

DOI: 10.5846/stxb201405030871

白岩, 朱高峰, 张琨, 马婷. 基于树干液流及涡动相关技术的葡萄冠层蒸腾及蒸散发特征研究. 生态学报, 2015, 35(23): 7821-7831.

Bai Y, Zhu G F, Zhang K, Ma T. Research of transpiration and evapotranspiration from a grapevine canopy combining the sap flow and eddy covariance techniques. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(23): 7821-7831.

基于树干液流及涡动相关技术的葡萄冠层蒸腾及蒸散发特征研究

白岩, 朱高峰*, 张琨, 马婷

兰州大学西部环境教育部重点实验室, 干旱环境与气候变化协同创新中心, 兰州 730000

摘要: 针对西北干旱区绿洲经济作物葡萄树冠层蒸腾及蒸散发特征的相关问题, 在甘肃省敦煌市南湖绿洲开展无核白葡萄树液流速率及蒸散发观测试验, 采用基于热平衡原理的包裹式茎流计, 详细分析了典型生长季 7—9 月份葡萄树蒸腾耗水规律, 使用“单位叶面积上的平均液流速率 $SF \times$ 叶面积指数 LAI”的方法, 实现了从单株到林分冠层蒸腾的尺度扩展, 并通过与涡动相关技术所测蒸散发数据对比, 详细研究了葡萄地冠层蒸腾及蒸散发规律。结果表明: 典型生长季中葡萄树液流速率日变化为单峰型曲线, 日均耗水量从 2.76 kg 到 10 kg 不等, 胸径越大的葡萄树日均耗水量越大; 冠层蒸腾及蒸散发日变化曲线亦为单峰型, 白天 8:00—12:00 与 17:00—20:00 期间, 葡萄冠层蒸腾与蒸散发曲线均比较吻合, 该时间段葡萄地蒸散发绝大部分来源于葡萄冠层蒸腾, 而 12:00—17:00 之间由于午后太阳辐射强烈土壤蒸发量增加, 葡萄蒸散发大于冠层蒸腾; 典型生长季 3 个月中, 葡萄冠层蒸腾量的变化范围在 1.88—8.12 mm/d 之间, 日均冠层蒸腾量为 6.12 mm/d, 蒸散发在 1.74 mm/d 至 10.78 mm/d 之间, 日均蒸散量为 7.13 mm/d; 日均土壤蒸发量约为 1.01 mm/d, 只占总蒸散发量的 14.2%, 日均冠层蒸腾占日均蒸散发的比重达到 85.8%, 说明该生长阶段冠层蒸散发以作物蒸腾为主。

关键词: 树干液流; 热平衡原理; 涡动相关; 冠层蒸腾; 蒸散发

Research of transpiration and evapotranspiration from a grapevine canopy combining the sap flow and eddy covariance techniques

BAI Yan, ZHU Gaofeng*, ZHANG Kun, MA Ting

Key Laboratory of Western China's Environmental Systems with the Ministry of Education, Collaborative Innovation Centre for Arid Environments and Climate Change, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: In agriculture ecosystems, more than 90% of all water input is lost by evapotranspiration (*ET*). Thus, the accurate measurement of *ET* and its associated components (i.e., canopy transpiration and soil evaporation) are essential for many agricultural applications, such as irrigation scheduling, drainage, and yield forecasts. In the arid region of northwestern China, water resources are rare and are often the restricting factor for plant production. By comprehensively using the sap flow method and eddy covariance (*EC*) technique, the single tree sap flow velocity and evapotranspiration flux from the grapevine in a desert oasis ecosystem located in Nanhu County, China, were measured during a typical growing season from July 13 to September 12, 2013. Canopy transpiration was then obtained by multiplying the average sap flow per leaf area unit by the leaf area index (LAI), and compared with the *EC*-measured evapotranspiration flux. The results showed that the diurnal dynamics of sap flow velocity of all sample trees exhibited single peak curves. With increasing diameter of the grapevine at breast height (DBH), the peak in the diurnal variation of sap flow velocity tended to increase.

基金项目: 国家自然科学基金项目(31370467); 教育部“新世纪人才”项目(NCET-11-0219); 中央高校基本科研业务费专项资金(lzujbky-2013-m02)

收稿日期: 2014-05-03; **网络出版日期:** 2015-05-19

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

Thus, the sap flow velocities of different single trees were mainly controlled by DBH. The average daily water consumption of the grapevine was exponentially associated with DBH, while the regression relationships differed significantly in different months. Mean water consumption of each sample trees ranged from 2.76 kg to 10 kg during a typical growing season, which was consistent with previous studies on the water consumption of *Tamarix ramosissima* in the hinterland of Taklimakan Desert in China. Daytime dynamics of canopy transpiration upscaled by sap flow (E_{sf}) and evapotranspiration measured by EC (ET_{ec}) both exhibited the unimodal type, and their variation trends were also relatively identical. From 08:00 to 12:00 and 17:00 to 20:00, there was good agreement between the values of E_{sf} and ET_{ec} , which means that evapotranspiration primarily originated from canopy transpiration for this period. However, from 12:00 to 17:00, the values of E_{sf} were lower than those of ET_{ec} , due to the contributions of soil evaporation to the evapotranspiration process. During the study period, the daily evapotranspiration varied from 1.74 mm/d to 10.12 mm/d, with a mean value of 7.13 mm/d, while daily canopy transpiration ranged from 1.88 mm/d to 8.12 mm/d, with a mean value of 6.12 mm/d. The ratios of daily canopy transpiration to daily evapotranspiration varied from 60% to 98.3%, with a mean value of 85.8%. On cloudy and rainy days, the difference between daily evapotranspiration and daily canopy transpiration was very small, with both being less than 5 mm/d. These results indicate that evapotranspiration was dominated by canopy transpiration during the growth stage of the grapevine. The difference in daily evapotranspiration and daily canopy transpiration was daily soil evaporation with a mean value of 1.01 mm/d. However, this result still needs further experimental verification. Thus, the comprehensive use of the sap flow method and eddy covariance technique may help us to identify the characteristics evapotranspiration and its different components (canopy transpiration and soil evaporation) in ecosystem efficiently. This information will improve our understanding about how the evapotranspiration process interacts with environmental factors.

Key Words: sap flow, heat balance method, eddy covariance, canopy transpiration, evapotranspiration

蒸散发包括土壤蒸发和植被蒸腾两部分,是全球水循环和地表能量平衡的重要组成部分,在土壤-植物-大气连续体的能量、质量和动量交换中有重要作用^[1-2]。蒸散发也是水分利用效率计算、灌溉管理、水资源分配中不可缺少的数据。我国西北干旱区包括陕西、甘肃、宁夏、青海、新疆五省区及内蒙古中西部地区,面积约 3.5×10^6 km², 占国土面积的 32%。该地区降雨量稀少,气候干燥,日照和蒸发作用强烈,地表径流较少,生态环境条件脆弱,因而水成为该区域最稀缺的资源^[3]。清楚地认识西北干旱区典型生态系统作物蒸散发规律及水分运移机制,有助于全面了解区域能量平衡和水分循环,同时对于西北地区经济发展、生态稳定也具有十分重要意义。

涡动相关方法(EC)是目前公认的直接测定大气与生态系统之间水热交换通量最可靠的方法^[4-5],利用涡动相关技术可以较准确地测定植物林分尺度的冠层水热通量,但其难以区分作物蒸腾、土壤蒸发各自对冠层蒸散发的贡献大小^[6-7]。树干液流(SF)指蒸腾在植物体内引起的上升液流,目前应用热技术测量植物树干液流的方法已经日趋成熟^[8-9],但热技术仅能测定单树尺度的植物蒸腾耗水量,为此许多学者利用胸径^[10-11]、边材面积^[12-13]、叶面积^[14-15]等作为扩展指标对单树蒸腾耗水量进行扩展,从而估算出林分尺度的冠层蒸腾量^[16-17]。

目前,综合利用树干液流及涡动相关技术来测定西北干旱区经济作物冠层蒸散发的研究还比较少^[18]。本试验采用涡动相关技术测定典型生长季葡萄冠层蒸散发,同时采用树干液流技术研究葡萄树的生理生长规律及耗水特性,利用叶面积结合叶面积指数(LAI)对单株葡萄蒸腾耗水量进行扩展,从而估算出可与涡动数据进行对比的葡萄冠层蒸腾量。本研究综合使用树干液流及涡动相关两种技术,旨在较全面地掌握典型生长季葡萄树的作物蒸腾、土壤蒸发以及蒸散发规律,为西北干旱区沙漠绿洲水资源的有效利用和科学管理提供依据。

1 研究区概况

研究区位于甘肃省敦煌市西南 70 km 的南湖绿洲境内,东临库姆塔格沙漠,地理位置在 $94^{\circ}06'—94^{\circ}09'E$, $39^{\circ}51'—39^{\circ}55'N$ 之间,总面积 11.06 km^2 ,海拔高度范围在 1100—1297 m 之间,气候属暖温带干旱性气候,年均日较差在 $16—20^{\circ}\text{C}$ 之间,年平均温度 9.3°C ,全年降水稀少,年均降水量 36.9 mm,平均无霜期 145 d,年日照时数为 3115—3247 h,年总辐射量在 $5903.4—6309.5 \text{ MW}/\text{m}^2$ 之间,土壤类型为隐域性土壤,主要有沼泽土、草甸土和盐渍土等^[19]。研究区地势平坦,地表植被均质,种植作物 95% 以上为无核白葡萄树。无核白葡萄对生长条件要求严格,而敦煌南湖地区因其高温、干旱、生长期长的气候特点,成为我国除新疆吐鲁番、内蒙古乌海之外,最适宜无核白葡萄树栽培的优良场所之一。

核心研究区 ($450 \text{ m} \times 160 \text{ m}$) 位于敦煌南湖绿洲西南部(图 1),在区内开展了葡萄树干液流及蒸散发观测试验,观测日期为葡萄典型生长季 7 月份至 9 月份。区内有稳定灌溉水源,葡萄地平均每 20d 进行 1 次人工漫灌,土壤供水条件充分。无核白葡萄树生长季长约 140d 左右,每年 5 月初发芽,5 月底开花,9 月初果实成熟。

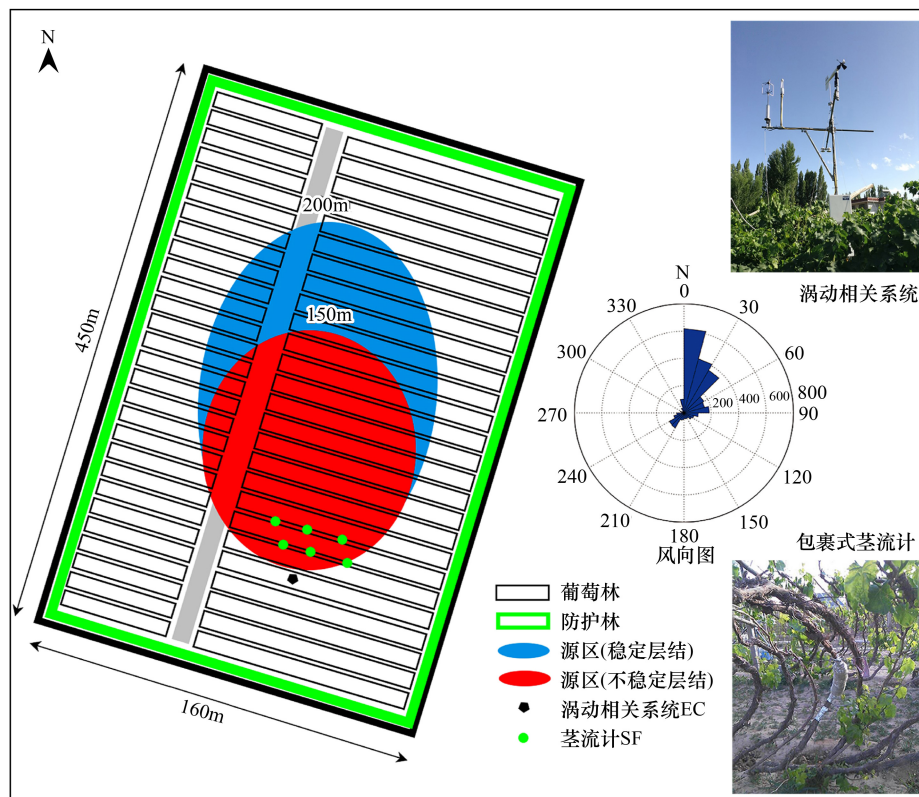


图 1 研究区示意图(包括实验场地范围、仪器架设及观测样树位置、风向图及源区分析结果)

Fig.1 Schematic plot of study site (Includes the scope of study site, instrument, sample trees and wind rose plot and the result of footprint analysis)

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

在核心研究区内选择 6 棵不同径级、生长良好、树干较为通直、无被挤压的无核白葡萄树作为试验对象,各样树具体参数见表 1。

表 1 观测样树参数

Table 1 Parameters of the sample-trees used for sap flow measurement

树号 Sample tree No.	树高 Height/m	胸径 Diameter at breast height/cm	胸高周长 Perimeter/cm	胸高全横截面积 Cross sectional area/cm ²
DG1 [#]	4.5	1.62	5.10	2.07
DG2 [#]	4.6	1.91	6.00	2.87
DG3 [#]	4.3	3.18	10.00	7.96
DG4 [#]	4.5	3.34	10.51	8.78
DG5 [#]	4.6	3.89	12.22	11.85
DG6 [#]	4.4	4.14	13.01	13.46

2.2 试验方法

2.2.1 液流速率及气象因子的测定

根据 FLOW32 包裹式植物茎流计的安装要求,在 6 棵样树主干灌溉水位以上安装茎流计,用以采集葡萄树液流速率数据,数据采集间隔为 30 min。核心研究区东南角布设有自动气象站、土壤温湿度传感器,用以采集风速、风向、净辐射、光合有效辐射、土壤温湿度、降雨量、大气压强等气象因子数据,数据采集间隔为 30 min。其中,净辐射(R_n)依据自动气象站四分量辐射计数据计算得到。自动气象站辐射正下方地下 50 mm 处,分四个方位(东、南、西、北)埋有的热通量板,土壤热通量(G)依据通量板数据平均求得。

2.2.2 涡动相关数据处理及源区分析

核心研究区自动气象站塔上架设有涡动相关仪(EC),葡萄冠层高度 2.5 m,涡动相关仪架设高度 4 m,试验观测期间 7—9 月份主导风向为东北风(图 1)。涡动相关仪的观测值是其观测源区内的加权平均值,通量贡献源区分析可用于对观测数据进行质量评价,确定观测到的通量是否来源于所感兴趣的研究区域^[20]。本试验通量贡献源区分析使用 FSAM 足迹解析模型^[21],分析结果如图 1 所示,全天主要通量源区均落在核心试验区葡萄地内,其中红圈代表白天大气不稳定层结时 80%通量源区分布(150 m),蓝圈代表夜间大气稳定层结时 80%通量源区分布(250 m)。

应用涡动相关数据时有必要进行相关校正^[22-23],本试验使用 EddyPro4.1.0 软件对原始数据进行处理,从处理后的数据中删除摩擦风速小于 0.1 的记录,取 2013 年 7 月至 9 月的数据做能量闭合分析,其闭合率达到 88%,数据质量较好。使用经处理后的潜热(LE)数据,将其转化为冠层蒸散发数据(ET_{ec})。

2.2.3 液流速率的计算方法

FLOW32 包裹式植物茎流计的工作原理、安装方法及液流速率计算方法均依据仪器使

用手册《Dynagage Manual》,液流速率 F 依据茎热平衡原理^[24],计算公式如下:

$$F = \frac{P_{in} - Q_r - Q_v}{C_p \times dT} \quad (1)$$

式中, F 为液流速率 (g/s); P_{in} 为热量输入 (W); Q_r 为径向散热 (W); Q_v 为竖向导热 (W); C_p 为水的比热 ($4.186 J/g \times C$); dT 为竖向两热电偶电压和的平均值 ($^{\circ}C$)。其中 Q_r 、 Q_v 、 dT 通过传感器测得并自动计算得出,在数据采集程序中输入胸径全横截面积、胸径大小参数,可直接输出液流速率的结果。

2.2.4 冠层蒸腾的尺度扩展方法

为使茎流计所测单树液流数据能够与涡动相关所测冠层蒸散发进行对比,本试验采用 Soegaard 等^[25]“单位叶面积上的平均液流速率 $SF \times$ 叶面积指数 LAI ”的扩展方法,将单树尺度葡萄液流数据扩展为林分尺度冠层蒸腾,具体扩展方法如下:

$$E_{sf} = LAI \frac{SF}{LA} \quad (2)$$

式中, E_{sf} 为扩展后葡萄冠层蒸腾 (mm/h); SF 为 6 棵样树总的液流速率 (kg/h); LA 为总叶面积 (m^2),通

过统计 6 棵样树的平均叶片叶面积及总叶片数求得,平均叶片叶面积与白云岗等^[26]对无核白葡萄树叶面积的测定结果较为一致;LAI 为叶面积指数。

2.2.5 叶面积指数 LAI 的获取方法

利用高分辨率遥感数据可以较准确估算出如地表温度、叶面积指数 LAI、反照率等地表变量^[27-28]。本研究区地势平坦,地表植被均质,综合使用单点测量工具 LAI-2200 及 Landsat-8 高分辨率遥感数据,得到 7—9 月份叶面积指数 LAI 的变化范围很小(4.43—4.64),这是由于该阶段葡萄树处于成熟期,生长状态稳定,冠层郁闭,叶面积变化不明显。遥感数据获取时间分别为 2013 年 8 月 2 日和 9 月 10 日,空间分辨率为 30 m,采用 ENVI 5.0 软件对原始图像进行几何纠正、辐射校正和大气校正,裁剪出核心研究区,并根据以下步骤得到 LAI:

(1) 采用 Sobrino 等^[29]的方法来计算归一化植被指数(NDVI),计算公式如下:

$$NDVI = \frac{\rho_n - \rho_v}{\rho_n + \rho_v} \quad (3)$$

式中, ρ_n 为近红外波段反射率, ρ_v 为红光波段反射率。

(2) 采用孙鹏森等^[30]的方法来计算基于 NDVI 的叶面积指数 LAI,计算公式如下:

$$LAI = 6.211 \times NDVI - 1.088 \quad (4)$$

3 结果与分析

3.1 典型生长季葡萄树的蒸腾耗水规律

树木林分蒸腾是由每棵树的单树蒸腾组成的,分析单树蒸腾耗水对于掌握林分尺度的冠层蒸腾变化规律具有至关重要的意义。因此,选择 4 棵不同胸径样树,分析典型生长季晴天条件下各样树的液流速率昼夜变化规律(图 2),其中 DG2# 葡萄树 7 月份的观测数据缺失。从图 2 可以看出,葡萄树液流速率的昼夜变化曲线均为单峰型,液流启动时间在 9:00—10:00 之间,12:00—13:00 点到达峰值后,持续较长时间高数值波动,到 17:00—18:00 左右开始下降,20:00—21:00 后到达最低水平。随胸径增大液流速率平均日变化曲线呈峰值增大、峰形拓宽趋势,表明胸径大小是影响葡萄液流速率随时间变化的重要因子^[31]。不同月份各样树液流速率昼夜变化曲线区别较明显,这与各样树叶面积、冠幅等生理生长状况变化紧密相关^[32]。典型生长季

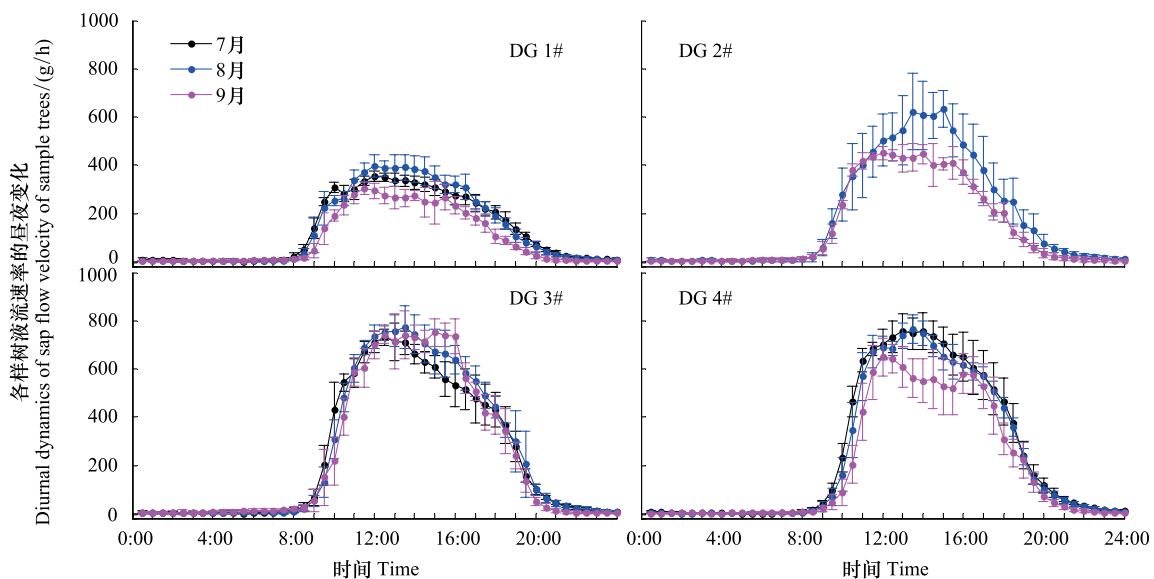


图 2 典型生长季各样树液流速率昼夜变化规律(误差线代表各晴天平均液流速率的标准差)

Fig.2 Diurnal dynamics of mean sap flow velocity of different sample trees in a typical growth season

DG1#样树日均液流速率为(120.1±20.9) g/h, DG2#样树日均液流速率为(166.4±35.6) g/h, DG3#样树日均液流速率为(225.9±33.1) g/h, DG4#样树日均液流速率为(242.0±13.5) g/h, 胸径越大的样树日均液流速率越大。

选用6棵样树的液流数据累计求和,得到典型生长季各样树日耗水量变化序列(图3)。其中DG2#样树7月份数据缺失,观测从8月13日开始。如图3所示,各样树的日耗水量区别明显,变化范围大致在2—15 kg。胸径越大的样树日耗水量越大,与图2所示胸径越大的样树日均液流速率越大的规律是一致的。阴雨天各样树日耗水量均大幅降至2 kg左右,这是由于雨天云层遮蔽太阳辐射减弱,葡萄叶片气孔内外蒸汽压梯度较小,蒸腾耗水量大幅度下降^[33]。

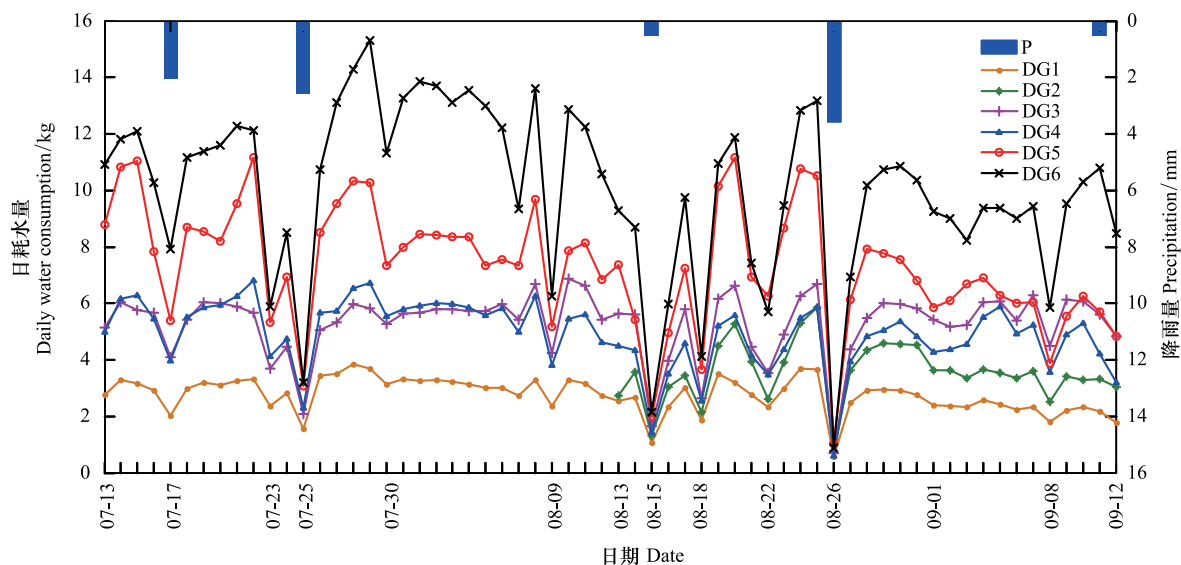


图3 典型生长季各胸径样树的日耗水量及降雨量变化

Fig.3 Dynamics of daily water consumption of different sample trees and precipitation in a typical growth season

3.2 树干液流所测冠层蒸腾与涡动相关所测蒸散发的对比

为对比分析经公式(2)扩展得到的葡萄冠层蒸腾 E_{st} 与涡动相关所测葡萄蒸散发 ET_{ec} 的变化特征,选择典型生长季晴天条件下白天8:00—20:00 半小时间隔的葡萄冠层蒸腾 E_{st} 及蒸散发 ET_{ec} 数据,绘出不同月份晴天条件下葡萄蒸腾及蒸散发日变化曲线(图4)。

从图4中可以看出,典型生长季葡萄冠层蒸腾及蒸散发日变化曲线均为单峰型,且变化规律较为一致,从8:00开始启动,11:00—17:00之间维持较高值波动,到17:00以后降至较低水平。从误差线可以看出,利用树干液流冠层蒸腾曲线波动较小,而涡动相关所测蒸散发曲线波动较大,这与仪器观测手段、工作原理不同有关^[22-23]。日变化曲线中冠层蒸腾的最大值在1.0 mm/h左右,蒸散发的最大值在1.4 mm/h左右。白天8:00—12:00与17:00—20:00期间冠层蒸腾与蒸散发曲线均比较吻合,说明这一时间段内冠层蒸散发绝大部分来源于葡萄蒸腾作用。而12:00—17:00之间,各月份冠层蒸散发均大于蒸腾,是因为午后太阳辐射强烈,空气温度升高,来自土壤的蒸发量增加。不同月份中,7、8月冠层蒸腾与蒸散发的日变化规律较为一致,而9月份受葡萄树叶面积减少影响午间冠层蒸腾量下降,土壤蒸发量增大。

3.3 葡萄冠层蒸腾与蒸散发的连续日变化规律

为研究典型生长季葡萄冠层蒸腾及蒸散发的连续日变化规律,依据半小时间隔的冠层蒸腾 E_{st} 及蒸散发 ET_{ec} 日累计量数据,绘出葡萄冠层蒸腾及蒸散发的连续日变化曲线(图5)。其中由于涡动相关仪工作故障,导致7月28日至8月1日之间部分蒸散发数据缺失。

从图5中可以看出,葡萄冠层蒸腾与蒸散发之间差异显著,且晴天条件下葡萄蒸散发均大于冠层蒸腾,二

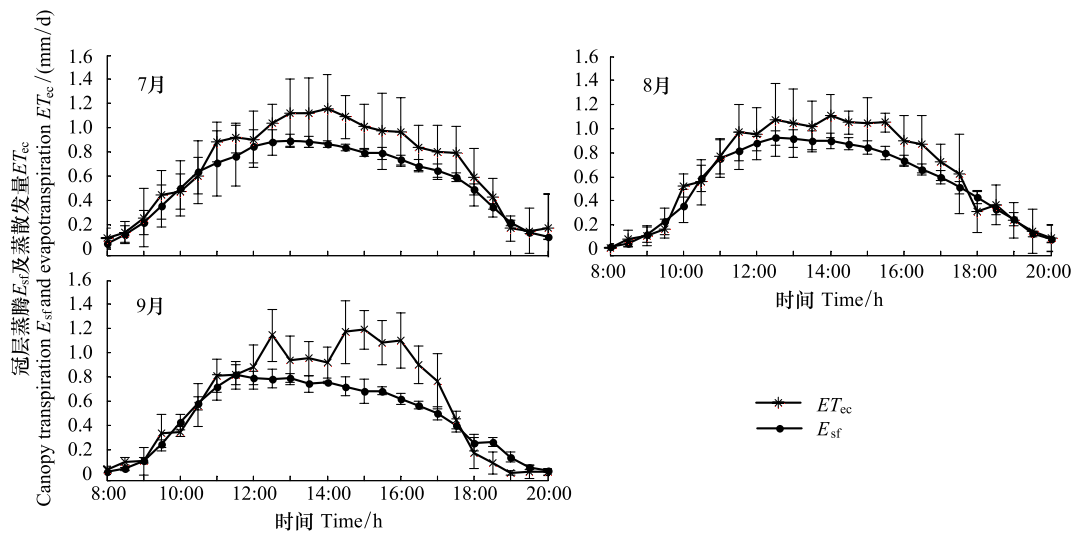


图 4 不同月份晴天条件下冠层蒸腾 E_{sf} 与蒸散发 ET_{ec} 的日变化 (8:00—20:00 之间, 误差线代表各晴天平均冠层蒸腾与平均蒸散发的标准差)

Fig.4 Daytime dynamics of canopy transpiration E_{sf} and evapotranspiration ET_{ec} measured in different months

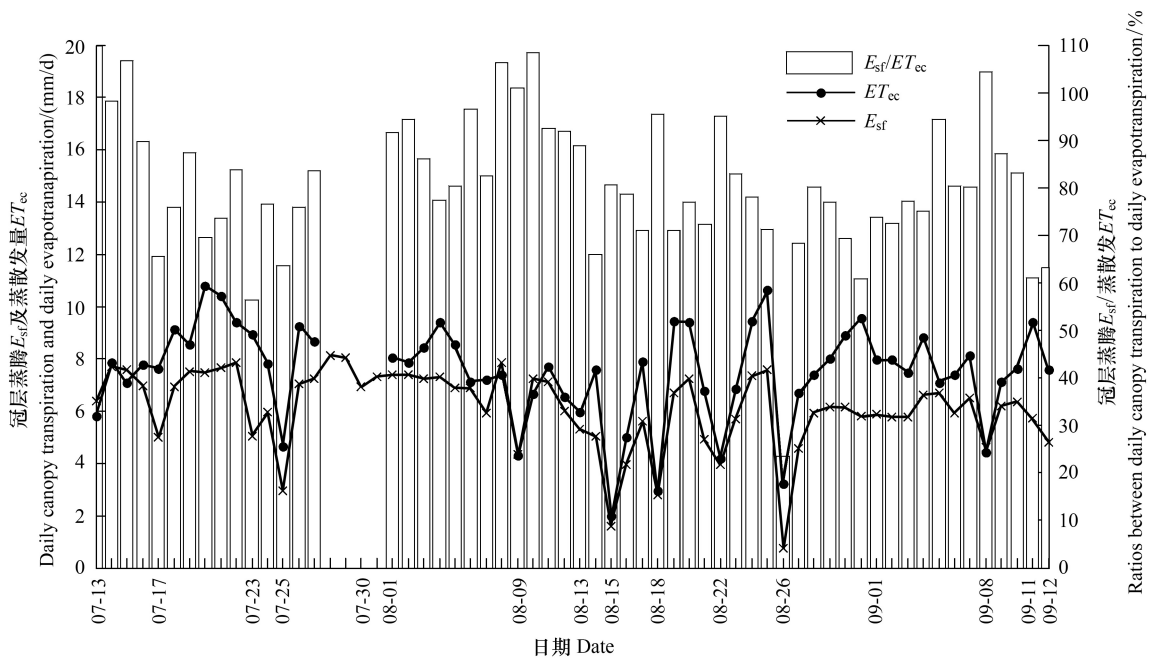


图 5 葡萄冠层蒸腾 E_{sf} 及蒸散发 ET_{ec} 的连续日变化 (07-13—09-12, 柱状图代表日累计冠层蒸腾与日累计蒸散发的比值)

Fig.5 Daily dynamics of daily canopy transpiration E_{sf} and daily evapotranspiration ET_{ec}

者的差额 (即黑线与蓝线之间的部分) 便是土壤蒸发量。阴雨天气条件下, 冠层蒸腾及蒸散发差异较小且大幅降低至 5 mm 以下。冠层蒸腾与蒸散发的比值 (E_{sf}/ET_{ec}) 大多在 60% 以上, 然而受特殊天气影响, 冠层蒸腾与蒸散发的比值波动较大 (图 5), 个别日期中冠层蒸腾与蒸散发的比值出现过低 (如 8 月 26 日, 23.4%) 或过高 (如 9 月 8 日, 108.4%) 的现象, 是由于特殊天气状况下涡动相关观测数据不可靠所致^[22-23]。典型生长季 3 个月中, 葡萄冠层蒸腾量的变化范围在 1.88—8.12 mm/d 之间, 日均冠层蒸腾量为 6.12 mm/d, 蒸散发在 1.74—10.78 mm/d 之间, 日均蒸散发为 7.13 mm/d。因而, 日均土壤蒸发量约为 1.01 mm/d, 只占总蒸散发量的 14.2%, 而日均冠层蒸腾占日均蒸散发的比重达到 85.8%, 该生长阶段冠层蒸散发以作物蒸腾为主。

4 讨论

4.1 葡萄单树尺度蒸腾耗水特征

不同胸径、边材面积、叶面积大小的树木蒸腾耗水量存在显著差异,通过分析单树尺度的蒸腾耗水量,结合以上指标可以估算出林分尺度的蒸腾耗水量^[11,16,18]。本研究典型生长季各样树最大液流量为 1.92 kg/h,比 Tarara 等^[34]采用相同茎流计所测葡萄液流速率最大值(1.50 kg/h)略高,主要是由于敦煌南湖绿洲地处沙漠腹地,气候干燥,光照强烈,且有良好的灌溉条件。此外,灌溉方式、栽培品种、种植间隔和朝向等因素也会导致不同研究葡萄树蒸腾耗水特征的差异^[35]。典型生长季 6 棵样树日均耗水量从 2.76 kg 到 10 kg 不等,与许浩等^[36]所测塔克拉玛干沙漠腹地多枝怪柳日均耗水量相当。

诸多研究发现,树木边材面积与蒸腾、胸径与蒸腾之间为线性或指数相关关系^[10-13]。本研究葡萄胸径与日均耗水量之间同样存在着显著的指数关系,且不同月份的回归关系差异明显(图 6)。其中,7 月份随胸径增大各样树日均耗水量的增幅最为显著($R^2 = 0.95$),从 7 月份到 9 月份,随胸径增大日均耗水量的增幅逐步下降。胸径与蒸腾之间存在指数相关关系,可能是由于与高大乔木相比,多年生葡萄冠层矮小枝叶繁茂,胸径较大的葡萄树叶面积增幅更大所导致。不同月份回归关系的差异性则说明,随着葡萄树自身生长状况及物候期变化,其蒸腾耗水量与胸径或其他指标之间的关系存在季节或月份变化,因而我们使用胸径或其他指标估算林分蒸腾耗水量时,应将这种可能存在的季节及月份变化考虑在内。

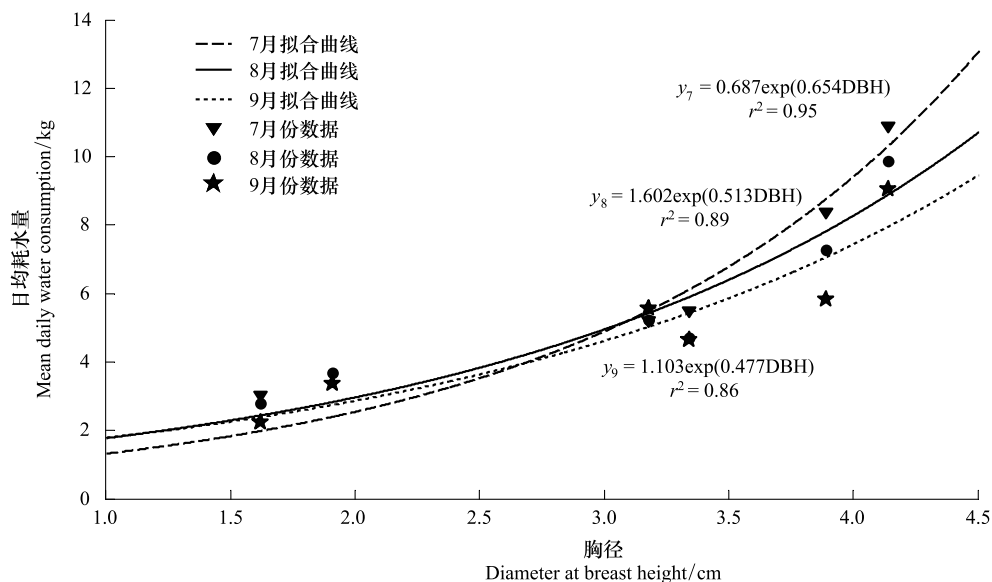


图 6 不同月份各样树胸径大小与日均耗水量的曲线回归

Fig.6 Nonlinear regressions between diameter at breast height (DBH) and mean water consumption of different sample trees in different months

4.2 葡萄冠层尺度蒸腾及蒸散发特征

国内外相关研究采用蒸渗仪^[37]、波文比能量平衡系统^[38-39]、涡动相关技术^[40-41]等技术来分析葡萄地水分利用状况。本研究综合使用树干液流及涡动相关两种技术,在分析典型生长季葡萄冠层蒸腾及蒸散发日变化规律时发现,二者均为单峰型曲线,且所体现的规律较为一致,说明采用“单位叶面积上的平均液流速率 $SF \times$ 叶面积指数 LAI”这种扩展方法来估算葡萄冠层蒸腾量,以及采用涡动相关方法来测定葡萄地蒸散发,这两种方法均较为可靠适用。本研究没有分析夜间葡萄蒸腾及蒸散发变化规律,这是由于:(1)夜间茎部热存储不包括在热平衡项之中,夜间茎部热存储量难以估算,故热平衡法所测夜间液流数据存在一定误差^[42-43];(2)夜间湍流发展不充分,涡动相关方法在测定夜间通量时存在低估现象^[44-45],使用涡动相关技术不能得到准确可

靠的夜间水热通量数据。然而诸多研究表明,在某些植被类型中夜间蒸腾仍然存在,并且占到其日耗水量的 5%—30%^[33, 46]。目前已有经热脉冲技术改进的热率方法等^[47]来测定植物夜间低液流甚至负液流,从而使得精确掌握植物夜间及全天蒸腾变化规律成为可能。然而,利用涡动相关技术还无法全面掌握植物冠层全天蒸散发变化规律。

典型生长季 3 个月中,葡萄冠层日均蒸腾量为 6.12 mm/d,日均蒸散发为 7.13 mm/d,与其他国内外葡萄地蒸散发研究相比较^[48-50],是由于本研究仅分析了典型生长季 3 个月的数据,而非整个生长季,因而均值较大。从图 5 冠层蒸腾及蒸散发的连续日变化曲线中看到,7 月份、8 月份冠层蒸腾与蒸散发的比值(E_{st}/ET_{ec})略大,但到 9 月份葡萄生长末期该比值有所下降(图 5)。赵丽雯等^[51]研究黑河中游绿洲农田作物蒸腾和土壤蒸发时发现,玉米在生长初期至发育阶段,土壤蒸发量大于蒸腾量,从发育阶段开始蒸腾量逐渐占主导,到后期蒸腾量开始逐渐减小而蒸发又逐渐增加。本研究葡萄树处于生长中期及后期,冠层蒸腾及蒸散发体现出同样的变化规律。此外,该生长阶段葡萄冠层蒸腾占蒸散发的平均比重达到 85.8%,这是由于该时期葡萄树枝叶生长旺盛,冠层较为郁闭,根据遥感数据计算得到的林分平均覆盖度 P_v 达到 90% 左右,因而葡萄冠层蒸腾占据了蒸散发的绝大部分。通过计算日均蒸腾量及蒸散发的差值,得到葡萄地日均土壤蒸发量约为 1.01 mm/d,只占总蒸散发量的 14.2%。然而由于本研究未对土壤蒸发进行同步观测,因而缺乏对于土壤蒸发估算量的验证。今后将加强对葡萄完整生长季土壤蒸发、土壤含水量、叶面积变化等方面的监测,进一步增强“单位叶面积上的平均液流速率 $SF \times$ 叶面积指数 LAI”这种扩展方法的正确性和可靠性。

5 结论

本研究综合使用树干液流及涡动相关两种技术,采用基于热平衡原理的包裹式茎流计,精确掌握了 6 棵葡萄树的蒸腾耗水变化规律,使用“单位叶面积上的平均液流速率 $SF \times$ 叶面积指数 LAI”这种扩展方法,实现从单株到林分冠层蒸腾的尺度扩展,从而通过与涡动相关技术所测蒸散发数据对比分析,详细分析了敦煌南湖地区葡萄冠层蒸腾及蒸散发规律,发现典型生长季中葡萄树液流速率日变化为单峰型曲线,日均耗水量从 2.76 kg 到 10 kg 不等。冠层蒸腾及蒸散发日变化曲线亦为单峰型,白天 8:00—12:00 与 17:00—20:00 期间葡萄地蒸散发绝大部分来源于葡萄冠层蒸腾,12:00—17:00 之间,午后太阳辐射强烈土壤蒸发量增加,葡萄蒸散发大于冠层蒸腾。葡萄典型生长季中,日均冠层蒸腾量为 6.12 mm/d,日均蒸散发为 7.13 mm/d,日均冠层蒸腾占日均蒸散发的比重达到 85.8%,因而该阶段冠层蒸散发以作物蒸腾为主。

参考文献 (References):

- [1] Hansen J E, Takahashi T, Dickinson R E. Modeling evapotranspiration for three-dimensional global climate models. *Climate Processes and Climate Sensitivity*, 1984, 29: 58-72.
- [2] Avissar R, Schmidt T. An evaluation of the scale at which ground-surface heat flux patchiness affects the convective boundary layer using large-eddy simulation. *Journal of the Atmospheric Science*, 1998, 55(16): 2666-2689.
- [3] 张志忠, 武强, 魏学勇. 西北干旱区水资源开发与生态环境问题. *地质灾害与环境保护*, 2001, 12(3): 12-28.
- [4] Massman W J, Lee X. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1-4): 121-144.
- [5] 王维真, 徐自为, 刘绍民, 李新, 马明国, 王介民. 黑河流域不同下垫面水热通量特征分析. *地球科学进展*, 2009, 24(7): 714-723.
- [6] 沈艳, 刘允芬, 王堰. 应用涡动相关法计算水热、CO₂ 通量的国内外进展概况. *南京气象学院学报*, 2005, 28(4): 559-566.
- [7] 徐自为, 刘绍民, 宫丽娟, 王介民, 李小文. 涡动相关仪观测数据的处理与质量评价研究. *地球科学进展*, 2008, 23(4): 357-370.
- [8] Granier A, Bobay V, Gash J H C, Gelpe J, Saugier B, Shuttleworth W J. Vapour flux density and transpiration rate comparisons in a stand of maritime pine (*Pinus pinaster* An.) in Les Landed forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1990, 51(3-4): 309-319.
- [9] 岳广阳, 张铜会, 刘新平, 移小勇. 热技术方法测算树木茎流的发展及应用. *林业科学*, 2006, 42(8): 102-108.
- [10] Vertessy R A, Benyon R G, O'Sullivan S K, Gribben P R. Relationships between stem diameter, sapwood area, leaf area and transpiration in a young mountain ash forest. *Tree Physiology*, 1995, 15(9): 559-567.
- [11] 赵平, 饶兴权, 马玲, 蔡锡安, 曾小平. 基于树干液流测定值进行尺度扩展的马占相思林段蒸腾和冠层气孔导度. *植物生态学报*, 2006,

- 30(4): 655-665.
- [12] Cermak J, Nadezhkina N. Sapwood as the scaling parameter-defining according to xylem water content or radial pattern of sap flow? *Annals of Forest Science*, 1998, 55(5): 509-521.
- [13] Wullschlegel S D, King A W. Radial variation in sap velocity as a function of stem diameter and sapwood thickness in yellow-poplar trees. *Tree Physiology*, 2000, 20: 511-518.
- [14] Hatton T J, Moore S J, Reece P H. Estimating stand transpiration in a *Eucalyptus populnea* woodland with the heat pulse method. *Tree Physiology*, 1995, 15(4): 219-227.
- [15] Teskey R O, Sheriff D W. Water use by *Pinus radiata* trees in a plantation. *Tree Physiology*, 1996, 16(1-2): 273-279.
- [16] 孙慧珍, 周晓峰, 康绍忠. 应用热技术研究树干液流进展. *应用生态学报*, 2004, 15(6): 1074-1078.
- [17] Chabot R, Bouarfa S, Zimmer D, Chaumont C, Moreau S. Evaluation of the sap flow determined with a heat balance method to measure the transpiration of a sugarcane canopy. *Agricultural Water Management*, 2005, 75(1): 10-24.
- [18] 李炜, 司建华, 苗政. 林分耗水的尺度扩展研究进展. *生态学杂志*, 2012, 31(3): 714-723.
- [19] 蔡正旺, 苏雪, 牟迈, 杜玉娟, 吴海燕, 龚大杰, 孙坤. 甘肃敦煌南湖自然保护区生物多样性及保护对策. *西北师范大学学报: 自然科学版*, 2007, 43(6): 71-75.
- [20] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1980, 106(447): 85-100.
- [21] Wilczak J M, Oncley S P, Stage S A. Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 99(1): 127-150.
- [22] 王介民, 王维真, 奥银焕, 孙方林, 王树果. 复杂条件下湍流通量的观测与分析. *地球科学进展*, 2007, 22(8): 791-797.
- [23] Schmid H P. Source areas for scalars and scalar fluxes. *Boundary-Layer Meteorology*, 1994, 67(3): 293-318.
- [24] Steinberg S, Van Bavel C H M, McFarland M J. A gauge to measure mass flow rate of sap in stems and trunks of woody plants. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1989, 114(3): 466-472.
- [25] Soegaard H, Boegh E. Estimation of evapotranspiration from a millet crop in the Sahel combining sap flow, leaf area index and eddy correlation technique. *Journal of Hydrology*, 1995, 166(3-4): 265-282.
- [26] 白云岗, 董新光, 张江辉, 蔡军社, 丁平. 无核白葡萄叶面积及一年生枝条干物质质量简易测定方法研究. *新疆农业科学*, 2010, 47(9): 1744-1748.
- [27] Myneni, R B, Hoffman S, Knyazikhin Y, Privette J L, Glassy J, Tian Y, Wang Y, Song X, Zhang Y, Smith G R, Lotsch A, Friedl M, Morisette J T, Votava P, Nemani R R, Running S W. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83: 214-231.
- [28] 郭晓寅, 程国栋. 遥感技术应用于地表面蒸散发的研究进展. *地球科学进展*, 2004, 19(1): 107-114.
- [29] Sobrino J A, Jiménez-Muñoz J C, Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDAT TM5. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90(4): 434-440.
- [30] 孙鹏森, 刘世荣, 刘京涛, 李崇巍, 林勇, 江洪. 利用不同分辨率卫星影像的 NDVI 数据估算叶面积指数(LAI)-以岷江上游为例. *生态学报*, 2006, 26(11): 3826-3834.
- [31] 司建华, 冯起, 张小由, 常宗强, 席海洋. 热脉冲技术测定树干液流研究进展. *冰川冻土*, 2007, 29(3): 475-481.
- [32] 赵平, 饶兴权, 马玲, 蔡锡安, 曾小平. 马占相思(*Acacia mangium*) 树干液流密度和整树蒸腾的个体差异. *生态学报*, 2006, 26(12): 4050-4058.
- [33] Boegh E. Transpiration from millet estimated by combining LAI, stomata resistance and sap flow technique // *Proceedings of the International Symposium on Precipitation and Evaporation*. Bratislava: Slovak Hydrometeorological Institute, 1993: 139-145.
- [34] Tarara J M, Ferguson J C. Device for simulating high rates of sap flow in grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture*, 2001, 52(3): 260-265.
- [35] Evans R G, Spayd S E, Wample R L, Kroeger M W, Mahan M O. Water use of *Vitis vinifera* grapes in Washington. *Agricultural Water Management*, 1993, 23(2): 109-124.
- [36] 许浩, 张希明, 闫海龙, 姚世军. 塔克拉玛干沙漠腹地多枝桉柳茎干液流及耗水量. *应用生态学报*, 2007, 18(4): 735741.
- [37] Williams L E, Phene C J, Grimes D W, Trout T J. Water use of mature Thompson seedless grapevines in California. *Irrigation Science*, 2003, 22(1): 11-18.
- [38] Heilman J L, McInnes K J, Savage M J, Gesch R W, Lascano R J. Soil and canopy energy balances in a west Texas vineyard. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1994, 71(1-2): 99-114.
- [39] Zhang B Z, Kang S Z, Zhang L, Du T S, Li S E, Yang X Y. Estimation of seasonal crop water consumption in a vineyard using Bowen ratio-energy balance method. *Hydrological Processes*, 2007, 21(26): 3635-3641.

- [40] Li S, Kang S Z, Zhang L, Li F S, Zhu Z L, Zhang B Z. A comparison of three methods for determining vineyard evapotranspiration in the arid desert regions of northwest China. *Hydrological Processes*, 2008, 22(23): 4554-4564.
- [41] Li S, Tong L, Li F S, Zhang L, Zhang B Z, Kang S Z. Variability in energy partitioning and resistance parameters for a vineyard in northwest China. *Agricultural Water Manage*, 2009, 96(6): 955-962.
- [42] Weibel F P, Boersma K. An improved stem heat balance method using analog heat control. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995, 75(1-3): 191-208.
- [43] Baldocchi D D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology*, 2003, 9(4): 479-492.
- [44] Turnipseed A A, Anderson D E, Blanken P D, Baugh W M, Monson R K. Airflows and turbulent flux measurements in mountainous terrain: Part 1. Canopy and local effects. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, 119(1-2): 1-21.
- [45] Donovan L A, Grise D J, West J B, Pappert R A, Alder N N, Richards J H. Predawn disequilibrium between plant and soil water potentials in two cold-desert shrubs. *Oecologia*, 1999, 120(2): 209-217.
- [46] Snyder K A, Richards J H, Donovan L A. Night-time conductance in C₃ and C₄ species: do plants lose water at night? *Journal of Experimental Botany*, 2003, 54(383): 861-865.
- [47] Burgess S S O, Adams M A, Turner N C, Beverly C R, Ong C K, Khan A A H, Bleby T M. An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants. *Tree Physiology*, 2001, 21: 589-598.
- [48] Rana G, Katerji N, Introna M, Hammami A. Microclimate and plant water relationship of the Overhead table grape vineyard managed with three different covering techniques. *Scientia Horticulturae*, 2004, 102(1): 105-120.
- [49] Netzer Y, Yao C R, Shenker M, Bravdo B A, Schwartz A. Water use and the development of seasonal crop coefficients for superior seedless grapevines trained to an open-gable trellis system. *Irrigation Science*, 2009, 27(2): 109-120.
- [50] Zhang Y Q, Kang S Z, Ward E J, Ding R S, Zhang X, Zheng R. Evapotranspiration components determined by sap flow and microlysimetry techniques of a vineyard in northwest China: Dynamics and influential factors. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(8): 1207-1214.
- [51] 赵丽雯, 吉喜斌. 基于 FAO-56 双作物系数法估算农田作物蒸腾和土壤蒸发研究——以西北干旱区黑河流域中游绿洲农田为例. *中国农业科学*, 2010, 43(19): 4016-4026.