

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.020

# 双作物系数法计算华北地区桃树蒸散量的可靠性评价

全国栋<sup>1</sup> 刘洪禄<sup>2</sup> 李法虎<sup>1</sup> 杨胜利<sup>2</sup> 范海燕<sup>2</sup>

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 北京市水科学技术研究院, 北京 100044)

**摘要:** 为评估双作物系数法计算华北地区果树蒸散量和作物系数的可靠性, 采用液流法和水量平衡法在 2012—2013 年对桃树蒸散量和作物系数进行了大田小区试验测定。结果表明, 双作物系数法计算的蒸散强度与液流法和水量平衡法测定的蒸散强度在果树生育期内均随时间呈先增大后减小的趋势, 计算值与 2 种实测法测定结果之间均显著相关。全生育期蒸散量计算值与实测值的相对误差小于 4.5%, 但土壤蒸发量计算值比测定值小 59.5% ~ 64.8%, 而蒸腾量计算值则比测定值大 25.6% ~ 26.0%。双作物系数法计算的作物系数与液流法和水量平衡法测定的作物系数也均随生育期呈先增大后减小的趋势, 3 种方法获得的整个生育期平均作物系数分别为 0.90、0.89 和 0.95。通过对均方根-实测值标准偏差比 (RSR) 和纳什效率系数 (NES) 的分析, 认为双作物系数法是估算充分灌溉条件下干旱-半干旱地区桃树蒸散量和作物系数的一种有效方法。

**关键词:** 桃树; 作物系数; 水量平衡法; 土壤蒸发量; 液流法; 一致性评价; 作物蒸腾量

**中图分类号:** S161.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2016)06-0154-09

## Reliability Evaluation of Dual Crop Coefficient Approach on Evapotranspiration Calculation of Peach Tree in North China

Tong Guodong<sup>1</sup> Liu Honglu<sup>2</sup> Li Fahu<sup>1</sup> Yang Shengli<sup>2</sup> Fan Haiyan<sup>2</sup>

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Beijing Hydraulic Research Institute, Beijing 100044, China)

**Abstract:** In order to evaluate the reliability and applicability of dual crop coefficient approach on calculating actual evapotranspiration and crop coefficient of fruit tree in the North China Plain, the evapotranspiration and crop coefficient of peach tree were measured by sap flow and water balance methods in an orchard of Beijing, China in 2012 and 2013, and the corresponding values were also calculated by dual crop coefficient approach. Experimental results showed that daily evapotranspiration rates calculated by dual crop coefficient approach and measured by sap flow and water balance methods were increased firstly and then decreased with time during peach tree growth period, and the calculated values had significantly positive correlation with those obtained by the twp measurement methods ( $R^2 > 0.77^{**}$  and  $R^2 > 0.76^{**}$ ). The relative error of total actual evapotranspiration in the whole growth period calculated by dual crop coefficient approach was less than 4.5% compared with the measured values by sap flow and water balance methods, but the calculated soil evaporation was 59.5% ~ 64.8% smaller than that measured by micro-lysimeter, and the calculated transpiration was 25.6% ~ 26.0% greater than that measured by sap flow method. The crop coefficients obtained by dual crop coefficient approach, sap flow and water balance methods also showed a increasing trend firstly and then they were decreased with time during the growth period of peach tree, and the average values during the whole growth period were 0.90, 0.89, and 0.95, respectively, for dual crop coefficient approach, sap flow and

收稿日期: 2015-11-26 修回日期: 2015-12-23

基金项目: 北京市科委重大项目 (D15110500410000)

作者简介: 全国栋 (1984—), 男, 博士生, 主要从事节水灌溉研究, E-mail: tgd2006@sina.com

通信作者: 李法虎 (1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土工程与水土环境研究, E-mail: lifahu@cau.edu.cn

water balance methods. By calculation and analyses on the ratio of root mean square error to the standard deviation of measured data (RSR) and the Nash – Sutcliffe efficiency (NSE), it can be concluded that dual crop coefficient approach is an effective method to calculate actual evapotranspiration and crop coefficient of peach tree under full irrigation in arid and semi-arid areas.

**Key words:** peach tree; crop coefficient; water balance method; soil evaporation; sap flow method; consistency evaluation; crop transpiration

## 引言

作为华北地区特色经济树种之一,桃树具有较高的经济价值。华北地区水资源紧缺,降水多集中在夏季,春季干旱少雨,而此时期是桃树果实形成和生长的关键期。因此,需要根据桃树生理需求,准确掌握果园土壤水分亏缺状况,确定合理的灌溉制度,以维持果树良好的生长环境。蒸散量 (Evapotranspiration, ET) 是制定灌溉制度的基础<sup>[1]</sup>, 主要通过实测法和估算法确定。实测法如水量平衡法、液流法、涡度相关法等通过仪器设备直接或间接测定出 ET, 而估算法则通过经验或解析模型计算<sup>[2]</sup>。水量平衡法是确定作物 ET 的基础方法, 广泛应用于大田作物、果树以及温室作物等<sup>[3-5]</sup>, 但准确测量水量平衡方程中各个变量较为困难, 实际应用中一般需作一些简化, 常用于验证其它方法的适宜性和精度<sup>[6]</sup>。液流法作为一种能够连续精确测量单株作物蒸腾量的方法, 已广泛应用于林木的研究中<sup>[7]</sup>。液流法直接测定的是植株蒸腾, 需要结合作物冠层下方土壤蒸发量的测定间接确定 ET。液流法主要用于 ET 各组分之间比例关系的研究<sup>[8-9]</sup> 或验证其它方法的可靠性<sup>[10-11]</sup>。双作物系数法 (Dual crop coefficient method) 是联合国粮农组织 (FAO) 推荐的一种估算作物 ET 的经验模型<sup>[1]</sup>。相对其他较复杂的数学模型<sup>[12-15]</sup> 而言, 双作物系数法只需要较少的气象数据以及作物和土壤的基本参数, 即可得到较为可靠的估算结果。因其简便且稳定性好, 该方法已广泛应用于大田作物、经济作物以及果树的研究中<sup>[16-22]</sup>。由于引入了土壤蒸发系数  $K_e$ , 将植株蒸腾与土壤蒸发分成两个独立的部分, 因此双作物系数法的计算结果比单作物系数法更接近实际情况, 尤其适用于地面植被覆盖度较小的状况<sup>[23]</sup>, 但其计算过程却因为需要确定  $K_e$  而变得更为复杂<sup>[24]</sup>。双作物系数法中的基础作物系数  $K_{cb}$  是典型条件下基于经验确定的<sup>[1]</sup>, 因此并不一定适用于所有的气候和地形条件以及作物种类<sup>[25]</sup>。

将双作物系数法应用于华北地区果树蒸散量和作物系数的相关研究较少。为检验该方法的适宜性与可靠性, 以便更快捷、精确地获得果园的蒸散数

据。本文以桃树为研究对象, 通过液流法与水量平衡法, 确定桃树生育期内蒸散量及其组分的变化规律以及作物系数; 评估双作物系数法计算桃树蒸散量以及作物系数的适宜性与可靠性, 为科学合理且快捷地制定华北地区果树的灌溉制度和改善果园土壤水分状况奠定理论基础。

## 1 材料与方方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2012—2013 年在北京市灌溉试验中心站 (39°20'N、114°20'E、海拔高度 12 m) 的果园内进行。试验地区属于温带大陆性季风气候区, 多年平均降水量为 565 mm、水面蒸发量为 1 140 mm, 多年平均气温为 11.5℃、平均相对湿度为 56.8%, 年均无霜期 185 d。降水多集中在 7—9 月份, 其降水量占全年降水量的 60%~70%。地下水埋深大于 12 m。果园土壤质地为粉壤土, 平均干容重为 1.55 g/cm<sup>3</sup>, 田间持水率为 30% (体积含水率)。

### 1.2 试验设计

果园内共种植桃树 90 棵, 株、行距分别为 3 m、4 m, 行间没有种植其他农作物。桃树品种为久保, 8 a 生, 平均胸径为 11.2~12.7 cm。桃树大约 4 月底发芽, 10 月底落叶, 生育期共 180 d 左右。根据其生长特征, 桃树全生育期共分为 4 个生长阶段, 即生育初期 (5 月 6—25 日, 20 d)、发育期 (5 月 26 日—7 月 4 日, 40 d)、生育中期 (7 月 5 日—10 月 17 日, 105 d) 和生育末期 (10 月 18 日—11 月 1 日, 15 d)<sup>[1]</sup>。供试桃树均种植在果园内 12 个尺寸 (长 × 宽 × 深) 为 1.8 m × 1.8 m × 1.9 m 的排水式蒸渗仪中, 每个蒸渗仪中种植一棵果树。蒸渗仪内的土壤结构和质地与周边大田土壤一致。桃树采用小管出流方式灌溉。在每棵果树的两侧分别布置 1 条毛管, 出水流量约 17 L/h, 灌水量由水表计量。果树灌溉为充分灌溉, 灌水定额和灌溉时间按照当地的灌溉制度执行。2012 年灌水日期分别为 5 月 17 日、6 月 11 日、7 月 2 日、8 月 27 日、9 月 20 日和 10 月 12 日, 灌水定额均为 40 mm, 灌溉定额为 240 mm; 2013 年灌水日期分别为 5 月 14 日、6 月 17 日、7 月 23 日、8 月 21 日、9 月 28 日和 10 月 21 日, 灌水定额

均为 37.5 mm,灌溉定额为 225 mm。

在距每棵果树树干 80 cm 处,埋设一根 150 cm 深的 Trime 土壤水分监测管,每 2 ~ 3 d 采用 TDR 土壤水分剖面测量系统(Trime - Pico - IPH 型,德国)测定一次土壤含水率,用以计算作物实际蒸散量。在降水或灌溉前后各加测一次。土壤含水率测定间距为 10 cm,测定深度为 130 cm。土壤蒸发量采用自制的微型蒸渗仪测定。微型蒸渗仪由 PVC 管制成,其直径为 9 cm、高为 15 cm。在每个排水式蒸渗仪内,沿果树两侧 45°斜线方向布置 2 个微型蒸渗仪,取其平均值作为土壤蒸发量的代表值。每天 08:00 采用精度 0.1 g 的天平对微型蒸渗仪称量,其换土频次按《灌溉试验规范 SL13—2004》<sup>[26]</sup> 执行。在每棵果树树干的北侧、距地面 30 cm 高处安装一套热扩散式(TDP)茎流系统(Dynamax,美国),实时监测桃树茎液流速率的变化情况。茎流计每隔 30 min 自动采集一次数据。根据测定的温差计算茎液流速率,将茎液流速率除以每棵树的占地面积即株距乘以行距,即可换算为植株蒸腾速率<sup>[3]</sup>。气象资料由设置在果园中央的 Watchdog 2000 型自动气象站(Spectrum,美国)自动采集,观测项目包括气温、相对湿度、风速与风向、太阳辐射量和降水量等,采集间隔为 15 min。叶面积指数采用 LAI 2000 型冠层分析仪(LI-COR,美国)测定,每 14 d 测定一次。

### 1.3 双作物系数法计算与精度评估

双作物系数法中的作物系数由基础作物系数( $K_{cb}$ )和土壤蒸发系数( $K_e$ )两部分组成,分别描述作物蒸腾和土壤蒸发作用对作物系数的影响<sup>[21]</sup>。

双作物系数法计算实际蒸散量的基本公式为

$$ET_c = (K_s K_{cb} + K_e) ET_o \quad (1)$$

$$T = K_s K_{cb} ET_o \quad (2)$$

$$E = K_e ET_o \quad (3)$$

式中  $ET_c$ ——作物实际蒸散量,mm

$K_s$ ——水分胁迫状况对植株蒸腾影响的水分胁迫系数,取 1

$K_{cb}$ ——基础作物系数

$K_e$ ——土壤蒸发系数

$ET_o$ ——参考作物蒸散量,mm

$T$ ——双作物系数法计算的植株蒸腾量,mm

$E$ ——双作物系数法计算的土壤蒸发量,mm

$K_{cb}$ 根据 FAO-56 中的推荐值和修正公式,结合试验区气象条件进行修正, $ET_o$ 根据气象资料由 Penman-Monteith 公式计算<sup>[1]</sup>,各参数的取值及计算方法参照 FAO-56<sup>[1]</sup>。

在充分灌溉条件下,可据实测的植株蒸腾量和土壤蒸发量,计算基础作物系数  $K_{cb}$  和土壤蒸发系数

$K_e$ ,其计算公式分别为

$$K_{cb} = T_s / ET_o \quad (4)$$

$$K_e = E_s / ET_o \quad (5)$$

式中  $T_s$ ——液流法实测的植株蒸腾量,mm

$E_s$ ——微型蒸渗仪实测的土壤蒸发量,mm

为评估双作物系数法估算的实际蒸散量  $ET_c$  与液流法和水量平衡法测定结果的差异性,引入均方根-实测值标准偏差比(Ratio of root-mean-square error to the standard deviation of measured data,RSR)和纳什效率系数(Nash-Sutcliffe efficiency,NSE)<sup>[27]</sup>,其计算公式分别为

$$R_{SR} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (ET_i^{obs} - ET_i^{cal})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (ET_i^{obs} - ET_{mean})^2}} \quad (6)$$

$$N_{SE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (ET_i^{obs} - ET_i^{cal})^2}{\sum_{i=1}^n (ET_i^{obs} - ET_{mean})^2} \quad (7)$$

式中  $ET_i^{obs}$ ——用液流法或水量平衡法测定的第  $i$  个  $ET_c$  值

$ET_i^{cal}$ ——用双作物系数法计算的第  $i$  个  $ET_c$  值

$ET_{mean}$ ——实测  $ET_c$  的平均值

$n$ ——观测值的数量

根据 MORIASI 等<sup>[27]</sup> 的研究结果,当  $0 < R_{SR} < 0.50$  且  $0.75 < N_{SE} < 1.0$  时,两种方法得到结果的一致性“非常好”;当  $0.50 \leq R_{SR} < 0.6$  且  $0.65 < N_{SE} \leq 0.75$  时,其结果的一致性“良好”;当  $0.60 \leq R_{SR} < 0.70$  且  $0.50 < N_{SE} \leq 0.65$  时,其结果的一致性属于“满意”水平;当  $R_{SR} \geq 0.70$  且  $N_{SE} \leq 0.50$  时,其结果的一致性属于“不满意”水平。 $R_{SR}$  值越小且  $N_{SE}$  值越接近 1,则采用双作物系数法估算的蒸散量越接近液流法或水量平衡法实测结果,即模型模拟计算的效果越好。

## 2 结果与讨论

### 2.1 参考作物蒸散强度与参考作物蒸散量

根据自动气象站测定的相关气象资料,按照 FAO-56 推荐的 Penman-Monteith 公式<sup>[1]</sup>,计算试验期间参考作物蒸散强度随时间的变化情况(图 1)。参考作物蒸散强度在年内的变化总体上呈先增大后减小的趋势,其波峰出现在阳光充足、气温较高、降水偏少的 5、6 月份,波谷出现在温度较低的 12 月份。2012 年和 2013 年桃树生育期内平均参考作物蒸散强度分别为 2.78 mm/d 和 2.70 mm/d,全生育期参

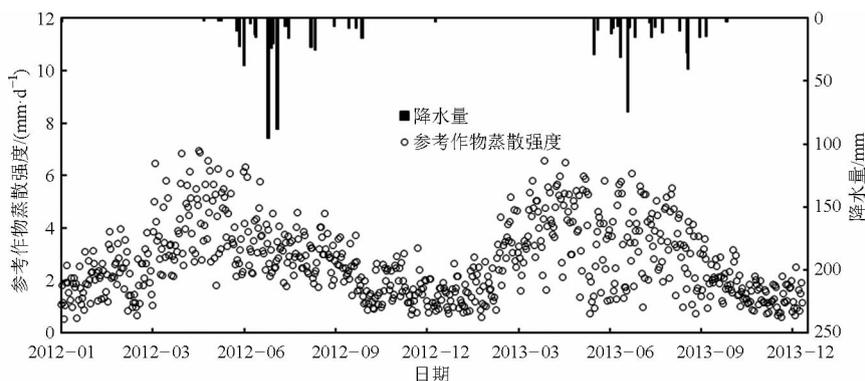


图 1 2012 年和 2013 年参考作物蒸散强度和降水量随时间的变化

Fig. 1 Variations of reference crop evapotranspiration rate  $ET_0$  and precipitation with time in 2012 and 2013

考作物蒸散量分别为 591.8、565.4 mm。与 2012 年同期相比,2013 年 6 月份部分参考作物蒸散强度偏低(小于 2 mm/d),可能是由于天气多云引起的太阳辐射量和温度过低造成的<sup>[28]</sup>。

## 2.2 作物蒸散量及其组分

### 2.2.1 土壤蒸发强度与蒸发量

图 2 为 2012 年和 2013 年桃树生育期内土壤蒸发强度计算值与实测值随时间的变化过程。根据双作物系数法计算的土壤蒸发强度随时间总体上呈逐渐减小的趋势,5、6 月份的蒸发强度相对较大(图 2)。2012 年和 2013 年计算的桃树生育期内平均土壤日蒸发强度分别为 0.83 mm/d 和 0.85 mm/d,全生育期土壤蒸发量分别为 148.7 mm 和 151.4 mm,4 个生育期蒸发量分别为 22.7、40.4、79.6、6.5 mm 和 27.7、42.9、75.0、5.7 mm。通过微型蒸渗仪测定的土壤蒸发强度在整个生育期内呈先增大后减小的趋势,7、8 月份最大,这一规律与双作物系数法的计算结果明显不一致。2012 年和 2013 年实测的生育期内平均土壤蒸发强度分别为 1.37 mm/d 和 1.35 mm/d,全生育期土壤蒸发量分别为 245.1 mm 和 241.5 mm,不同生育期的蒸发量分别为 20.5、56.2、160.9、7.6 mm 和 21.2、59.7、151.3、9.2 mm。

在桃树全生育期内双作物系数法计算的土壤蒸发量比实测值小 59.5% ~ 64.8%。生育初期的土壤蒸发量计算值比实测值大 9.5% ~ 23.5%,而发育期、生育中期和生育末期则分别比实测值小 39.0% ~ 40.9%、102.1% ~ 102.7% 和 16.1% ~ 60.0%。这表明,双作物系数法低估了土壤蒸发量,特别在桃树生育中期。

土壤蒸发主要受气象因素以及降水或灌溉事件的影响。土壤蒸发强度实测值较大的点通常出现在夏季降水或者灌溉事件后,此时的土壤湿润且太阳辐射强、温度高,有利于土壤蒸发<sup>[23]</sup>。微型蒸渗仪中的土壤与其周围环境的差异也会高估土壤蒸发量<sup>[29]</sup>,而双作物系数法较难考虑降水或者灌溉事件对土壤蒸发带来的影响,从而低估了土壤蒸发强度,同时这也可能是实测土壤蒸发强度比双作物系数法计算值波动相对较大的原因。

### 2.2.2 作物蒸腾速率与蒸腾量

根据双作物系数法计算的桃树蒸腾速率与液流法的测定值在整个生育期内均呈现先增大后减小的趋势,最大蒸腾速率出现在 7 月份(图 3)。2012 年和 2013 年计算的平均蒸腾速率分别为 2.20 mm/d

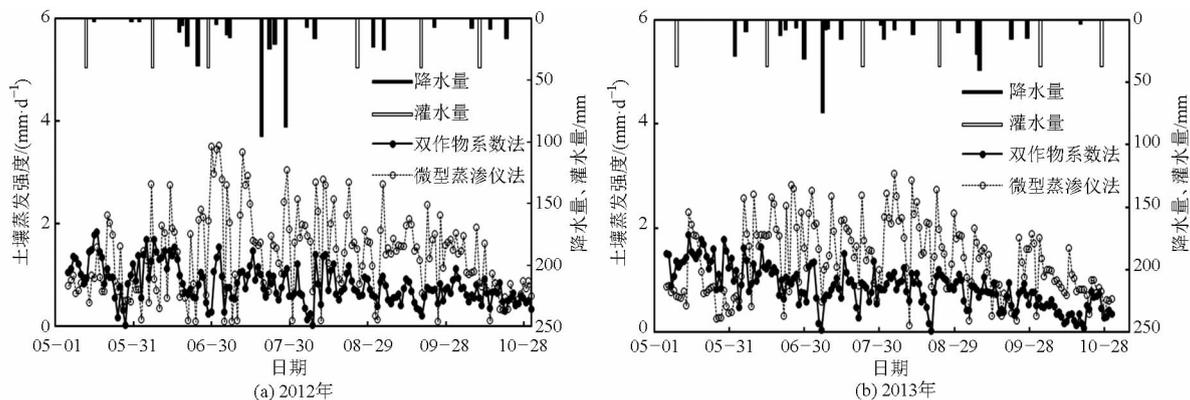


图 2 2012 年和 2013 年桃树生育期内土壤蒸发强度计算值(双作物系数法)与实测值(微型蒸渗仪)随时间的变化

Fig. 2 Variations of daily soil evaporation rates calculated by dual crop coefficient approach and measured by micro-lysimeter with time during growth periods of peach tree in 2012 and 2013

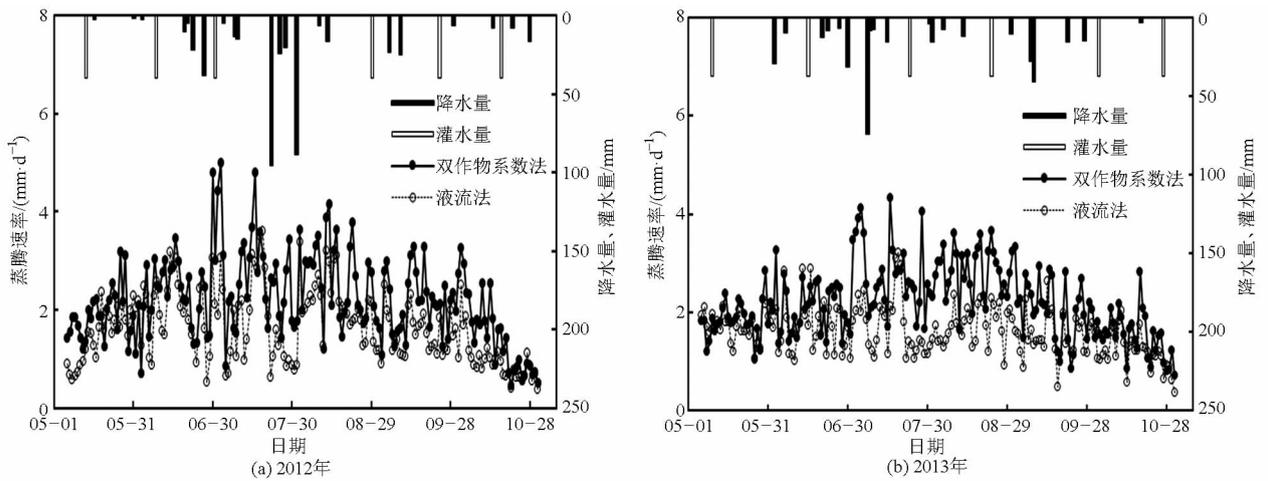


图3 2012年和2013年桃树生育期内作物蒸腾速率计算值(双作物系数法)与实测值(液流法)随时间的变化

Fig.3 Variations of crop transportation rates calculated by dual crop coefficient approach and measured by sap flow method with time during growth periods of peach tree in 2012 and 2013

和 2.16 mm/d, 而其实测值分别为 1.64 mm/d 和 1.60 mm/d, 前者比后者大 25.5% ~ 25.9%。全生育期作物蒸腾量计算值在 2012 年和 2013 年分别为 393.6 mm 和 387.6 mm, 各生育期的蒸腾量分别为 36.3、98.1、249.1、10.2 mm 和 36.0、86.3、250.6、14.7 mm。2012 年和 2013 年全生育期作物蒸腾量实测值分别为 293 mm 和 287.6 mm, 4 个生育期蒸腾量分别为 26.8、79.6、177.9、8.0 mm 和 34.7、69.0、170.4、12.5 mm。全生育期作物蒸腾量计算值比测定值大 25.6% ~ 26.0%, 各生育期计算值比测定值分别大 3.5% ~ 26.3%、18.8% ~ 20.0%、28.6% ~ 32.0% 和 14.2% ~ 14.8%。与土壤蒸发量相比, 根据双作物系数法计算的桃树蒸腾量与液流法测定值之间的差异更小。

作物蒸腾强度主要受环境因子、土壤水分状况以及作物自身生理特性等的共同影响<sup>[21]</sup>。桃树生育初期, 气温较低且桃树叶面积较小, 因而作物蒸腾强度较低; 随着时间的延续, 气温增高, 桃树叶面积

增大, 作物蒸腾强度也相应地不断增大; 而后, 随着气温降低和桃树生理生长的衰退, 作物蒸腾强度随之减小。在本研究中, 根据双作物系数法计算作物蒸腾强度时采用 FAO-56 推荐的基础作物系数  $K_{cb}$ , 其值可能比实际  $K_{cb}$  值偏大<sup>[21]</sup>, 从而导致计算的作物蒸腾强度比实测值稍微偏大。另外, 作物蒸腾强度计算值和实测值的不一致主要发生在 7、8 月份, 这期间属于雨季, 阴雨天较多。阴雨天气会导致太阳辐射强度与温度降低, 这可能会对植株蒸腾形成不利的影响<sup>[17]</sup>; 此外, 较多的降水量也可能导致土壤过分湿润, 影响作物根系的正常呼吸功能, 从而降低作物蒸腾强度<sup>[30]</sup>。

### 2.2.3 作物实际蒸散强度与实际蒸散量

根据双作物系数法计算的作物实际蒸散强度与液流法和水量平衡法的测定值在整个生育期内均呈先增大后减小的趋势, 峰值出现在气温最高和桃树生长最为旺盛的 7 月份左右(图 4)。双作物系数法计算的桃树实际蒸散强度变化范围在 2012 年和

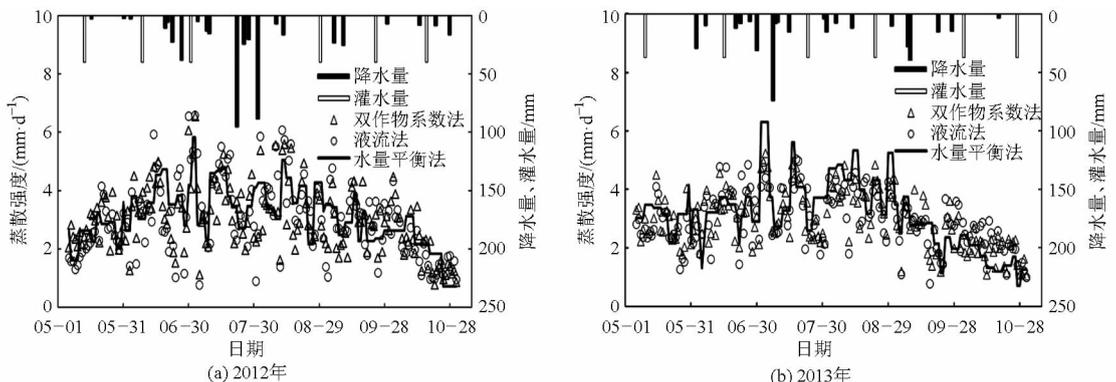


图4 2012年和2013年桃树生育期内作物实际蒸散强度计算值(双作物系数法)与实测值(液流法和水量平衡法)随时间的变化

Fig.4 Variations of actual evapotranspiration rates calculated by dual crop coefficient approach and measured by sap flow and water balance methods with time during growth periods of peach tree in 2012 and 2013

2013年分别为0.8~6.6 mm/d和1.0~5.8 mm/d,液流法测定的日蒸散强度分别为0.8~6.6 mm/d和0.8~5.4 mm/d,水量平衡法测定的分别为0.7~5.8 mm/d和0.7~6.3 mm/d。双作物系数法计算值与2种实测方法的测定结果非常一致,均呈显著正相关( $R^2 > 0.77^{**}$ 和 $R^2 > 0.76^{**}$ ,图5)。2012年和2013年全生育期作物实际蒸散量计算值分别为540.8 mm和524.6 mm,各生育期蒸散量分别为55.2、138.6、330.3、16.7 mm和59.0、125.5、318.2、21.9 mm;液流法测定的全生育期作物实际蒸散量分别为538.7 mm和528.1 mm,4个生育期蒸散量分别为46.9、135.8、339.8、16.3 mm和56.0、128.7、321.8、21.7 mm;根据水量平衡法测定的全生

育期作物蒸散量分别为556.8 mm和558.0 mm,4个生育期蒸散量分别为50.2、143.2、347.2、16.1 mm和60.7、136.0、344.6和16.6 mm。双作物系数法计算的全生育期作物实际蒸散量与液流法测定值的相对误差小于1.0%,而与水量平衡法测定结果的相对误差小于4.5%。除生育初期的相对误差为5.4%~17.7%外,双作物系数计算的实际蒸散量与液流法测定值的相对误差在其他生育期均小于3.0%;与水量平衡法相比,除生育初期的相对误差为3.0%~15.0%外,计算值与测定值在其他生育期的相对误差均小于8.0%。这表明,双作物系数法可以较精确地估算华北地区桃树的实际蒸散强度和蒸散量。

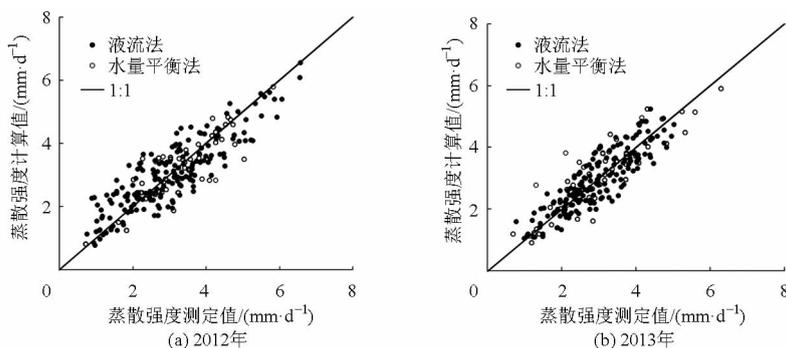


图5 2012年和2013年双作物系数法计算的桃树实际蒸散强度与液流法及水量平衡法测定值的比较

Fig.5 Comparisons of actual evapotranspiration rates of peach tree between those calculated with dual crop coefficient method and measured by sap flow and water balance methods in 2012 and 2013

根据双作物系数法计算的实际蒸散量与2种实测方法测定值的均方根-实测值标准偏差比(RSR)和纳什效率系数(NSE)计算结果(表1)可知,与液流法相比,除生育初期为“不满意”评价外,其他各生育期以及全生育期的评价等级均在“良好”水平以上(表1)。由于水量平衡法的测量结果是两个测量间隔(2~3 d)的平均值,为便于比较,将双作物系

数法计算结果也取相同测量间隔的平均值。RSR和NSE计算结果显示,除生育末期的评价等级为“不满意”外,其余各生育期以及全生育期基本为“良好”。这说明除生育初期外,根据双作物系数法计算的桃树实际蒸散量与液流法和水量平衡法的测定结果具有较好的一致性,估算结果的可靠程度较高,这与LIU等<sup>[31]</sup>对小麦和玉米的研究结论相似。

表1 2012年和2013年桃树各生育期实际蒸散量计算值与液流法及水量平衡法实测值一致性评价

Tab.1 Consistency evaluation of actual evapotranspiration calculated by dual crop coefficient approach and measured by sap flow and water balance methods at various growth stages of peach tree in 2012 and 2013

年份	参数	生育初期		发育期		生育中期		生育末期		全生育期	
		液流法	水量平衡法								
2012年	RSR	0.71	0.57	0.49	0.46	0.53	0.45	0.49	0.75	0.48	0.38
	NSE	0.49	0.68	0.76	0.79	0.72	0.80	0.72	0.43	0.77	0.86
	评价等级	U	G	VG	VG	G	VG	VG	U	VG	VG
2013年	RSR	0.71	0.54	0.54	0.61	0.54	0.47	0.61	0.97	0.50	0.45
	NSE	0.49	0.71	0.71	0.62	0.70	0.78	0.65	0.45	0.75	0.79
	评价等级	U	G	G	S	G	VG	G	U	VG	VG

注: VG为非常好,G为良好,S为满意,U为不满意。

### 2.3 土壤蒸发系数、基础作物系数和作物系数

图6为2012年和2013年根据双作物系数法计算的土壤蒸发系数( $K_e$ )、基础作物系数( $K_{cb}$ )及

作物系数( $K_c$ )和由微型蒸渗仪、液流法和水量平衡法测定值随时间的变化过程。除长时间未发生降水或灌溉事件而导致土壤蒸发能力显著减小

外,总体而言,根据双作物系数法计算的土壤蒸发系数在整个生育期内变化不大;根据微型蒸发仪测定的土壤蒸发系数在桃树生育初期和生育末期相对较小,而在其他生育期则较大。在桃树发育

期和生育中期,土壤蒸发系数测定值明显大于其计算值。2012年和2013年平均土壤蒸发系数计算值分别为0.25和0.24,而其测定值分别为0.42和0.41。

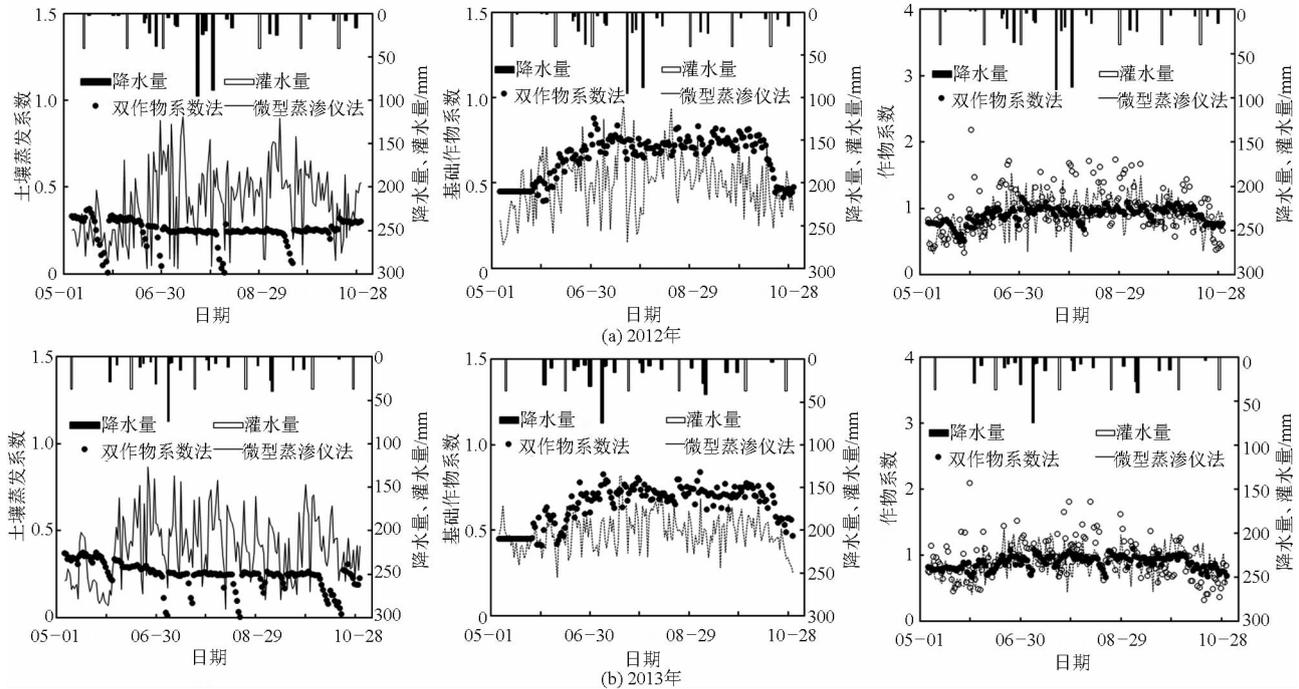


图6 2012年和2013年双作物系数法计算的土壤蒸发系数、基础作物系数和作物系数与微型蒸渗仪、液流法和水量平衡法的测定值随时间的变化

Fig.6 Variations of soil evaporation coefficient, basic crop coefficient and crop coefficient calculated by dual crop coefficient approach and measured by micro-lysimeter, sap flow and water balance methods with time during growth periods of peach tree in 2012 and 2013

根据双作物系数法计算的桃树基础作物系数( $K_{cb}$ )和由液流法的测定值随时间的变化均呈先增大后减小的趋势,在生育中期即7—9月份相对较大。全生育期基础作物系数计算值(0.64~0.65)明显大于其测定值(0.50~0.51)。根据双作物系数法计算的作物系数( $K_c$ )以及由液流法和水量平衡法的测定值随时间也呈先增大后减小的变化趋势。全生育期平均作物系数的计算值与液流法和水量平衡法的测定结果基本相似,3种方法确定的全生育期平均作物系数分别为0.90~0.91、0.88~0.91和0.93~0.97。除生育初期的计算值大于液流法的测定值外,其他生育期的作物系数计算值与液流法测定值相似;而作物系数计算值在生育初期和生育末期均小于水量平衡法测定值,在其余生育期则与水量平衡法实测值接近。

根据双作物系数法计算的土壤蒸发系数小于实测值而基础作物系数大于实测值(图6),这可能是由于计算土壤蒸发系数 $K_e$ 时植被覆盖率 $f_c$ 的不确定性<sup>[20]</sup>或FAO-56推荐的典型条件与试验地区不一致而导致基础作物系数 $K_{cb}$ 初始值的偏差所致<sup>[32]</sup>。双作物系数法中的土壤蒸发系数和基础作物系数分

别表征土壤蒸发和作物蒸腾能力,但气象因子可直接或间接影响土壤蒸发与作物蒸腾<sup>[1,24]</sup>。在桃树生育旺盛时期,气象条件变化剧烈,降水事件频繁,从而导致土壤含水率变化较大,这也会影响土壤蒸发系数和基础作物系数。虽然土壤蒸发系数和基础作物系数的计算值与实测值之间存在相对较大的偏差,但由双作物系数法计算的作物系数 $K_c$ 与实测值基本相同,因此利用双作物系数法可以较精确地估算桃树的作物系数。

### 3 结论

(1) 根据双作物系数法计算的全生育期土壤蒸发量为148.7~151.4 mm,而微型蒸渗仪的测定值为241.5~245.1 mm,计算值比测定值小38.2%~38.4%;双作物系数法计算的桃树蒸腾量为387.6~393.6 mm,液流法的测定值为287.6~293.0 mm,计算值比实测值大34.3%~34.8%;实际蒸散量计算值为524.6~540.8 mm,液流法和水量平衡法实测值分别为528.1~538.7 mm和556.8~558.0 mm,计算值与2种实测法测定结果的误差分别小于1.0%和4.5%。

(2) 除生育初期外,其他生育期的实际蒸散量计算值与液流法实测值的一致性评价级别均为“良好”水平以上,全生育期的评价等级为“非常好”;除生育末期外,其它生育期蒸散量计算值与水量平衡法实测值一致性评价基本“良好”,在全生育期为“非常好”水平。

(3) 根据双作物系数法计算的全生育期平均作物系数为 0.90 ~ 0.91,液流法和水量平衡法的测定值分别为 0.88 ~ 0.91 和 0.93 ~ 0.97。除生育初期计算值明显大于实测值外,其余生育期以及全生育

期平均作物系数计算值与液流法测定值基本相似;而作物系数计算值在生育初期和生育末期均小于水量平衡法的测定值,在其它生育期则与水量平衡法测定结果相似。

(4) 虽然利用双作物系数法计算的土壤蒸发系数和基础作物系数与实测值有一定的差异,但计算的蒸散量以及作物系数与实测值基本一致。因此,可以利用双作物系数法估算干旱半干旱地区充分灌溉条件下桃树的蒸散量和作物系数,并据此初步制定桃树灌溉制度。

#### 参 考 文 献

- 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, 1998.
- ANDA A, SILVA J A T, SOOS G. Evapotranspiration and crop coefficient of common reed at the surroundings of Lake Balaton, Hungary[J]. Aquatic Botany, 2014, 116: 53 - 59.
- ABRISQUETA I, ABRISQUETA J M, TAPIA L M, et al. Basal crop coefficients for early-season peach trees[J]. Agricultural Water Management, 2013, 121(2): 158 - 163.
- CHOUDHURY B U, SINGH A K, PRADHAN S. Estimation of crop coefficients of dry-seeded irrigated rice-wheat rotation on raised beds by field water balance method in the Indo-Gangetic plains, India[J]. Agricultural Water Management, 2013, 123: 20 - 31.
- LOVELLI S, PIZZA S, CAPONIO T, et al. Lysimetric determination of muskmelon crop coefficients cultivated under plastic mulches[J]. Agricultural Water Management, 2005, 72(2): 147 - 159.
- 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.
- LU Ping, URBAN L, ZHAO Ping. Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice[J]. Acta Botanica Sinica, 2004, 46(6): 631 - 646.
- CAMMALLERI C, RALLO G, AGNESE C, et al. Combined use of eddy covariance and sap flow techniques for partition of ET fluxes and water stress assessment in an irrigated olive orchard[J]. Agricultural Water Management, 2013, 120: 89 - 97.
- ROUSSEAU X M C, FIGUEROLA P I, GUILLERMO C, et al. Seasonal variations in sap flow and soil evaporation in an olive (*Olea europaea* L.) grove under two irrigation regimes in an arid region of Argentina[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(6): 1037 - 1044.
- WILSON K B, HANSON P J, MULHOLLAND P J, et al. A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: sap-flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 106(2): 153 - 168.
- LI Xianyue, YANG Peiling, REN Shumei, et al. Modeling cherry orchard evapotranspiration based on an improved dual-source model[J]. Agricultural Water Management, 2010, 98(1): 12 - 18.
- BRAUD I, DANTAS-ANTONINO A C, VAUCLIN M, et al. A simple soil-plant-atmosphere transfer model (SiSPAT) development and field verification[J]. Journal of Hydrology, 1995, 166(3 - 4): 213 - 250.
- NOILHAN J, MAHFOUF J F. The ISBA land surface parameterisation scheme[J]. Global and Planetary Change, 1996, 13(1 - 4): 145 - 159.
- BOULET G, CHEHBOUNI A, BRAUD I, et al. A simple water and energy balance model designed for regionalization and remote sensing data utilization[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 105(1 - 3): 117 - 132.
- BRISSEON N, MARY B, RIPOCHE D, et al. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn[J]. Agronomie, 1998, 18(5 - 6): 311 - 346.
- SULEIMAN A A, SOLER C M T, HOOGENBOOM G. Evaluation of FAO - 56 crop coefficient procedures for deficit irrigation management of cotton in a humid climate[J]. Agricultural Water Management, 2007, 91(1 - 3): 33 - 42.
- ALBERTO M C R, QUILTY J R, BURESH R J, et al. Actual evapotranspiration and dual crop coefficients for dry-seeded rice and hybrid maize grown with overhead sprinkler irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2014, 136: 1 - 12.
- 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(2): 221 - 234.
- LOPEZ-URREA R, OLALLA F M D S, MONTORO A, et al. Single and dual crop coefficients and water requirements for onion (*Allium cepa* L.) under semi arid conditions[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(6): 1031 - 1036.

- 20 ER-RAKI S, CHEHBOUNI A, BOULET G, et al. Using the dual approach of FAO - 56 for partitioning ET into soil and plant components for olive orchards in a semi-arid region[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(11): 1769 - 1778.
- 21 FANDINO M, CANCELA J J, REY B J, et al. Using the dual- $K_c$  approach to model evapotranspiration of Albarino vineyards (*Vitis vinifera* L. cv. Albarino) with consideration of active ground cover[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 112: 75 - 87.
- 22 PACO T A, FERREIRA M I, CONCEICAO N. Peach orchard evapotranspiration in a sandy soil: comparison between eddy covariance measurements and estimates by the FAO 56 approach[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 85(3): 305 - 313.
- 23 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.
- 24 ALLEN R G, PEREIRA L S, SMITH M, et al. FAO - 56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2005, 131(1): 2 - 13.
- 25 樊引琴,蔡焕杰. 单作物系数法和双作物系数法计算作物需水量的比较研究[J]. *水利学报*, 2002(3): 50 - 54.  
FAN Yinqin, CAI Huanjie. Comparison of crop water requirements computed by single crop coefficient approach and dual crop coefficient approach[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002(3): 50 - 54. (in Chinese)
- 26 中华人民共和国水利部. 灌溉试验规范 SL13—2004[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- 27 MORIASI D N, ARNOLD J G, VAN LIEW M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(3): 885 - 890.
- 28 王潇潇,潘学标,顾生浩,等. 内蒙古地区参考作物蒸散变化特征及其气象影响因子[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(增刊1): 142 - 152.  
WANG Xiaoxiao, PAN Xuebiao, GU Shenghao, et al. Trend in reference crop evapotranspiration and meteorological factors affecting trends in Inner Mongolia[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(Supp. 1): 142 - 152. (in Chinese)
- 29 李王成,王为,冯绍元,等. 不同类型微型蒸发器测定土壤蒸发的田间试验研究[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(10): 6 - 13.  
LI Wangcheng, WANG Wei, FENG Shaoyuan, et al. Field experimental study on the measurement of soil evaporation using different types of micro-lysimeters[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(10): 6 - 13. (in Chinese)
- 30 ZHAO Nana, LIU Yu, CAI Jiabing, et al. Dual crop coefficient modelling applied to the winter wheat-summer maize crop sequence in North China Plain: basal crop coefficients and soil evaporation component[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 117(31): 93 - 105.
- 31 LIU Yujie, LUO Yi. A consolidated evaluation of the FAO - 56 dual crop coefficient approach using the lysimeter data in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(1): 31 - 40.
- 32 陈凤,蔡焕杰,王健,等. 杨凌地区冬小麦和夏玉米蒸发蒸腾和作物系数的确定[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(5): 191 - 193.  
CHEN Feng, CAI Huanjie, WANG Jian, et al. Estimation of evapotranspiration and crop coefficients of winter wheat and summer maize in Yangling Zone[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(5): 191 - 193. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 170 页)

- 19 刘继龙, 马孝义, 张振华. 土壤水盐空间异质性及尺度效应的多重分形[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(1): 81 - 86.  
LIU Jilong, MA Xiaoyi, ZHANG Zhenhua. Multifractal study on spatial variability of soil water and salt and its scale effect[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(1): 81 - 86. (in Chinese)
- 20 刘继龙, 马孝义, 张振华. 土壤入渗特性的空间变异性及土壤转换函数[J]. *水科学进展*, 2010, 21(2): 214 - 221.  
LIU Jilong, MA Xiaoyi, ZHANG Zhenhua. Spatial variability of soil infiltration characteristics and its pedo-transfer functions[J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(2): 214 - 221. (in Chinese)
- 21 管孝艳, 杨培岭, 吕焯. 基于多重分形理论的农田土壤特性空间变异性分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2011, 19(5): 712 - 720.  
GUAN Xiaoyan, YANG Peiling, LÜ Ye. Analysis on spatial variability of soil properties based on multifractal theory[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2011, 19(5): 712 - 720. (in Chinese)
- 22 EGBALL B, SCHEPERS J S, NEGAHBAN M, et al. Spatial and temporal variability of soil nitrate and corn yield: multifractal analysis[J]. *Agronomy Journal*, 2003, 95(2): 339 - 346.
- 23 陈双平, 韩凯, 马猛, 等. 染色体碱基序列的联合多重分形分析[J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(2): 298 - 301.  
CHEN Shuangping, HAN Kai, MA Meng, et al. The joint multi-fractal analysis of the base sequence of chromosomes[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(2): 298 - 301. (in Chinese)