

基于波文比-能量平衡法的半湿润地区 葡萄园蒸发蒸腾量估算

余昭君,胡笑涛,冉 辉,王雪梦,王文娥,何雪霞

(西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100)

摘 要:为准确估算半湿润地区葡萄园蒸发蒸腾量,在测定气象数据的基础上,以水量平衡法的实测蒸发蒸腾量(ET)为参考,分析判断波文比-能量平衡法估算半湿润地区葡萄园蒸发蒸腾量的适用性以及整个生育期内葡萄 ET 的变化规律,分别采用单作物系数法(K_c)、双作物系数法(K_{cb})估算半干旱半湿润地区葡萄 ET 。结果表明:全生育期内波文比-能量平衡法与水量平衡法之间的均方根误差($RMSE$)与纳什系数(NSE)分别为 0.54 与 0.64,决定系数为 0.82,说明波文比-能量平衡法可以较好地应用于半湿润地区葡萄园蒸发蒸腾估算,双作物系数法比单作物系数法估算结果更为精确,计算出的双作物系数 0.85、1.07、0.71 可以作为本地区值。

关键词:葡萄园;蒸发蒸腾量;波文比-能量平衡法;单作物系数法;双作物系数法;半湿润地区

中图分类号:S161.4;S663.1 **文献标志码:**A

Estimation of grape evapotranspiration in semi-humid region based on Bowen ratio energy balance method

YU Zhaojun, HU Xiaotao, RAN Hui, WANG Xuemeng, WANG Wene, HE Xuexia

(Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas,

Ministry of Education, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: In order to accurately estimate the evapotranspiration (ET) of vineyards in the sub-humid region based on the determination of meteorological data, this study analyzed and evaluated the applicability of Bowen ratio-energy balance method in estimating grape evapotranspiration in semi-humid areas and the variation rule of grape ET during the whole growth period by taking the measured ET of water balance method as a reference. Then, single crop coefficient method (K_c) and double crop coefficient method (K_{cb}) were used to estimate grape ET in semi-arid areas. Results showed that the root mean square error ($RMSE$) and coefficient of Nash (NSE) between Bowen ratio-energy balance method of the total growth period and the method of water balance were 0.54 and 0.64, respectively, and the determination coefficient was 0.82. Bowen ratio-energy balance method can be better applied to semi-humid region vineyard evapotranspiration estimation, in contrast, the method of double crop coefficient estimate result was more accurate than the single crop coefficient method. The calculated dual crop coefficients of 0.85, 1.07, and 0.71 can be used as values in this region to provide theoretical basis for semi-humid region vineyard moisture management.

Keywords: vineyard; evapotranspiration; Bowen ratio-energy balance method; single crop coefficient method; double crop coefficient method; semi-humid region

作为陕西关中地区特色经济水果之一,葡萄具有较高的经济价值。但是关中地区水资源较为短缺,降水时空分布不均,降雨多集中于夏季,春季降

雨较少,因而对葡萄果实形成和生长造成严重影响^[1]。准确估算葡萄园蒸发蒸腾量(Evapotranspiration, ET)是科学制定灌溉制度的前提^[2]。葡萄园

的蒸发蒸腾量(ET_c)根据当地气候、葡萄品种、管理方法等的不同有着很大的差异^[3],获得蒸发蒸腾量的方法主要分为实测法和估算法两种。实测法包括水量平衡、波文比-能量平衡法等;单、双作物系数法是联合国粮农组织(FAO)推荐的估算作物蒸发蒸腾量的一种经验模型^[1],相较于其他复杂的数学模型,单、双作物系数法可以通过一定的气象数据以及作物与土壤的基本参数,得到较为可靠的估算值,方法简便且较为稳定,在经济作物和大田作物等的研究中已广泛应用^[4]。更好地了解葡萄园的蒸散特征,对计算葡萄园蒸发蒸腾量、发展农业节水、提高水分利用效率以及提高葡萄产量品质均具有重要意义。

水量平衡法是确定作物蒸腾蒸发量的基础方法,广泛应用于大田作物、果树以及温室作物等,但准确地测定水量平衡中各个变量有一定难度,在实际应用中往往需进行简化,因而常用于检验其它方法的准确度^[5]。波文比-能量平衡法是一种微气象方法,所需实测参数较少,计算简单,应用较为广泛,但是该方法具有较多的限制因素和假定条件^[6],在半湿润地区葡萄园的适用性还有待进一步研究。双作物系数法相比于单作物系数,引入了土壤蒸发系数(K_e),将蒸散分为植株蒸腾与土壤蒸发两部分,所以双作物系数法比单作物系数法更接近实际情况,且对于地面植被覆盖度较小的情况尤为合适^[7]。目前国内外关于葡萄耗水规律的研究较多,Zhang 等^[8]利用波文比法研究了我国西北干旱地区葡萄的蒸腾蒸发规律,发现日 ET 在果实发育阶段最大值为 $1.6\sim 3.5\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,前期和后期最小值为 $0.8\sim 1.7\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 。雷筱等^[9]利用水量平衡法对宁夏滴灌葡萄的耗水规律进行了研究,发现整个生育期内葡萄耗水量大小呈“下开口抛物线”分布,果实膨大期耗水量最大,日均耗水量在 $2.26\sim 4.48\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 范围内。白云岗等^[10]对极端干旱地区葡萄的需水规律展开了研究,得出日均耗水量约为 $5.0\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,果实膨大期可达最大值($8.78\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$)。Sánchez 等^[11]通过与大型蒸渗仪测量值的比较,探讨了利用涡流相关系统估算葡萄园蒸发蒸腾量的可行性,两种方法的 $RMSE$ 值在小时和日尺度上分别为 $\pm 0.09\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $\pm 0.5\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,具有很好的一致性。侯裕生等^[12]计算了极端干旱地区葡萄的作物系数,萌芽期为 0.80,新梢生长期为 1.09,花期为 1.13,浆果生长期为 1.07,浆果成熟期为 1.03,枝蔓成熟期为 0.82。Montoro 等^[13]在西班牙半干旱地区进行了葡萄蒸腾量和蒸发量的定量研究,得出测量

的 K_{cb} 值范围在 $0.20\sim 1.0$ 。

目前的研究主要集中在干旱与极端干旱地区,但是对于不同的气候区,合适的葡萄蒸发蒸腾量的测定方法也不同,且作物系数也受到气候和地形等条件的影响,目前对于半湿润地区葡萄园的蒸发蒸腾量研究较少。本文以陕西关中平原典型半湿润区葡萄园为例,探究了葡萄生育期蒸腾蒸发规律,评价波文比-能量平衡法以及单、双作物系数法在半湿润气候区葡萄园的适用性。为科学合理且较为快捷地制定半湿润地区葡萄园的灌溉制度和改善葡萄园内土壤水分状况提供支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2018 年在陕西省咸阳市杨陵区君度唯尔葡萄庄园(北纬 $34^{\circ}27'$,东经 $108^{\circ}20'$,海拔为 524.7 m)开展。该试验地区属于暖温带季风半湿润半干旱气候区,多年平均降水量为 580 mm ,年平均蒸发量在 $1\,500\text{ mm}$ 左右,多年平均气温为 12.9°C ,多年平均日照时数为 $2\,094.9\text{ h}$,年均无霜期 185 d 。降水多集中在 6—9 月份,其降水量占全年降水量的 $60\%\sim 70\%$ 。地下水位埋深大于 12 m 。果园土壤质地为粘壤土,容重为 $1.35\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,田间持水量为 32.4% (体积含水率)。果园葡萄的龄期为 7 a,品种为‘黑色甜菜’,葡萄园采用滴灌模式进行补充灌溉,由于 2018 年降水较为充足,葡萄生育期内未补充灌溉。葡萄种植方向为南北走向,行距 3 m 左右,株距 0.8 m 左右,葡萄架采用单篱架,架高 1.5 m 左右,测定区域内南北向长为 67 m ,东西向长为 105 m 。

波文比观测站安装于葡萄园东南侧一片较为开阔的葡萄地且位于中心位置,包括两组温湿度传感器(HMP155A)和风速风向传感器(WindSonic),一组安装在 6 m 高度处,另外一组安装在 3 m 高度处,净辐射传感器和红外温度传感器安装约在 3.2 m 处,两个热通量板(HFP01)分别安装在南北向地下 5 cm 处。以波文比系统为中心,选取 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 的区域为土壤水分监测区,测区沟间和垄上各布置土壤水分廓线仪(AZS-100 手持式)测管共 6 根,1 d 左右测定 1 次。

1.2 研究方法

1.2.1 波文比-能量平衡法 Bowen 在 1926 年提出了波文比-能量平衡法^[14],该方法是以下垫面的水热之间的交换为基础,在假定潜热湍流交换系数(K_w)和感热湍流交换系数(K_h)相等的条件下,根据两个不同高度间的温度差和水汽压差以及净辐射、

土壤热通量等数据计算蒸发蒸腾量。

$$\lambda ET = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \quad (1)$$

$$H = \frac{(R_n - G)\beta}{1 + \beta} \quad (2)$$

式中, R_n 为净辐射 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$); λET 为潜热通量 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), 其中 λ 为水的汽化潜热, 取 $2.45 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, ET 为蒸发蒸腾量 (mm); H 为感热通量 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$); G 为土壤热通量 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)。根据 R_n 和 G , 即可求得相应的 λET 和 H 。

1.2.2 水量平衡法 水量平衡法是测定作物蒸发蒸腾量最基本的方法, 基本原理是通过计算特定区域内水量的收入和支出的差值来推求蒸发蒸腾量, 即将下垫面蒸发蒸腾量作为水量方程的余项来求解^[15], 其表达式为:

$$ET = PR + I + W - RO - D - \Delta S \quad (3)$$

式中, ET 为蒸发蒸腾量 (mm); PR 为有效降雨量 (mm); I 为灌水量 (mm); W 为地下水补给量 (mm); RO 为地表径流量 (mm); D 为深层渗漏量 (mm); ΔS 为土壤含水量的变化量 (mm)。取土深度定为 1 m , 按土层深度 ($0 \sim 10$ 、 $10 \sim 20$ 、 $20 \sim 40$ 、 $40 \sim 60$ 、 $60 \sim 80$ 、 $80 \sim 100 \text{ cm}$) 取土, 烘干法测定土壤含水率。由于试验地地势较为平坦, 降雨强度一般不大, 地表径流 (RO) 基本为 0 , 而地下水位埋深较深, 地下水补给量 (W) 和深层渗漏量 (D) 也可以忽略不计。因此, 水量平衡方程式可简化为:

$$ET = PR + I - \Delta S \quad (4)$$

1.2.3 单、双作物系数法 FAO-56 作物需水量专家咨询组所推荐的充分供水条件下采用的作物需水量计算公式^[2]:

单作物系数法:

$$ET_{cS} = K_c ET_0 \quad (5)$$

双作物系数法:

$$ET_{cD} = (K_{cb} + K_e) ET_0 \quad (6)$$

式中, ET_0 为参考作物蒸发蒸腾量 (mm); K_c 为单作物系数; K_{cb} 为基础作物系数; K_e 为土壤蒸发系数。其中参考作物蒸发蒸腾量根据 FAO 中标准化后的 Penman-Monleith 公式进行计算。

(1) 单作物系数法。将葡萄生长阶段划分为前期、中期、后期, 根据 FAO-56 可知, 在特定标准条件下鲜食葡萄在不同阶段的作物系数 ($K_{c(Tab)}$) 为 $K_{cini} = 0.3$, $K_{cmid} = 0.85$, $K_{cend} = 0.45$, 根据当地的气候条件对作物中期作物系数 (K_{cmid}) 和后期的作物系数 (K_{cend}) 的校正公式如下。

当日最低相对湿度的平均值 $RH_{\min} \neq 45\%$ 或风

速 $u_2 \neq 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的气候条件下:

$$K_c = K_{c(Tab)} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{\min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (7)$$

式中, h 为该生育阶段葡萄的平均高度 (m)。

(2) 双作物系数法。双作物系数法 3 个生长阶段的划分与单作物系数法相同。该方法是将作物系数 (K_c) 分为基础作物系数 (K_{cb}) 和土壤蒸发系数 (K_e) 两部分^[16], K_{cb} 表征作物蒸腾, K_e 表征土壤蒸发。

① 基础作物系数 (K_{cb}) 计算。FAO-56 中所查得的葡萄基础作物系数 ($K_{c(Tab)}$) 为: $K_{cbini} = 0.15$, $K_{cbmid} = 0.80$, $K_{cbend} = 0.40$, 中、后期基础作物系数 (K_{cmid} 、 K_{cend}) 校正公式同式 (7)。

② 土壤蒸发系数 (K_e) 计算。在降雨或灌溉后土壤表面较湿润时, K_e 达到最大值, 由于作物系数是由土壤表层的蒸发能量决定的, 因此作物系数 ($K_c = K_{cb} + K_e$) 不会超过其最大值 (K_{cmax}), 当土壤水分减少时, K_e 的计算如下式:

$$K_e = K_r (K_{cmax} - K_{cb}) \leq f_{ew} K_{cmax} \quad (8)$$

式中, K_r 为表层土壤蒸发累积深度的蒸发减小系数 (无量纲), 当土壤表面湿润 (降雨 $1 \sim 2 \text{ d}$) 时, $K_r = 1$; 降雨之后 $3 \sim 5 \text{ d}$, $K_r = 0.7$; 降雨后 $6 \sim 8 \text{ d}$, $K_r = 0.2$; 当土壤表层用于蒸发的水分耗尽时, $K_r = 0$ 。 f_{ew} 为株间土壤占总土壤面积的百分比, K_{cmax} 为作物系数最大值, 其计算公式如下:

$$K_{cmax} = \{1.2 + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{\min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3}\} \quad (9)$$

$$K_{cmax} = K_{cb} + 0.05 \quad (10)$$

1.2.4 误差评价指标 为准确评价估算值与实际测定蒸发蒸腾量值之间的差异性, 引入决定系数 (R^2)、均方根误差 ($RMSE$) 对波文比-能量平衡法计算本地区蒸腾蒸发量的准确度进行评价, 同时采用均方根与实测值标准偏差比 (RSR) 和纳什效率系数 (Nash-Sutcliffe efficiency, NSE) 评估单、双作物系数法的估算结果, 评价指标的计算公式分别为:

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{j=1}^n (ET_{cW,j} - \overline{ET_{cW}}) (ET_{cB,j} - \overline{ET_{cB}}) \right]^2}{\sum_{j=1}^n (ET_{cW,j} - \overline{ET_{cW}})^2 \sum_{j=1}^n (ET_{cB,j} - \overline{ET_{cB}})^2} \quad (11)$$

$$R_{MSE} = \sqrt{(ET_{cW,j} - ET_{cB,j})^2} \quad (12)$$

$$R_{SR} = \frac{\sqrt{(ET_{cB,j} - ET_{cSD,j})^2}}{\sqrt{(ET_{cB,j} - \overline{ET_{cB}})^2}} \quad (13)$$

$$N_{SE} = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (ET_{cB,j} - ET_{cSD,j})^2}{\sum_{j=1}^n (ET_{cB,j} - \overline{ET_{cB}})^2} \quad (14)$$

式中, $ET_{cW,j}$ 为第 j 天水量平衡法测定的蒸发蒸腾量 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$), $\overline{ET_{cW}}$ 为 $ET_{cW,j}$ 的平均值 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); $ET_{cB,j}$ 为第 j 天波文比-能量平衡法计算的蒸发蒸腾量 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$), $\overline{ET_{cB}}$ 为 $ET_{cB,j}$ 的平均值 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); $ET_{cSD,j}$ 为单、双作物系数法估算的第 j 天的蒸发蒸腾量 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)。

R^2 越接近 1, $RMSE$ 越小, 则说明波文比-能量平衡法计算的结果准确度越高。根据 Moriasi 等^[17] 的研究可知, 当 $0 < RSR < 0.50$, 且 $0.75 < NSE < 1.0$ 时, 两种结果的一致性非常好 (VG); 当 $0.50 \leq$

$RSR < 0.6$, 且 $0.65 < NSE \leq 0.75$ 时, 结果的一致性属于良好 (G); 当 $0.60 \leq RSR < 0.70$, 且 $0.50 < NSE \leq 0.65$ 时, 结果的一致性属于满意 (S); 当 $RSR \geq 0.70$, 且 $NSE \leq 0.50$ 时, 结果的一致性属于不满意 (U)。即 RSR 值越小且 NSE 值越接近 1, 采用单、双作物系数法估算的蒸发蒸腾量越接近波文比-能量平衡法结果, 估算的效果越好。

2 结果与分析

2.1 葡萄生育期内气象数据变化和参考作物蒸发蒸腾量 (ET_0)

图 1 为 2018 年波文比系统测定的整个生育期葡萄园气象因素的变化, 全生育期时间段为 2018 年

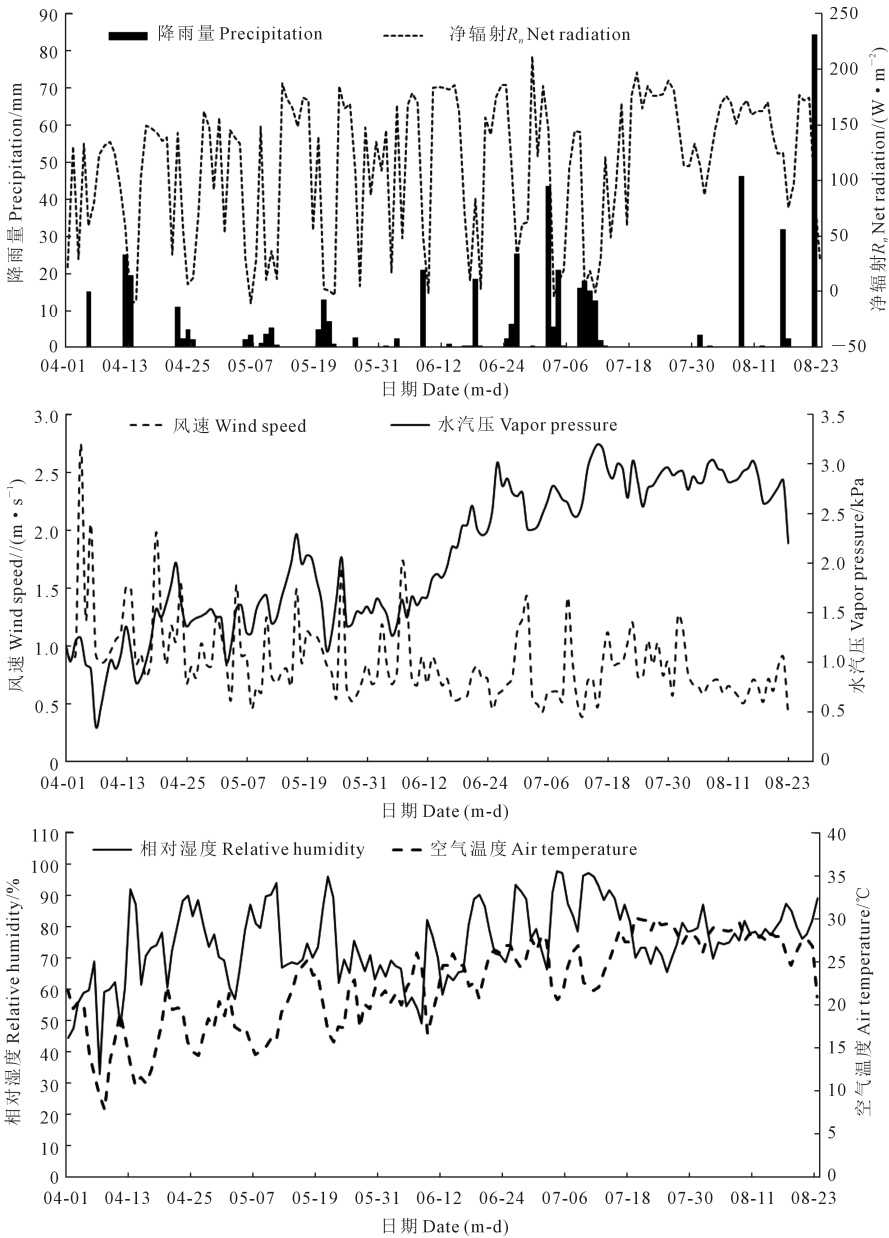


图 1 2018 年葡萄生育期气象要素
Fig.1 Changes of meteorological elements with time during the growth period of grape in 2018

4月1日到8月23日,总计145 d。由图1可知,整个生育期日平均风速都维持在一个稳定的范围,风速较小,最大值为 $2.75\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,出现在2018年4月4日。风速在生育前期较后期大,空气水汽压生育期内变化趋势与之相反,变化范围为 $0.5\sim 3.5\text{ kPa}$,最大值出现在2018年7月17日。净辐射值在整个生育期变化幅度较大,晴天条件下,净辐射呈增大的趋势,日均最高值出现在6月29日,为 $211.7\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,净辐射在阴雨天气出现低峰值。生育期内总的降雨量为 498.6 mm ,降雨时间分布较为均匀。从图中可以看出,前期相对湿度较低,后期湿度较大,相对湿度变化范围为 $32.9\%\sim 97.8\%$,平均值为 75.1% ,说明该地区葡萄生育期内相对湿度变化较大。空气温度在整个生育期内的总体变化趋势与相对湿度大致相同,平均气温为 22.4°C ,在7月中下旬出现最高温度(30.18°C),随后逐渐减小。

根据波文比系统测定的相关气象资料,按照FAO-56推荐的Penman-Monteith公式,计算试验期间参考作物蒸发蒸腾量随时间的变化情况(图2)。

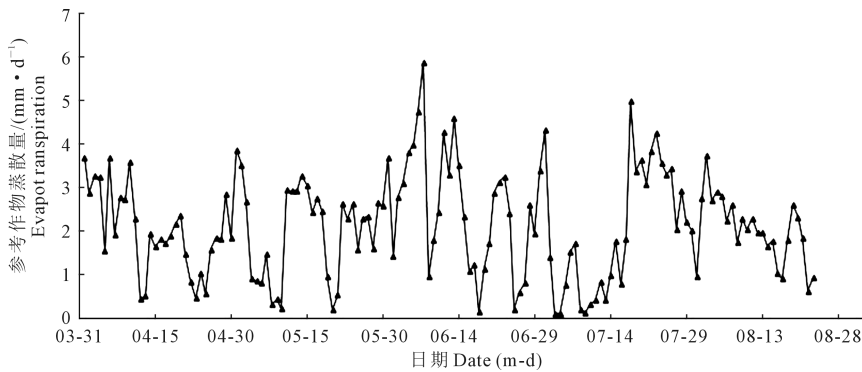


图2 葡萄生育期内参考作物蒸发蒸腾量

Fig.2 Evapotranspiration of reference crops during the growth period of grape

平均值(间隔 $2\sim 3\text{ d}$),为便于比较,将波文比-能量平衡法计算结果也取相同的测量间隔取平均值。对比波文比-能量平衡法(ET_B)和水量平衡法(ET_W)测定蒸发蒸腾量结果(图3)。全生育期内二者之间的均方根误差(RMSE)与纳什系数(NSE)分别为 0.54 与 0.64 ,决定系数为 0.82 ,说明 ET_B 与 ET_W 变化趋势具有较高一致性,但 ET_B 与 ET_W 测定蒸发蒸腾量相比数值偏小,这可能是由于波文比系统低估夜间蒸发蒸腾量,引起日尺度蒸发蒸腾量偏小^[18];此外, ET_B 与 ET_W 测定区域尺度大小不同,造成 ET_B 与 ET_W 蒸发蒸腾量之间存在一定的偏差。但这种偏差普遍较小,可忽略不计。波文比-能量平衡法的计算值与水量平衡法的测定值均方根误差都小于 0.30 ,纳什系数大于 0.85 。由此可看出波文

参考作物蒸发蒸腾量在生育期内的变化总体上呈先增大后减小的趋势, ET_0 前期和后期波动均较小,生育中期变幅增大,其波峰出现在降水偏少、阳光充足、气温较高的5、6月份,为葡萄的膨果期,随着太阳辐射和大气温度的增加,参考作物蒸发蒸腾量一直增加,波谷出现在降雨最为集中的7月份。葡萄生育期内平均参考作物蒸散强度为 $2.13\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,全生育期参考作物蒸发蒸腾量为 308.90 mm 。从图2可看出葡萄萌芽期 ET 为 36.17 mm ,占全生育期的 11.70% ,日平均蒸发蒸腾量为 $2.41\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$;新梢生长期 ET 占 11.70% ,日平均蒸发蒸腾量为 $1.81\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$;开花期 ET 占 8.75% ,日平均蒸发蒸腾量为 $1.93\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$;果实膨大期 ET 占 37.44% ,日平均蒸发蒸腾量为 $2.03\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$;成熟期 ET 占 30.40% ,日平均蒸发蒸腾量为 $2.41\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

2.2 波文比-能量平衡法计算蒸发蒸腾量的结果及验证

葡萄整个生育期为2018年4月1日—8月23日,由于水量平衡法的测定结果为两次测量结果的

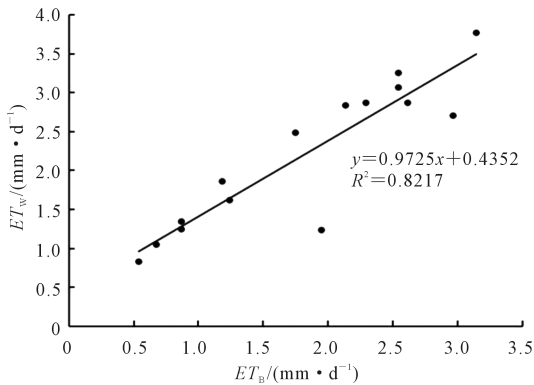


图3 波文比-能量平衡法和水量平衡法测定葡萄园蒸发蒸腾量的对比

Fig.3 Comparison of evapotranspiration in vineyards by Bowen ratio-energy balance method and water balance method

比-能量平衡法可以较好地反映出半湿润地区葡萄园蒸发蒸腾量变化规律,监测葡萄园的数据具有较高的精度。因此 ET_b 变化量可以作为标准值,用以判断单、双作物系数法的 ET_c 计算值。许多相关研究也表明,波文比-能量平衡法可以用来验证模型估计的 $ET^{[19]}$ 。

2.3 葡萄蒸发蒸腾量季节变化规律

根据波文比测定结果,得到葡萄在全生育期内的蒸发蒸腾量季节变化趋势(图 4)以及不同生育阶段的蒸发蒸腾总量(表 1)。从图中可以看出,在葡萄的整个生育期内,其蒸发蒸腾量的变化具有较为鲜明的季节变化特征,在萌芽期和新梢生长期,叶片覆盖度不高,这一阶段中葡萄蒸发蒸腾量较低,日均蒸发蒸腾量分别为 $1.32、1.25\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$;葡萄开花期对水分变化最为敏感,水分供应过多或者不足都会降低结果数量,再加上开花时间只有 1~2 周,所以整个生育期内葡萄蒸发蒸腾量的最低值一般会出现在开花期,2018 年葡萄开花期的日均蒸发蒸腾量为 $1.22\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$;伴随果实膨大期的到来,葡萄也进入了水分需求的高峰期,这一时期,半湿润地区恰逢夏季,温度逐渐升高,果实增大并不断积累糖分,该阶段持续时间也是最久的,因此蒸散量最大,累积蒸发蒸腾总量为 91.56 mm ;随着环境温度的不断升高,在成熟、着色期葡萄日均蒸发蒸腾量持续增长,日均蒸发蒸腾量达到 $2.34\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,在葡萄着色成熟之后,叶片凋落,蒸发蒸腾量在这一时期之后也开始逐渐减小。

2.4 单、双作物系数估算结果及对比分析

基于 2018 年波文比系统监测得到的环境因子,计算得出葡萄在前中后期的作物系数,见表 2。由

表中可见,基础作物系数(K_{cb})在初期均处于较低水平,均值为 0.13,在生育中期增幅较大,基本保持在较高水平, K_{cbini} 为 0.34,至后期逐渐减小至 0.32。植物叶片表面的气孔是蒸腾的主要途径,因而叶面积和叶子的疏密程度是改变蒸腾快慢的关键性因素,在葡萄生育前期绿叶面积指数(GLAI)非常小,前期至中期 GLAI 迅速增大,中期保持在较高水平,到后期又逐渐减小, K_{cb} 具有相似的变化趋势。土壤蒸发系数(K_e)整体上在发育初期较大,初期均值为 0.72,随着葡萄叶片覆盖度的增大,裸露的地表减少, K_e 逐渐减小,在中期达到最小值(0.34),后期随着葡萄叶片枯萎以及葡萄园必要的修枝,土壤蒸发逐渐增大, K_e 也随之有了小幅度的增加,为 0.39。此外,在前期 K_e 波动较大,这主要是受降水的影响,每次降水后裸露湿润的土壤面积增大,使 K_e 也较大。各个生育阶段的单作物系数(K_c)均小于同一阶段的双作物系数($K_{cb}+K_e$),但二者变化趋势相同,均在初期较小,后逐渐增大,中期保持较高水平,后期又减小。

根据单、双作物系数法计算的作物实际蒸发蒸腾量($ET_{cs}、ET_{cd}$)与波文比-能量平衡法的计算值

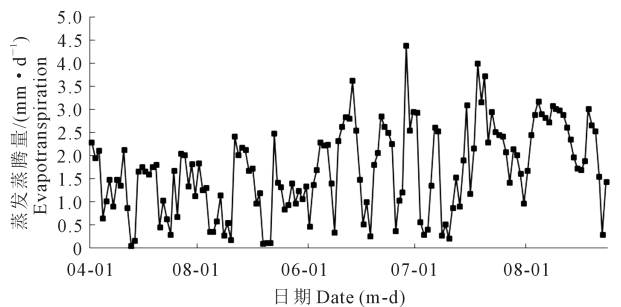


图 4 全生育期内葡萄蒸发蒸腾量季节变化
Fig.4 Seasonal variation of grape evapotranspiration during the whole growth period

表 1 葡萄不同生育阶段的蒸发蒸腾量变化规律				
Table 1 Variation of evapotranspiration of grape at different growth stages				
生育期 Growth period	时段(m-d) Period	时间/d Time	日均蒸发蒸腾量/(mm·d ⁻¹) Average evapotranspiration	蒸发蒸腾总量/mm Total evapotranspiration
萌芽期 Bud	04-01—04-15	15	1.32	19.80
新梢生长期 Shoot growth	04-16—05-05	20	1.25	24.94
开花期 Flowering	05-06—05-19	13	1.22	17.05
果实膨大期 Fruit swelling	05-20—07-15	57	1.61	91.56
着色与成熟期 Coloring and ripening	07-15—08-23	40	2.34	91.16
全生育期 Whole growth period	04-04—08-23	145	1.69	244.50

(ET_{cb})整体趋势为先增大后减小,在7月份,空气温度最高和葡萄生长最茂盛的时候蒸发蒸腾量最大(图 5)。 ET_{cs} 与 ET_{cd} 变化范围分别为 $0.1\sim4.7\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $0.1\sim4.6\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$, ET_{cb} 变化范围为 $0.1\sim4.4\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 。单、双作物系数法与波文比法计算出的全生育期作物实际蒸散量分别为 $275.05、246.87\text{ mm}$

表 2 不同生育阶段 K_c 、 K_{cb} 和 K_e 的计算值					
Table 2 Calculated values of K_c , K_{cb} and K_e in different growth stages					
生育期 Growth stage	时间 Time/d	K_c	K_{cb}	K_e	
前期 Initial stage	23	0.30	0.13	0.72	
中期 Middle stage	83	0.78	0.73	0.34	
后期 Late stage	39	0.50	0.32	0.39	

和 244.50 mm,单、双作物系数的计算值均大于波文比法的计算值。单作物系数法各生育期蒸散量分别为 28.78、144.11、102.24 mm;双作物系数法各生育期蒸散量分别为 30.98、117.38、98.52 mm,在每个生育阶段,单作物系数法计算值均大于双作物系数法计算值。

由单、双作物系数法计算的实际蒸发蒸腾量与波文比-能量平衡法的均方根-实测值标准偏差比(*RSR*)和纳什效率系数(*NSE*)计算结果(表 3)可知,与波文比-能量平衡法相比,葡萄生长最开始阶段,两种方法的估算结果并不符合实际情况,单作物系数法其他各生育期得到的评价皆在符合水平之上,而双作物系数法得到的评价为两种,即符合

和一般符合,此现象能够表明不计算生育初期时,根据单、双作物系数法得到的葡萄蒸发蒸腾量与波文比-能量平衡法的计算结果一致性较高,且双作物系数法预估得到的数据比单作物系数的可信度更高。因此, $K_{cb}+K_e(0.85,1.07,0.71)$ 可作为本地区葡萄基础作物系数地区值,且双作物系数法可以为本地区葡萄需水量估算提供较为准确的参考。

3 讨论

Zhang 等^[8]探究了波文比-能量平衡法在我国西北干旱荒漠地区葡萄园的适用性,结果表明, ET_{cb} 与 ET_{WB} 的均方根误差(*RMSE*)为 $0.35\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$, R^2 为 0.824,证实了波文比-能量平衡法与水量平衡法

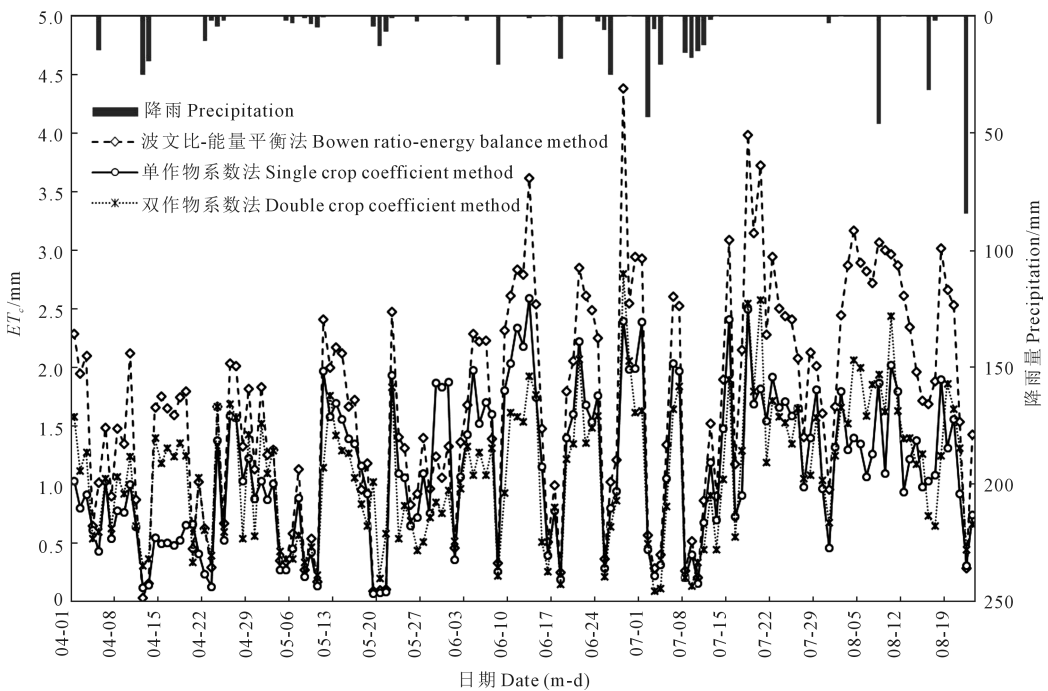


图 5 三种方法计算的葡萄园 ET_c
Fig.5 Three methods for calculating the vineyard ET_c

表 3 葡萄各生育阶段蒸发蒸腾量单、双作物系数法计算值与波文比法计算值一致性评价
Table 3 Consistency evaluation of the calculated value of evapotranspiration at each growth stage by single and double crop coefficient method and Bowen ratio method

评价指标 Evaluation index	单作物系数 Single crop coefficient			双作物系数 Double crop coefficient		
	生育初期 Early period	生育中期 Middle period	生育后期 Late period	生育初期 Early period	生育中期 Middle period	生育后期 Late period
R^2	0.57	0.57	0.67	0.79	0.84	0.83
$RMSE$	0.06	0.13	0.07	0.09	0.07	0.07
RSR	0.76	0.59	0.71	0.88	0.49	0.57
NSE	0.44	0.51	0.55	0.20	0.76	0.66
评价等级 Rating	U	S	S	U	VG	G

注:U-不满意;S-满意;G-良好;VG-非常好。
Note: U-unsatisfied; S-satisfied; G-good; VG-very good.

两种方法估算的 ET 值吻合较好。与本研究得到的结果有一定的相似性,本研究将波文比-能量平衡法与水量平衡法计算的半湿润地区葡萄园蒸腾蒸发量进行对比,均方根误差为 $0.54 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, R^2 为 0.82,相比较而言,虽然在本地区波文比-能量平衡法的测定值与水量平衡法测定值相关性较好,但是二者离散程度较小,说明波文比-能量平衡法在半湿润地区测定的误差比在干旱地区稍大。这种差异产生的原因可能是半湿润地区比干旱地区降雨多,近地层水汽湿度较大^[20],空气湿度在葡萄全生育期内频繁达到 95% 以上,导致水汽压梯度接近于 0 的情况较多,从而使得波文比系统出现误差的可能性比在干旱地区大。另一个重要的原因可能是半湿润地区的近地层垂直温度梯度较大,其形成的能量垂直感热平流输送对地表能量平衡会产生不可忽视的影响^[21],这种影响会造成波文比-能量平衡法的前提 $K_h = K_e$ 不成立,使该方法的精确度降低。

Picón-Toro 等^[22] 计算了西班牙南部的葡萄园 K_e , 计算发现 K_e 最大值接近 2, Netzer 等^[23] 研究了以色列南部半干旱地区葡萄园水分利用与不同阶段的作物系数, K_e 峰值为 1.20; Wang 等^[24] 对我国西北干旱地区葡萄园的蒸腾蒸发特征及作物系数进行了研究,结果表明生长初期、中期和后期的 K_e 值分别为 0.79、1.31、1.08, K_{cb} 分别为 0.17、0.97、0.64。根据以往研究可看出不同的地区气候条件、葡萄品种、灌溉方式等都会对作物系数造成一定的影响。本文基于 FAO-56 推荐的单、双作物系数法计算了不同生育阶段的单、双作物系数,并估算了半湿润地区葡萄园的蒸腾蒸发,得到的 K_e 值分别为 0.30、0.78、0.50, K_{cb} 分别为 0.13、0.73、0.32, 计算结果相比干旱地区较小,主要原因可能是全生育期内降雨较多,空气湿度较大,导致作物系数值较低。

4 结 论

本研究在试验采集的数据基础上对半湿润地区葡萄蒸发蒸腾量估算方法进行了探究,以水量平衡法的测定值为参照标准,分析判断波文比-能量平衡法估算半湿润地区葡萄蒸发蒸腾量的适用性以及整个生育期内葡萄 ET 的变化规律,分别采用单作物系数法 (K_e)、双作物系数法 (K_{cb}) 估算半干旱半湿润地区葡萄 ET , 结果表明,对比水量平衡法,波文比法精度较高,因此,波文比-能量平衡法可以用来探究我国半湿润地区葡萄的蒸发蒸腾。在萌

芽期和新梢生长期时,蒸发蒸腾量分别为 1.32 、 $1.25 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$; 开花期每日蒸发蒸腾量的平均值为 $1.22 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$; 在果实膨大期累积蒸发蒸腾总量达到 91.56 mm ; 在着色与成熟期,随着温度不断升高,葡萄蒸发蒸腾量的日平均值不断增大,达到 $2.34 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。葡萄的基础作物系数 K_{cb} 在生育初期均值为 0.13, 在生育中期为 0.34, 至后期逐渐减小至 0.32。土壤蒸发系数 (K_e) 初期均值为 0.72, 在中期达到最小值 0.34, 后期 K_e 为 0.39。单、双作物系数法计算的葡萄实际蒸发蒸腾量与波文比-能量平衡法的测定结果具有较好的一致性,双作物系数法估算结果比单作物系数的可靠程度高,因此,双作物系数法可用于计算葡萄蒸发蒸腾量,为本地区葡萄作物需水量提供较为准确的参考。

参 考 文 献:

- [1] 章伟. 渭北旱塬苹果及葡萄水肥一体化技术研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [2] Allen R G, Luis S P, Dirk R, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements[R]. FAO Irrigation and Drainage Paper, No.56, Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [3] Teixeira A H D C, Bastiaanssen W G M, Bassoi L H, Crop water parameters of irrigated wine and table grapes to support water productivity analysis in the São Francisco river basin Brazil[J]. Agricultural Water Management, 2007, 94(1-3): 31-42.
- [4] Odhiambo L O, Irmak S. Evaluation of the impact of surface residue cover on single and dual crop coefficient for estimating soybean actual evapotranspiration[J]. Agricultural Water Management, 2012, 104: 221-234.
- [5] Trambouze W, Bertuzzi P, Voltz M. Comparison of methods for estimating actual evapotranspiration in a row-cropped vineyard [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1998, 91, (3-4): 193-208.
- [6] 张和喜, 迟道才, 刘作新, 等. 作物需水耗水规律的研究进展[J]. 现代农业科技, 2006, (3): 52-54.
- [7] Allen R G, Clemments A J, Burt C M. Prediction accuracy for project wide evapotranspiration using crop coefficients and reference evapotranspiration[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2005, 131(1): 24-36.
- [8] Zhang B Z, Kang S Z, Li F, et al. Variation in vineyard evapotranspiration in an arid region of northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(11): 0-1904.
- [9] 雷筱, 周立华, 刘学军, 等. 宁夏贺兰山东麓酿酒葡萄耗水规律及灌溉制度优化研究[J]. 节水灌溉, 2017, (4): 41-46.
- [10] 白云岗. 极端干旱区成龄葡萄需水规律及微灌节水技术研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2011.
- [11] Sánchez J M, Ramón L U, Francisco V. Lysimeter assessment of the Simplified Two-Source Energy Balance model and eddy covariance system to estimate vineyard evapotranspiration[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 274: 172-183.

[12] 侯裕生,王振华,李文昊,等.水肥耦合对极端干旱区滴灌葡萄耗水规律及作物系数影响[J].水土保持学报,2019,33(2):279-286,330.

[13] Montoro A, Mañas F, López-Urrea R. Transpiration and evaporation of grapevine, two components related to irrigation strategy[J]. Agricultural Water Management, 2016, 177:193-200.

[14] Bowen I S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface[J]. Physical Review,1926, 27(6):779-789.

[15] 屈艳萍,康绍忠,张晓涛,等.植物蒸发蒸腾量测定方法述评[J].水利水电科技进展,2006,(3):72-77.

[16] Fandiño M, Cancela J J, Rey B J, et al. Using the dual-Kc approach to model evapotranspiration of Albariño vineyards (*Vitisvinifera* L. cv. Albariño) with consideration of active ground cover[J]. Agricultural Water Management,2012,112:75-87.

[17] Moriasi D N, Arnold J G, Liew M W V, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3):885-900.

[18] Heilman J L, McInnes K J, Savage M J. Soil and canopy energy balances in a west Texas vineyard[J]. Agricultural Water Management, 1994,71(1-2):99-114.

[19] Kato T, Kimura R, Kamichika M. Estimation of evapotranspiration, transpiration ratio and water-use efficiency from a sparse canopy using a compartment model[J]. Agricultural Water Management, 2004, 65(3):0-191.

[20] 向皎,李程,张清涛,等.绿洲荒漠过渡带风况对波文比和蒸散发的影响[J].生态学报,2016,36(3):705-720.

[21] 闫人华,熊黑钢,陈肖飞.天山北麓绿洲-荒漠过渡带芨芨草地地表能量通量研究[J].生态学报,2015,35(5):1350-1358.

[22] Picón-Toro J, González-Dugo V, Uriarte D. Effects of canopy size and water stress over the crop coefficient of a “Tempranillo” vineyard in south-western Spain[J]. Irrigation Science, 2012, 30(5):419-432.

[23] Netzer Y, Yao C, Shenker M.Water use and the development of seasonal crop coefficients for Superior Seedless grapevines trained to an open-gable trellis system [J]. Irrigation Science, 2009, 27(2):109-120.

[24] Wang S T, Zhu G F, Xia D S, et al. The characteristics of evapotranspiration and crop coefficients of an irrigated vineyard in arid Northwest China [J], Agricultural Water Management, 2019,212:388-398.

(上接第 174 页)

[12] Dai Z Y, Li Y P. A multistage irrigation water allocation model for agricultural land-use planning under uncertainty [J]. Agricultural Water Management, 2013, 129:69-79.

[13] Zhang D M, Guo P. Integrated agriculture water management optimization model for water saving potential analysis [J]. Agricultural Water Management, 2016, 170(1):5-19.

[14] 李晨洋,张志鑫. 基于区间两阶段模糊随机模型的灌区多水源优化配置[J]. 农业工程学报,2016,32(12):107-114.

[15] 顾文权,邵东国,黄显峰,等. 水资源优化配置多目标风险分析方法研究[J]. 水利学报,2008,39(3):339-345.

[16] Zhang Y M, Huang G H, Lu H W, et al. Planning of water resources management and pollution control for Heshui River watershed, China: A full credibility-constrained programming approach [J]. Science of the Total Environment, 2015, 8(3):524-525; 280-289.

[17] 岳琼,郭萍,王友芝,等.基于区间两阶段模糊可信性约束模型的灌区水资源配置[J]. 农业机械学报,2019,50(4):228-235.

[18] 陈敏,李永平,王光谦,等.考虑水足迹的区域作物种植结构分式规划模型研究[J]. 水力发电学报,2017,36(3):22-30.

[19] Stewart J I, Hagan R M, Pruitt W O. Production function and predicted irrigation programming for principal crops required for water resources planning and increased water use efficiency[R]. Washington DC, US: Department of Interior,1978.

[20] Hoekstra A Y, Hung P Q. Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade [C] // Value of Water Research Report Series (No.11). Delft: UNESCO-IHE Institute for Water Education, 2002.

[21] 付国睿,黄子淇,景海钊,等. 基于生产水足迹的粮食作物种植结构优化研究——以辽宁省铁岭市为例[J]. 资源与环境, 2019,35(11):1361-1367,1374.

[22] Liu X, Guo P, Li F H, et al. Optimization of planning structure in irrigated district considering water footprint under uncertainty [J]. Journal of Cleaner Production, 2019,210(2):1270-1280.

[23] Chen S, Shao D G, Li X D, et al. Simulation-optimization modeling of conjunctive operation of reservoirs and ponds for irrigation of multiple crops using an improved artificial bee colony algorithm [J]. Water Resources Management, 2016, 30(9):2887-2905.

[24] Zhang C L, Guo P. A generalized fuzzy credibility-constrained linear fractional programming approach for optimal irrigation water allocation under uncertainty [J]. Journal of hydrology, 2017, 553(10):735-749.

[25] 乔辰,张国立.几何加权法求解多目标规划问题[J]. 华北电力大学学报:自然科学版,2011,(6):107-110.

[26] Chen S, Shao D G, Gu W Q, et al. An interval multistage water allocation model for crop different growth stages under inputs uncertainty [J].Agricultural Water Management, 2017, 186:86-97.