21.5	227.4	0.8	1.0	1.9	0.7	1.3
沾益	18.6	86.8	245.5	30.7	381.5	0.9	1.5	3.7	1.0	2.1
平均	17.1	88.9	216.0	28.5	350.4	0.9	1.5	3.2	0.9	2.0

## 3.3 气候变化对作物需水量的影响

### 3.3.1 水稻

对逐日需水量和各气象因子进行偏相关分析,探讨气象因子对作物需水量的影响,分析结果见表6,其中 $r_{ET_dP}$ 为作物日需水量与降水量的相关系数; $r_{ET_dS}$ 为作物日需水量与风速的相关系数; $r_{ET_dP_R}$ 为作物日需水量与气压的相关系数; $r_{ET_dM}$ 为作物日需水量与平均温度的相关系数; $r_{ET_dS}$ 为作物日需水量与日照时数的相关系数; $r_{ET_dH_R}$ 为作物日需水量与相对湿度的相关系数; $r_{ET_dM_E}$ 为作物日需水量与水汽压的相关系数; $r_{ET_dH}$ 为作物日需水量与最高气温的相关

系数; $r_{ET_dL}$ 为作物日需水量与最低气温的相关系数.水稻需水量与气象因子偏相关分析结果表明,发现两者存在着一定的相关关系,主要气象因子逐日的偏相关系数通过了置信度 $\alpha=0.001$ 的显著性检验.3个站点同一气象因素的变化趋势有所不同,不同气象因素与水稻日需水量相关关系存在差异,其中水稻日需水量对日照时数的响应最为明显.水稻日需水量同日照时数、平均风速、平均气温、平均气压呈正相关,并且相关关系在 $\alpha=0.001$ 水平下具有统计学意义,与平均水汽压在 $\alpha=0.001$ 水平下呈负相关.

表6 作物日需水量与气象因子偏相关系数  
Tab.6 Partial correlation coefficients between crop daily water requirements and meteorological factors

作物	站点	$r_{ET_dP}$	$r_{ET_dS}$	$r_{ET_dS_w}$	$r_{ET_dP_R}$	$r_{ET_dM_E}$	$r_{ET_dH_R}$	$r_{ET_dM}$	$r_{ET_dH}$	$r_{ET_dL}$
水稻	会泽	0.062 *	0.931 ***	0.631 ***	0.257 ***	-0.209 ***	-0.013	0.298 ***	-0.065 *	0.051 *
	昭通	0.034	0.915 ***	0.721 ***	0.250 ***	-0.259 ***	0.068 *	0.330 ***	-0.242 **	0.033
	沾益	0.035	0.923 ***	0.619 ***	0.207 ***	-0.297 ***	0.037 *	0.330 ***	0.006	0.115 *
玉米	会泽	0.119 **	0.566 ***	0.441 ***	-0.256 ***	0.154 ***	-0.293 ***	-0.028	-0.130 **	0.025
	昭通	0.015	0.574 ***	0.289 ***	-0.243 ***	0.075 *	-0.205 ***	0.077 *	-0.245 ***	-0.023
	沾益	0.070 *	0.526 ***	0.371 ***	-0.326 ***	0.103 **	-0.251 ***	0.043 *	-0.140 **	-0.046 *
小麦	会泽	0.066 *	0.390 ***	0.279 ***	-0.088 *	-0.163 ***	-0.002	0.326 ***	-0.124 ***	-0.053 *
	昭通	-0.022	0.543 ***	0.237 ***	-0.166 ***	0.174 ***	-0.308 ***	0.122 ***	-0.274 ***	0.03
	沾益	0.060 *	0.392 ***	0.285 ***	-0.163 ***	-0.183 ***	0.003	0.325 ***	-0.041 *	-0.168 ***

注:表中\*, \*\*, \*\*\* 分别表示偏相关系数通过 $\alpha=0.05, 0.01, 0.001$ 的显著性检验.

选用线性逐步回归的统计方法深入研究水稻生育期日需水量与主要气候因素之间的关系,其中日照与平均风速为影响水稻需水量主要气象因子,3个站点线性回归方程的决定系数均大于0.9,并且两者对水稻需水量的贡献率为正。

### 3.3.2 春玉米

结果表明,日照时数同样是春玉米生育期内日需水量最主要的影响因子,玉米需水量同日照时数、平均风速以及平均水汽压在 $\alpha=0.001$ 水平下呈正相关,与平均气压和相对湿度在 $\alpha=0.001$ 水平下呈负相关。线性逐步回归分析发现3个站点日照和平均风速与春玉米需水量线性回归方程的决定系数均大于0.8,可知两者对春玉米日需水量影响最为突出,并且表现为正贡献率。

### 3.3.3 冬小麦

由表6可知,日照时数是生育期内冬小麦日需水量最重要影响因素。小麦需水量同日照时数、平均温度以及平均风速在 $\alpha=0.001$ 水平下呈正相关。站点之间分析结果也存在一定的差异,会泽站和沾益站同平均水汽压、日最高气温在 $\alpha=0.001$ 水平下呈负相关关系,而昭通站与平均水汽压为正相关关系与相对湿度在 $\alpha=0.001$ 水平下呈负相关关系,与最高气温的相关关系不具有统计学意义。同样利用逐步回归分析法探讨其主要影响因素,结果表明3个站点冬小麦需水量主要影响的气象因子存在差异性。对昭通站而言,日照时数和相对湿度是影响冬小麦日需水量的主要气象因子,而会泽站和沾益站冬小麦需水量的主要影响因子是日照和平均气温,并且两者与冬小麦需水量为正相关关系。

影响3种作物需水量的主要气象因子有所区别,水稻和春玉米需水量主要影响因子为日照和平均风速,且在 $\alpha=0.01$ 水平下为正相关关系。综合分析气象因子和作物需水量变化趋势及它们之间的相关关系可得,昭通站日照时数的减少和平均风速的降低均将引起作物需水量减少。冬小麦需水量主要影响因素为日照、平均湿度和平均气温,其中与日照、平均气温在 $\alpha=0.001$ 水平下呈正相关关系,而与平均湿度在 $\alpha=0.001$ 水平下呈负相关关系。因此会泽站日照的增加和平均气温的升高会引起冬小麦需水量的增加。

## 4 讨论

肖俊夫等<sup>[17]</sup>研究发现作物全生育期耗水量和

产量呈抛物线性函数关系。而作物需水量影响因素较复杂,包括作物特性、农业技术措施、土壤水分状况等因素,文中从气象要素的角度,利用气候趋势分析法研究了各气象要素变化趋势,明确滇东北地区水稻、玉米和小麦全生育期需水量需水规律及其影响主要气象因子。本研究表明,日照对水稻和玉米全生育期需水量影响最为明显,这与闫苗祥等<sup>[18]</sup>研究郑州市日照时间是水稻和玉米的主要气象因子的结果基本一致。滇东北地区会泽站日照时数呈增加趋势,其他站(昭通站与沾益站)表现为减少的趋势,与王利盈<sup>[19]</sup>研究云南近55a日照时数变化趋势相同。海拔、气溶胶、湿度以及云量等因素对日照时数有一定的影响<sup>[20]</sup>。而日照减少会削弱地面能量,减少地面蒸发量,风速降低会减弱空气与土壤中的水分交换强度,达到保持土壤水分的作用。本研究也发现,水稻和玉米全生育阶段需水量还主要受平均风速影响,并且与日照时数和平均风速在 $\alpha=0.001$ 水平下为正相关关系,这与学者研究表明作物变化主要受日照和风速的影响结果<sup>[21]</sup>相吻合。冬小麦全生育期需水量最主要影响因素为日照时数,这与甘肃河东地区冬小麦需水量影响最大的气象因子是日平均气温的结果<sup>[22]</sup>不同,可能由于两地区的海拔、纬度以及气候特征差异所致。海拔高度与作物需水量有一定的相关关系,佟玲等<sup>[23]</sup>研究表明石羊河流域的参考作物需水量与海拔呈显著的负相关关系。而参考作物需水量是计算作物需水量的基本数据,必然会对作物需水量有所影响。纬度高低对气温有着直接的影响,纬度低气温高。在高海拔和低纬度的综合影响下,滇东北地区与平原地区的气候特征有所区别,具有区域差异和垂直变化十分明显、年温差大、日照充沛等气候特征。

文中研究表明昭通站冬小麦需水量主要影响因素是相对湿度,而会泽站和沾益站主要影响因素是平均气温,滇东北3个典型站点平均气温均呈增加趋势,与西南地区增温趋势显著的结果<sup>[3]</sup>相吻合,并且平均气温对作物需水量的贡献率为正,这与气温上升,将引起作物对水分需求量增加的结果<sup>[11,13]</sup>相一致。同时采用气候趋势分析法探究3个站点作物需水量特征,结果表明昭通站作物全生育期需水量呈减少的趋势,这可能是日照时数减少和风速降低共同作用的结果。而会泽与沾益站作物需水量变化趋势相同,这与两个站点的气候特征相似有关,会泽站作物全生育期需水量最大,与此站点日照时数呈显著增加趋势有关。

## 5 结 论

1) 过去 60 a, 会泽、昭通和沾益站点的平均气温均呈上升趋势, 其中会泽站增温趋势明显, 每 10 a 变化速率为 0.189 °C. 而相对湿度均呈降低的趋势, 每 10 a 降低幅度为 0.003 ~ 0.253 °C. 站点之间日照时数和平均风速的变化趋势不一致, 其中会泽的日照时数增加幅度最大, 每 10 a 增加 0.165 h, 昭通站平均风速降低幅度最大, 每 10 a 降低 0.224 m/s.

2) 会泽站作物全生育期平均需水量最大, 其次为沾益站和昭通站. 站点之间的作物需水量随时间变化趋势不同, 昭通站水稻、春玉米、冬小麦均表现出不同程度的减少趋势, 而会泽和沾益站的变化趋势刚好相反, 水稻需水量每 10 a 分别增加 8.85 mm 和 4.48 mm, 春玉米需水量每 10 a 分别增加 8.38 mm 和 4.57 mm. 滇东北同一种作物各生育阶段需水量大小排序规律基本一致, 水稻各阶段需水量从大到小依次为分蘖, 拔节, 抽穗, 乳熟, 黄熟, 返青; 玉米的依次为拔节, 灌浆, 苗期, 孕穗, 成熟; 小麦的依次为乳熟, 开花, 成熟, 苗期.

3) 三大作物(水稻、玉米、小麦)需水量最主要的影响因素为日照时数, 在  $\alpha = 0.001$  水平下都呈正相关关系. 作物需水量的主要影响因素存在一定的差异, 水稻全生育期需水量同平均风速、平均气温、平均气压在  $\alpha = 0.001$  水平下呈正相关, 与平均水汽压在  $\alpha = 0.05$  水平下呈负相关. 玉米全生育期需水量同平均风速在  $\alpha = 0.001$  水平下呈正相关, 与平均气压、相对湿度在  $\alpha = 0.001$  水平下呈负相关. 会泽站和沾益站小麦全生育期需水量同平均气温在  $\alpha = 0.001$  水平下呈正相关关系, 而就昭通站而言, 相对湿度对小麦全生育期需水量影响较为突出.

4) 以往研究主要集中在平原地区作物需水量对气候变化的响应, 而文中是针对高海拔低纬度地区主要粮食作物需水量的研究. 同时结合气象因素来研究作物需水量变化影响因素, 使对作物需水量的研究更加全面和精确. 文中仅从气候变化的角度对作物需水量的影响进行了探讨, 今后研究还需进一步考虑作物特性、农业技术措施以及土壤水分状况等综合因素.

### 参考文献 (References)

- [1] 陈超, 庞艳梅, 潘学标, 等. 四川地区参考作物蒸散量的变化特征及气候影响因素分析[J]. 中国农业气象, 2011, 32(1): 35 - 40.
- [2] 陈玉民, 郭国双, 王广兴, 等. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [3] 李蒙, 朱勇, 黄玮. 气候变化对云南气候生产潜力的影响[J]. 中国农业气象, 2010, 31(3): 442 - 446.
- [4] Qiu Guoyu, Yanob T, Momiic K. An improved methodology to measure evaporation from bare soil based on comparison of surface temperature with a dry soil surface [J]. Journal of Hydrology, 1998, 210 (1/2/3/4): 93 - 105.
- [5] Goyal P K. Sensitivity of to global warming; A case study of arid zone Rajasthan (India) [J]. Agricultural Water Management, 2004, 69(1): 1 - 11.
- [6] Xu Chongyu, Gong Lebing, Jiang Tong, et al. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment [J]. Journal of Hydrology, 2006, 327(1/2): 81 - 93.
- [7] McVicar T R, Van Niel T G, Li Lingtao, et al. Spatially distributing monthly reference evapotranspiration and pan evaporation considering topographic influences [J]. Journal of Hydrology, 2007, 338(3/4): 196 - 220.
- [8] 刘宏谊, 马鹏里, 杨兴国, 等. 甘肃省主要农作物需水量时空变化特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(1): 39 - 44.
- [9] 方文松, 刘荣花, 朱自玺. 黄淮平原冬小麦灌溉需水量的影响因素与不同年型特征[J]. 生态学杂志, 2009, 28(11): 2177 - 2182.
- [10] Robert Mendelsohn. The impact of climate change on agriculture in Asia [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014(4): 660 - 665.

- [11] Shakhawat Chowdhury. Implications of climate change on crop water requirement in arid region: An example of Al-Jouf, Saudi Arabia [J]. *Journal of King Saud University: Engineering Sciences*, 2013, *http://dx.doi.org/10.1016/j.jksues*. 2013. 11. 001.
- [12] 王宏, 谭国明, 孙庆川, 等. 承德春玉米需水量变化及其与气象因子的关系 [J]. *气象与环境学报*, 2012, 28(4): 69-72.  
Wang Hong, Tan Guoming, Sun Qingchuan, et al. Variation of spring corn water requirement and its relationship with the meteorological factors in Chengde, Hebei Province [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2012, 28(4): 69-72. (in Chinese)
- [13] 刘晓英, 林而达. 气候变化对华北地区主要作物需水量的影响 [J]. *水利学报*, 2004, 35(2): 77-82.  
Liu Xiaoying, Lin Erda. Impact of climate on water requirement of main crops in North China [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 35(2): 77-82. (in Chinese)
- [14] 符娜, 刘小刚, 李闯, 等. 不同时间尺度元谋灌区小粒咖啡需水变异特征 [J]. *排灌机械工程学报*, 2015, 33(2): 163-171.  
Fu Na, Liu Xiaogang, Li Chuang, et al. Variation research of coffee arabica water requirement at different temporal scale in Yuanmou Irrigation District [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2015, 33(2): 163-171. (in Chinese)
- [15] 白树明, 黄中艳, 王宇. 云南玉米需水规律及灌溉效应的试验研究 [J]. *中国农业气象*, 2003, 24(3): 18-21.  
Bai Shuming, Huang Zhongyan, Wang Yu. Experimental studies on the orderliness of water requirement and irrigation effects of maize in Yunnan [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2003, 24(3): 18-21. (in Chinese)
- [16] Richard G A, Luis S P, Dirk R, et al. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements - FAO Irrigation and Drainage Paper 56 [M]*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1986: 63-68.
- [17] 肖俊夫, 刘战东, 段爱旺, 等. 中国主要农作物全生育期耗水量与产量的关系 [J]. *中国农学通报*, 2008, 24(3): 430-434.  
Xiao Junfu, Liu Zhandong, Duan Aiwang, et al. Water production function during the whole growing stage for main crops in China [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(3): 430-434. (in Chinese)
- [18] 闫苗祥, 杨军耀. 郑州市需水量影响因素主成分回归分析 [J]. *节水灌溉*, 2014(7): 22-24.  
Yan Miaoxiang, Yang Junyao. The principal component regression analysis of impact factor of crop water requirement in Zhengzhou City [J]. *Water Saving Irrigation*, 2014(7): 22-24. (in Chinese)
- [19] 王利盈. 1960~2010年云南日照时数和风速变化特征 [J]. *甘肃农业大学学报*, 2014, 49(5): 140-147.  
Wang Liying. Characteristics of changes on sunshine hours and wind speed in Yunnan Province from 1960 to 2010 [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2014, 49(5): 140-147. (in Chinese)
- [20] 黄小燕, 张明军, 王圣杰, 等. 西北地区近50年日照时数和风速时空变化特征 [J]. *自然资源学报*, 2011, 26(5): 825-835.  
Huang Xiaoyan, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Characteristics of variation in sunshine duration and wind speed in the last 50 years in Northwest China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(5): 825-835. (in Chinese)
- [21] 张智, 林莉, 孙银川, 等. 银川市日照时数气候变化特征分析 [J]. *干旱区研究*, 2006, 23(2): 344-348.  
Zhang Zhi, Lin Li, Sun Yinchuan, et al. Analysis of climate change characteristic of sunshine duration in Yinchuan City [J]. *Arid Zone Research*, 2006, 23(2): 344-348. (in Chinese)
- [22] 杨琪, 张勃, 尹海霞, 等. 甘肃河东地区近50年小麦需水量变化趋势及影响因子 [J]. *生态学杂志*, 2013, 32(11): 3074-3081.  
Yang Qi, Zhang Bo, Yin Haixia, et al. Change trend of wheat requirement and related affecting factors in Hedong Region of Gansu Province [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(11): 3074-3081. (in Chinese)
- [23] 佟玲, 康绍忠, 粟晓玲. 石羊河流域气候变化对参考作物蒸发腾发量的影响 [J]. *农业工程学报*, 2004, 20(2): 15-18.  
Tong Ling, Kang Shaozhong, Su Xiaoling. Impacts of climate change on reference crop evapotranspiration in Shiyang River Basin [J]. *Transaction of the CSAE*, 2004, 20(2): 15-18. (in Chinese)

(责任编辑 徐云峰)