

人工绿地与自然沙地蒸散的计算与变异研究^{*}

霍文^{1,2} 胡顺起³ 智协飞¹ 杨帆² 杨兴华^{1,2} 周成龙²

买买提艾力·买买提依明² 潘红林²

HUO Wen^{1,2} HU Shunqi³ ZHI Xiefei¹ YANG Fan² YANG Xinghua^{1,2}

ZHOU Chenglong² MamtiAli·MamtiYiming² PAN Honglin²

1. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气象灾害教育部重点试验室, 南京, 210044
2. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所/中国气象局塔克拉玛干沙漠气象野外科学试验基地, 乌鲁木齐, 830002
3. 临沂市气象局, 临沂, 276004

1. *Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD)/Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China*

2. *Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration/Taklimakan Desert Atmosphere and Environment Observation Experiment Station, Urumqi 830002, China*

3. *Linyi Meteorological Bureau, Linyi 276004, China*

2018-08-14 收稿, 2019-01-28 改回.

霍文, 胡顺起, 智协飞, 杨帆, 杨兴华, 周成龙, 买买提艾力·买买提依明, 潘红林. 2019. 人工绿地与自然沙地蒸散的计算与变异研究. 气象学报, 77(5):949-959

Huo Wen, Hu Shunqi, Zhi Xiefei, Yang Fan, Yang Xinghua, Zhou Chenglong, MamtiAli·MamtiYiming, Pan Honglin. 2019. A variation study on calculation of evapotranspiration over constructed green land and natural sandy land. *Acta Meteorologica Sinica*, 77(5):949-959

Abstract Evapotranspiration is not only a key variable of the water cycle, but also an important component of the energy balance. Consequently, the evapotranspiration estimation between natural sandy land (NSL) and constructed greenland (CGL) in the desert region has pivotal impacts on desert meteorology and energy transmission. Moreover, the associated research results have enormous applicable values like preventing desertification and reasonable utilization of ground water resource in the desert region. The evapotranspiration algorithm of the GB/T 20481-2006 dry grade is applied to accurately calculate hourly evapotranspiration values over NSL and CGL based on the intense observations collected at the Taklimakan Desert Meteorology Field Experiment Station of CMA during the period of 2014–2015. In addition, different parameters are used in the algorithm, which significantly enhances the utilization rate of the observations and the precision of the calculation. Furthermore, the increment and decrement of the calculated evapotranspiration are quantified based on the assignment research of the influencing factors. The main results are as follows. (1) The calculated values of the evapotranspiration over NSL and CGL can well reflect the annual variation of evapotranspiration. As for the changing trend, the values over CGL are better than that over NSL, which is related to the adaptability of the calculation method. (2) During the growing season, the difference between the calculated and observed evapotranspiration over CGL is larger than that over NSL. However, the opposite is true during the cold season. (3) The difference in the saturation vapor pressure and actual vapor pressure, 2 m mean air temperature, 2 m mean wind speed and the slope of the saturation vapor pressure are the main influencing factors for the evapotranspiration calculation, in which the

^{*} 资助课题: 国家自然科学基金项目(41575008, 41775030, 41305107)、新疆高层次人才引进项目(2018)。

作者简介: 霍文, 主要从事沙漠气象研究。E-mail: huowenpet@idm.cn

通信作者: 智协飞, 主要从事数值天气预报、季风动力学、短期气候预测、气候变化等方向的研究。E-mail: zhi@nuist.edu.cn

difference between the saturation vapor pressure and actual vapor pressure as well as 2 m mean wind speed increase with the assignment, and the hourly percentage evapotranspiration difference (PED) and its annual cumulative value difference (ACD) display a linear increasing trend. Meanwhile, the 2 m mean air temperature also increases with the assignment, and the factors of PED and ACD remain stable. Likewise, as the assignment increases, the slope of saturation vapor pressure and the two variables (PED and ACD) show an upward tendency and a slight decrease, respectively. Therefore, the evapotranspiration algorithm of the GB/T 20481-2006 classification of meteorological drought has better applicability in the Taklimakan Desert, and the calculation accuracy over constructed green land is higher than that over natural sandy land.

Key words Taklimakan Desert, Constructed green land, Natural sandy land, Evapotranspiration

摘要 利用中国气象局塔克拉玛干沙漠气象野外科学试验基地 2014—2015 年自然沙地与人工绿地加密观测试验时次数据,采用 GB/T 20481-2006 气象干旱等级的蒸散算法,详细计算自然沙地、人工绿地以时次为单位的蒸散值。计算过程中采用多种参数算法,增加了观测数据的利用率,提高了计算精度,并尝试通过影响因子的变量赋值研究,量化蒸散的计算增减。结果表明:(1)自然沙地与人工绿地蒸散计算值都较好地刻画出了蒸散的年内变化,自然沙地计算值量级更贴近实际观测值,这与蒸散计算方法适用性有关。(2)人工绿地蒸散计算值在植被生长季与观测值的差值较大,自然沙地与观测值的差值较小;冷季人工绿地蒸散计算值与观测值接近,自然沙地计算值与观测值的差相对较大。(3)饱和水汽压与实际水汽压之差、2 m 平均气温、2 m 平均风速、饱和水汽压的斜率是计算蒸散的主要影响因子,其中饱和水汽压与实际水汽压之差和 2 m 平均风速随着赋值递增,蒸散差值时次百分比与年累计差值呈线性增长。2 m 平均气温随着赋值递增,蒸散差值时次百分比与年累计差值表现比较稳定,饱和水汽压的斜率随着赋值递增,蒸散差值时次百分比与年累计差值略有递减。因此,GB/T 20481-2006 气象干旱等级的蒸散算法在塔克拉玛干沙漠的适用性较好,人工绿地比自然沙地计算精度更高。

关键词 塔克拉玛干沙漠,人工绿地,自然沙地,蒸散

中图法分类号 P412.13

1 引言

在干旱地区特别是沙漠区域,水是主要的限制因素。自然灌木或人工绿地改变了干旱区沙漠区域所在地下垫面的物理属性,同时影响局地的水分循环。通过改变物理和土壤条件、植被可能对生态系统产生重要影响。蒸散是地表热量与水分平衡的重要组成部分,是水循环中最直接受土地利用和气候变化影响的物理量,蒸散的研究有利于深入了解气候变化与水循环变化规律(申双和等,2008)。因此,利用塔克拉玛干沙漠多种观测资料精细化计算自然沙地与人工绿地的蒸散,具有十分重要的科学意义。

塔克拉玛干沙漠降水极为稀少,沙漠腹地 2000—2014 年平均年降水量为 26.0 mm,处于稳定状态,夏季是多雨季节(周成龙等,2017;Yang, et al,2012)。沙漠地区蒸散能力强但降水量少,影响实际蒸发量。因此,各国学者利用不同资料在世界各地对沙漠区域蒸散及其相关问题进行了研究。Menenti(1984)在利比亚沙漠,结合卫星观测资料和地面参考点的数据计算不同的表面能量平衡和实际蒸发。Zhang 等(1995)指出,在中国西北沙漠区域,

穿越沙漠的河流都表现出强烈的蒸发作用甚至蒸发解体。Houston(2006)诠释了阿塔卡马沙漠蒸发可能发生在四个典型区域:河流、河岸、大盐湖及罕见降水后裸露的土壤。最大潜在蒸发被认为可能是最高温度、海拔高度以及蒸发液体密度的函数。Kidron(2009)在内盖夫沙漠计算了夏季(生长季)灌木的蒸发率,精细化地比较了植被暴露区域、植被四周及林冠下的蒸发增长率。马宁等(2016)指出,在中国内蒙古巴丹吉林沙漠,内部小型湖的蒸发由于“盐度效应”导致湖水蒸发率低于淡水湖。Kimura 等(2016)采用涡动相关法估算了蒙古国草原、沙漠的感热、潜热通量,从而计算出总蒸发量,并提出总蒸发量等于降水总量与土壤水分减少量之和。近年来,中国很多学者也十分注重干旱区或沙漠区有关蒸发的研究(张志山等,2005,2007;张明江等,2015;孙朋,2017)。对塔克拉玛干沙漠,张建国等(2011)通过估算咸水滴灌下整个防护林年土壤蒸发总量为 $2.63 \times 10^6 \text{ m}^3$,占总灌水量的 21.43%,生长季蒸发量占全年蒸发量的 92.28%。胡顺军等(2008)研究表明,由 Van Genuchten 提出的水分特征曲线公式,计算描述塔克拉玛干沙漠地区土壤水分特征效

果较好,潜水极限蒸发强度随潜水埋深的增大而呈幂函数关系递减。

由人类活动对地-气能量平衡的影响而引起干旱区地表的变化,肯定会对区域性小气候产生影响,且已经被众多数学模型模拟再现,并被大量野外试验所证实(李祥余等,2005)。从2005年开始,在塔克拉玛干沙漠腹地石油指挥部生活区与沙漠公路两侧筑起了灌木林生态防护带,利用地下水及滴灌技术支撑人工绿地,从而固定流动沙丘,改善沙漠生产、生活的人居环境,随着沙漠小区域下垫面性质的改变,导致了多种气象要素及土壤微环境等特征参数随之发生变化,使得沙漠小区域内近地层能量平衡打破了原有格局。在区域小气候因子重新分配、排列组合的影响下,形成了与沙漠极端气候反差很大的沙漠人工绿地局地小气候。其中,降水、蒸发、地表及地中水都是沙漠水循环收支的重要环节,也是沙漠区域小气候变化的典型影响要素。因此,文中基于上述研究背景,利用中国气象局塔克拉玛干沙漠气象野外科学试验基地观测资料及小气候加密观测数据计算人工绿地和自然沙地的蒸散,利用精细化的观测资料从时间尺度上解析沙漠不同小气候背景下的蒸散异同,期待为沙漠气象的研究工作尽一份力。

2 研究区域与试验设计简介

塔克拉玛干沙漠是中国第一大沙漠,天山在其北面,昆仑山在其南面,帕米尔高原在其西面,东面直到罗布泊,独特的地理位置形成了极度干旱的气候特征,气温日较差可超过 40°C ,年平均降水不超过 100 mm ,是中国风沙灾害的主要沙源地之一。研究区域塔克拉玛干沙漠腹地,是中国著名的沙漠石油基地。

2014—2015年,在塔克拉玛干沙漠腹地开展小气候加密观测试验,在人工绿地架设自动气象站3部,仪器型号:Weather Hawk Signature,通过自然沙地剖面观测系统(梯度观测系统、辐射观测系统、土壤观测系统)及人工绿地自动气象站同步观测获取不同时间尺度(包括日间、夜间、月、年)的实测数据。

塔克拉玛干沙漠塔中大气环境观测试验站西站($38^{\circ}58'46''\text{N}$, $83^{\circ}38'25''\text{E}$, 1103 m),地势平坦,地表

以流沙为主,无植被覆盖,典型的塔克拉玛干沙漠自然沙地,以下简称自然沙地(西)。观测项目有:(1)梯度观测系统:0.5、1、4 m高度观测气温、相对湿度、实际水汽压、风速,另1 m高度加测大气压;2、10 m高度观测气温、相对湿度、风速、实际水汽压、风向。(2)土壤观测系统:0、10、20、40 cm土壤温度、湿度,0、10、20 cm土壤热通量。(3)辐射系统:总辐射、反射辐射、大气逆辐射、向下长波辐射。(4)降水量观测。采集时间间隔 30 min 。

人工绿地试验区布设3个站点横穿石油基地绿化带,直线距离 1 km ,海拔高差约 25 m 。绿化带西边界站($38^{\circ}58'26''\text{N}$, $83^{\circ}39'19''\text{E}$, 1125 m)地表分布稀疏的柽柳、骆驼刺等灌丛植物,以下简称人工绿地(西);在绿化带中心为人工绿地植物园站($38^{\circ}58'14''\text{N}$, $83^{\circ}39'36''\text{E}$, 1100 m)种有柽柳、沙拐枣和梭梭等沙生植物,地势较为平坦,距自然沙地(西) 1.5 km ,以下简称人工绿地(中);绿化带东边界站($38^{\circ}57'54''\text{N}$, $83^{\circ}40'2''\text{E}$, 1128 m)分布有少量柽柳、骆驼刺、梭梭等植被,以下简称人工绿地(东)。观测项目有:气温、相对湿度、2 m风速、太阳辐射、最低、最高温度及出现时间、最大风速及出现时间、降水,采集时间间隔 60 min 。试验前期,针对人工绿地自动气象站采取 48 h 的平行对比观测,采样间隔为 1 min ,数据用于质量控制,同时记录采集器工作状态、电压参数等,用于数据连续性与合法性检查。再通过气候极值检验法,对不合理数据进行剔除,特别是野值点。

3 数据与计算方法

采用的数据:(1)气候数据为中国塔中国家级气象站2014—2015年气象月报表;(2)人工绿地计算数据基于2014—2015年逐时加密观测试验(由于电池故障和仪器原因,植物园站2014年1月1日—4月4日缺测);(3)自然沙地计算数据基于自然沙地剖面观测系统。计算采取观测要素最大化的原则,由于沙地观测要素多于绿地,自然沙地与人工绿地的蒸散计算推演环节有所不同,因此,沙地计算公式文中简称为 $D(\text{Num})$,绿地计算公式简记为 $P(\text{Num})$, $(\text{Num}$ 代表数字)。由于对比或者误差等原因,标注 $(*)$ 的公式在本研究的计算过程中并未

采用,在此列出仅供其他研究者参考。因2014年数据缺测时段较长,以2015年分析为主(所有时间均为北京时)。

基础算法:潜在蒸散根据FAO56-PM公式计算得到(Allen, et al, 1998)

$$E = \frac{0.408\Delta_e(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta_e + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad \text{D(1) 和 P(1)}$$

式中, E 为潜在蒸散量(单位:mm/d), R_n 为植物表层净辐射(单位: MJ/(m·d)), G 为土壤热通量(单位: MJ/(m²·d)), γ 为干湿表常数(单位: kPa/°C), Δ_e 为饱和水汽压曲线斜率(单位: kPa/°C), U_2 为2 m风速(单位: m/s); e_s 为饱和水汽压(单位: kPa), e_a 为实际水汽压(单位: kPa), T 为日平均温度(单位: °C)(中国国家标准化管理委员会, 2006)。

基于观测数据,自然沙地蒸散参数计算方法为

$$R_n = S\downarrow + L\downarrow - S\uparrow - L\uparrow \quad \text{D(2)}$$

式中, R_n 为净辐射,为逐时计算值, $S\uparrow$ 为向上短波辐射(反射辐射), $S\downarrow$ 为向下短波辐射(总辐射), $L\uparrow$ 为向上长波辐射(大气逆辐射), $L\downarrow$ 为向下长波辐射(中国国家标准化管理委员会, 2006)。

土壤热通量 G 的计算基于观测数据采用了阳坤等(2008)的新算法(TDEC),在此仅计算表层土壤热通量。

$$G = G(z_{\text{ref}}) + \frac{\rho_s c_s}{\Delta t} \sum_{z_{\text{ref}}}^z [T(z_i, t + \Delta t) - T(z_i, t)] \Delta z \quad \text{D(3)}$$

式中, $G(z_{\text{ref}})$ 为任一参考位置 z_{ref} 的热通量, ρ_s 是土壤密度, c_s 是土壤热容量(单位: J/(kg·K)), $\sum_{z_{\text{ref}}}^z [T(z_i, t + \Delta t) - T(z_i, t)] \Delta z$ 代表了两条温度廓线所围成的面积。

$$\gamma = 0.665 \times 10^{-3} p \quad \text{D(4)}$$

式中, γ 为干湿表常数,在此取 $\gamma = 0.05872$ kPa/°C, p 为大气压(单位: hPa),无观测值时可以按当地海拔高度(z)采取以下方法计算

$$p = 101.3 \times \left(\frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \quad (*)$$

U_2 、 T 取日平均值, e_a 取逐时观测值,饱和水汽压 e_s 可由相对湿度(RH取逐时观测值)和实际水汽压关

系计算

$$\text{RH} = \frac{e_a}{e_s} \times 100\% \quad \text{D(5)}$$

关于饱和水汽压曲线斜率的计算存在差异,算法1为

$$\Delta_e = \frac{4098 \left[0.6108 \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right) \right]}{(T + 237.3)^2} \quad \text{D(6)}$$

原式的 T 为日平均温度,文中计算每个时次的蒸散,因此, T 为取逐时平均温度。算法2(霍文等, 2011)为

$$\Delta_e = 6.112 \exp\left(\frac{17.67T}{T + 243.5}\right) \times \frac{17.67(T + 243.5) - 17.67T}{(T + 243.5)^2} \quad (*)$$

算法1与算法2是在计算蒸散时大部分学者所沿用的计算方法,文中通过两种算法分别计算了饱和水汽压曲线的斜率,发现算法1的计算值比较稳定,算法2的计算值起伏较大,文中通过两种算法的 Δ_e 值分别计算了蒸散,并与塔中气象站蒸发皿的观测值做对比,确定算法1更接近真实值,因此,本研究采用算法1计算 Δ_e 。

由于加密自动气象站的观测要素与自然沙地剖面观测系统相比,缺乏辐射观测系统和土壤观测系统(不同层次的土壤温、湿度及土壤热流板的观测),利用现有观测数据,人工绿地的蒸散参数计算方法为(刘钰等, 2001; Allen, et al, 1994; Hargreaves, 1974; 向友珍等, 2016; 曹雯等, 2008)

$$T = \frac{T_{\text{max}} + T_{\text{min}}}{2} \quad \text{P(2)}$$

$$e_a = e(T_{\text{min}}) = 0.6108 \exp\left[\frac{17.27T_{\text{min}}}{T_{\text{min}} + 237.3}\right] \quad \text{P(3)}$$

$$e_s = e(T) = 0.6108 \exp\left[\frac{17.27T}{T + 237.3}\right] \quad \text{P(4)}$$

由于平均饱和水汽压的计算必须对应计算时段的日最高、最低气温,饱和水汽压是气温的函数,若用平均气温替代日最高气温、最低气温计算估计饱和水汽压(e_s),会造成计算值偏低,导致蒸散的计算结果偏低。

$$e_s = \frac{e(T_{\text{max}}) + e(T_{\text{min}})}{2} \quad \text{P(5)}$$

U_2 为2 m处逐时实测风速。由于 γ 只是大气压强的参数,故人工绿地的 γ 取值与自然沙地相同,

为0.05872 kPa/°C(见式 D(4))。

人工绿地净辐射的计算:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad P(6)$$

式中, R_{ns} 为净短波辐射, R_{nl} 为净长波辐射。

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s \quad P(7)$$

式中, R_s 是太阳辐射观测值, $\alpha = 0.23$ (反照率)。

长波辐射与地表绝对温度的4次幂成正比关系,可由斯蒂芬-玻尔兹曼定律定量表示(中国国家标准化管理委员会,2006)。考虑到湿度和云量的影响,在估算长波辐射净支出通量时,用这两个因子修正,并假设其他吸收体的浓度为常数

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{\max,k}^4 + T_{\min,k}^4}{2} \right] (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \cdot (1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35) \quad P(8)$$

式中, σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数,为 4.903×10^{-9} MJ/(K⁴ · m² · d); $T_{\max,k}^4$ 、 $T_{\min,k}^4$ 为计算时间段内的最高、最低气温(单位为 K)。 $\frac{R_s}{R_{so}}$ 为相对短波辐射, R_s 为太阳辐射, R_{so} 为晴空辐射, $(0.34 - 0.14\sqrt{e_a})$ 为空气湿度修正项。 $(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35)$ 为云的影响,若云量增加, R_s 将减小,计算值同时减小。修正项值越小,长波辐射净通量越小。

晴空辐射

$$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} Z) R_a \quad P(9)$$

式中, Z 为站点海拔高度(单位: m), R_a 为日地外辐射

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s] \quad P(10)$$

式中, $G_{sc} = 0.0820$ 为太阳常数, d_r 为日地距离, ω_s 为日出时角, φ 为纬度, δ 为太阳偏磁角。

$$d_r = 1 + 0.33 \cos(\frac{2\pi}{365} J) \quad P(11)$$

$$\delta = 0.408 \sin(\frac{2\pi}{365} J - 1.39) \quad P(12)$$

式中, J 为日序,取值 1—365。

土壤热通量(G)的计算

$$G = c_s \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta t} \Delta z \quad P(13)$$

式中, c_s 为土壤热容量, Δt 为计算的时间步长, Δz

为有效土壤深度,因为土壤温度比空气温度滞后,所以估算时段内的土壤热通量时,采用这个时段的平均温度, Δz 为 0.1—0.2 m。 $c_s = 1.599$ (刘永强等,2011), G 为逐时计算值。

4 结果分析

4.1 计算值与观测值比对

塔中大气观测试验站建设初衷是在中国第一大流动性沙漠获取宝贵的沙漠边界层气象与通量数据,随着石油基地的建成,在研究区的自然沙陇剖面上形成了面积达 3.6 km² 的人工绿地。由于下垫面性质的改变,引起气象特征参数连锁反应,导致近地层能量分配格局改变,局地性气候与沙漠气候形成了强烈反差,亟待解析气候差异下,各项气象参数的变化区间;同步开展强化观测试验,利用理论研究、试验数据分析等方法,定量地解析不同下垫面局地气候的差异,为沙漠-绿洲地-气相互作用及影响机制提供科学试验数据支撑和研究基础。自然沙地、人工绿地蒸散计算值与蒸发皿观测值比对(图 1、2)可见,变化趋势契合度很高,但存在差异。自然沙地蒸散计算值量级与实际观测值接近,在冷季(1—4月和 10—12月)蒸散的计算值略被高估,拟合优度为 0.942,表明 FAO56-PM 在干旱区裸露的自然沙地估算潜在蒸散是适用的,如果考虑系统误差、观测误差等因素的制约,FAO56-PM 能演化出自然沙地潜在蒸散随时间的变化,估算量级一致,如 2015 年观测月均值为 268.26 mm,自然沙地计算值为 283.14 mm。人工绿地 3 个观测点蒸散计算值接近,这与下垫面和植被状况的一致性有关,其中人工绿地(中)蒸散月均值为 112.92 mm,人工绿地(东)蒸散月均值为 113.49 mm,人工绿地(西)蒸散月均值为 113.04 mm,但因为海拔高差及位置原因计算值略有差异,单独对比 3 站差异不大,说明在小尺度下垫面状况相同的情况下,温、湿度条件、风速变化的分布是基本保持一致的,这也客观反映了区域小气候,除气象因子之外,在计算过程中,植被反照率的取值与人工绿地的定期滴灌、植被的修剪、除草都是计算值的影响因素,虽然无法量化表示,但不能忽略。自然沙地的年内变化趋势与观测值基本一致,2015 年 5 月观测值有一个明显的下降趋势,人工绿

地 3 站的计算值也体现出这一特征。由此可见, FAO56-PM 在干旱区的大环境为自然沙地, 下垫面条件为人工绿地的估算潜在蒸散适用性较高, 人工绿地(中)、人工绿地(东)、人工绿地(西)与蒸发皿观测的线性拟合优度依次为 0.933、0.943、0.942。重要的是, 人工绿地的蒸散计算值年累计量明显低于实际观测值, 造成这种差异的主要原因是 4—9 月蒸散计算值要明显低于观测值, 而 4—9 月为植被的生长、茂盛到凋谢时段, 可见植被对蒸散的影响是显著的。冷季, 3 个人工绿地的蒸散计算值与观测值差异小, 自然沙地与前者相较差异略大, 因为在冷季, 人工绿地属于枯叶期, 地表状况最接近自然沙地, 裸露的枝干和根系对蒸散的影响要明显小于生长季植被茂盛期, 因此, 不同下垫面, 计算值与观测值差值整体较小(表 1)。

基于潜热通量观测数据计算 2015 年自然沙地

实际蒸发量 (Moncrieff, et al, 1997), 计算前须对潜热通量数据进行质量控制, 具体步骤如下: (1) 剔除野值点和降水期的数据; (2) 进行坐标旋转、数据趋势去除、密度变化校正 (WPL 校正)、频率相应校正; (3) 对半小时原始数据进行稳态测试和大气湍流统计特性分析。此外, 对缺测数据进行插补, 其原则如下: 对不大于 2 h 的缺测数据进行有效线性差值; 大于 2 h 的缺测值, 采用平均昼夜变化法, 用邻近前后各 5 d 相同时段的观测平均值填补。由于太阳能供电系统故障, 导致 2015 年 6 月 14—30 日数据缺测。

由于沙漠地区特殊的自然环境, 其可能蒸发能力是很大的。由图 3 可见, 潜热通量观测值计算的实际蒸发量的量级很小, 这符合干旱区特别是沙漠地区水汽极度缺乏的事实, 而沙地蒸散计算值体现了沙漠地区的可能蒸发能力。塔中站 2015 年 6—9 月降水量分别为 10.9、12.4、1.1、3.4 mm, 月降水

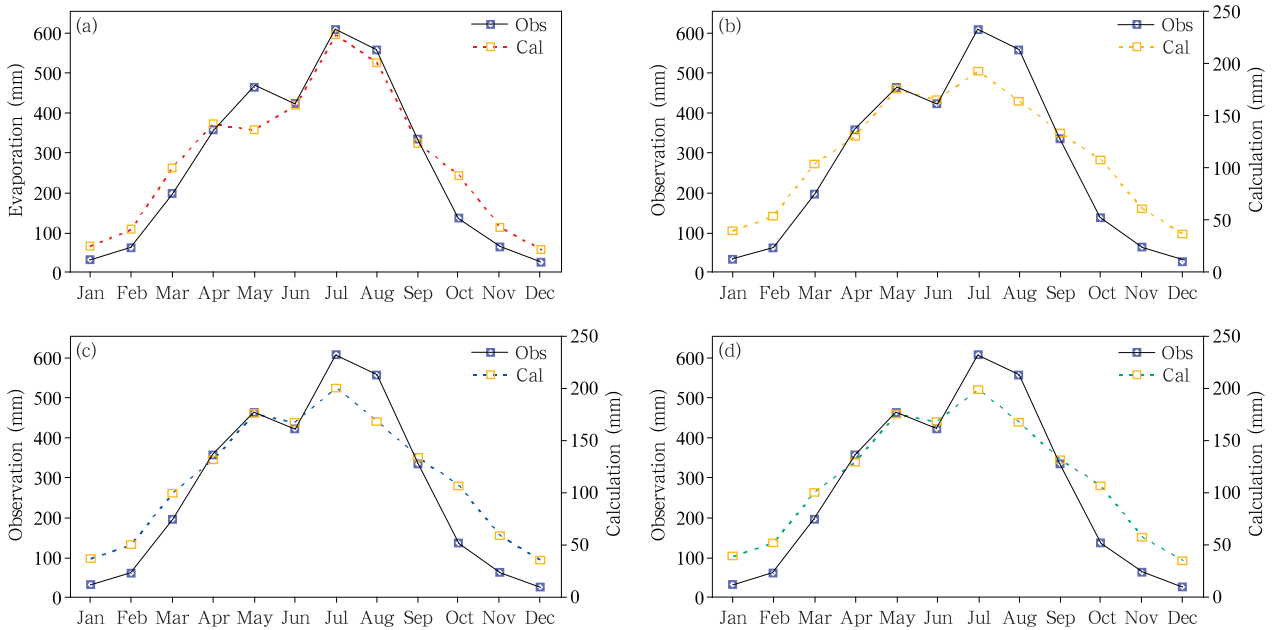


图 1 蒸散计算值与塔中气象站蒸发观测值的逐月变化(2015年)
 (a. 自然沙地(西), b. 人工绿地(中), c. 人工绿地(东), d. 人工绿地(西); 国家标准气象站——塔中站的蒸发观测 4—9 月(无冰期)采用 E-601 型蒸发器, 1—3、10—12 月采用小型蒸发皿, 根据不同蒸发皿的折算系数(谢万银等, 2014), 已将蒸发皿的观测换算为统一标准)

Fig. 1 Seasonal variations (2015) of calculated evapotranspiration and observed evaporation collected at Tazhong weather station

(a. sandy land (west), b. constructed green land (middle), c. constructed green land (east), d. constructed green land (west); note that evaporation is observed over April—September (iceless period) using E-601 type and small-scale type is used for observations over January—March and October—December. Based on conversion coefficients of different evaporation pans, the observed values are transferred to standard values)

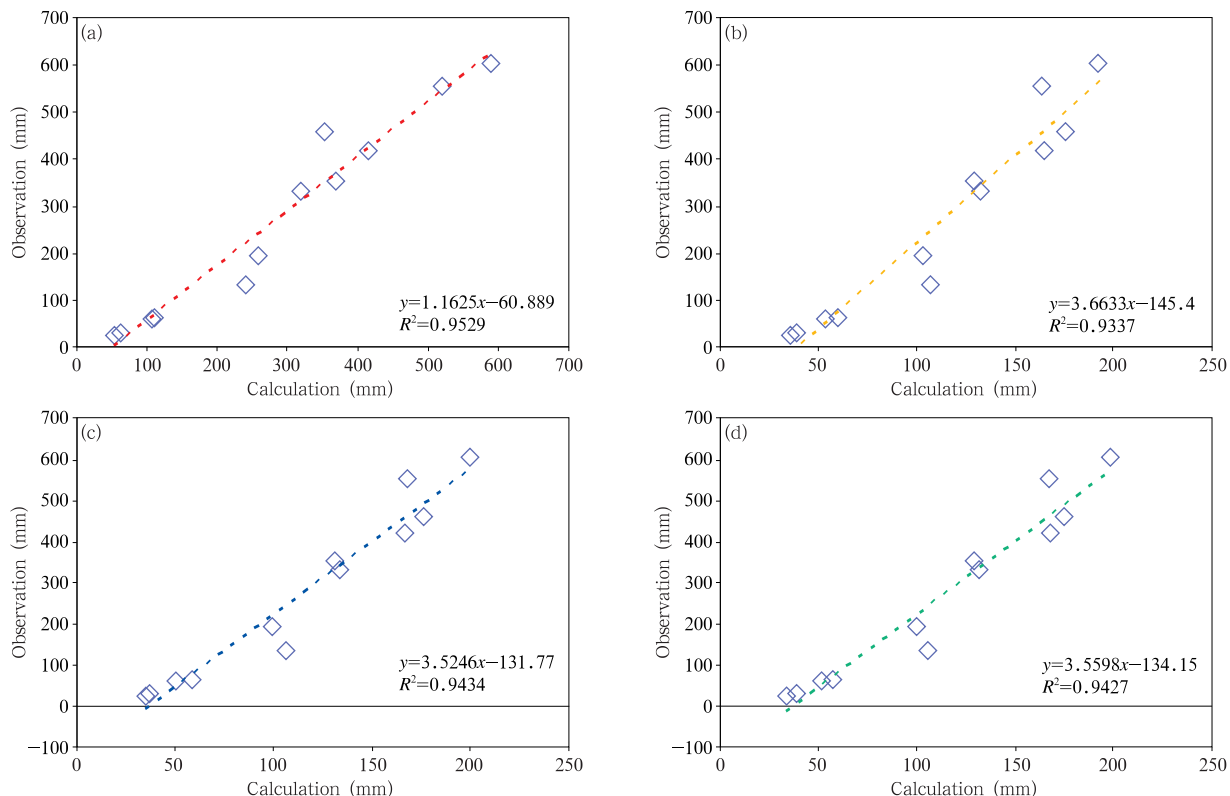


图2 蒸散计算值与塔中气象站蒸发观测值相关散点分布(2015年)

(a. 自然沙地(西), b. 人工绿地(中), c. 人工绿地(东), d. 人工绿地(西))

Fig. 2 Scatter plots of correlation (2015) between calculated evapotranspiration and evaporation observed at Tazhong weather station

(a. sandy land (west), b. constructed green land (middle), c. constructed green land (east), d. constructed green land (west))

表1 人工绿地(中、东、西)与观测值差(单位:mm)

Table 1 Differences between observation and calculation over constructed green land (middle, east, west) (unit: mm)

	冷季			暖季(植被生长季、茂盛、凋谢时段)						冷季		
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
绿地(中)与观测差值	9.35	-6.29	-90.95	-223.796	-283.237	-253.671	-410.97	-389.75	-198.51	-26.35	-2.08	12.15
绿地(东)与观测差值	7.13	-9.29	-94.29	-221.836	-282.507	-251.781	-403.37	-385.40	-197.49	-26.60	-3.40	11.66
绿地(西)与观测差值	9.39	-7.68	-93.75	-224.026	-283.587	-250.781	-404.99	-386.14	-199.61	-27.23	-4.84	10.62

总量的变化是实际蒸发量的主要影响因素,佐证了在沙漠地区,由于水分的匮乏,实际蒸发量很小,夏季降水多的月份,如6、7、9月,实际蒸发量明显提升,在降水少的8月,明显趋于低值。

4.2 变异性规律的研究

如表1所示,人工绿地的蒸散在生长季与蒸发

皿的观测差值大,而自然沙地蒸散计算值的量级与观测值基本吻合,导致人工绿地在生长季与自然沙地计算值存在较大差异,主要原因是:下垫面的植被影响了区域小气候,改变下垫面的能量分配格局,观测的气温、风速、相对湿度等主要气象要素与自然沙地相比存在很大的差异。因此,在植被茂盛的生长

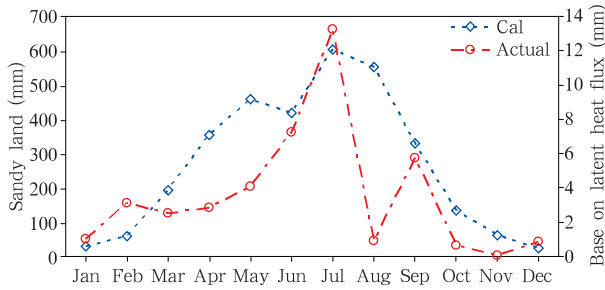


图3 蒸散计算值(自然沙地)与潜热通量计算的
实际蒸发量月变化(2015年)对比
Fig.3 Seasonal variations (2015) of calculated
evapotranspiration over sandy land and actual
evaporation derived from the latent heat flux

季就表现得尤为突出,差值的量化将这点表现得非常充分。冷季,观测值明显低于自然沙地,在不考虑系统和计算误差的条件下,自然沙地的观测点在代表性很强的平坦自然沙面,蒸发皿观测在塔中气象站,东西两侧有高大沙垄,处于谷地。观测地点的地形起伏条件与周边下垫面情况成为导致差异的主导因素。为了便于分析和比较,基于观测资料,文中利用时次计算资料(1年8760个时次),将自然沙地与人工绿地(4个站)做一个计算蒸散主要影响因子的变异性研究。首先,表2给出影响蒸散计算的主要因子的差值,自然沙地用D表示,人工绿地用P表示。其次,结合FAO56-PM计算蒸散公式,通过差

表2 自然沙地与人工绿地主要影响因子差值
Table 2 Differences in major influencing factors between CGL and NSL

因子差值	饱和水汽压与实际水汽压之差(kPa)	2 m 平均气温(°C)	2 m 平均风速(m/s)	饱和水汽压斜率(kPa/°C)	蒸散时次平均值(mm)
D-P 中	0.138	0.733	1.777	-0.008	0.230
D-P 东	0.141	1.300	1.116	-0.004	0.238
D-P 西	0.141	1.436	0.926	-0.006	0.239

表3 各个影响因子赋值计算不同下垫面蒸散时次差值百分比与年累计量差值
Table 3 Hourly PED and ACD of evapotranspiration under different underlying surfaces based on the assignment calculation of various influencing factors between CGL and NSL

计算值变量	赋值	ED (mm/h)	PD(中) (mm/h)	PD(东) (mm/h)	PD(西) (mm/h)	ED-PD中		ED-PD东		ED-PD西	
						百分比 (%)	年累计 (mm)	百分比 (%)	年累计 (mm)	百分比 (%)	年累计 (mm)
饱和水汽压 与实际水汽 压之差 (kPa)	0.04	0.19227	0.16594	0.17430	0.17778	13.7	230.7	9.3	157.4	7.5	126.9
	0.06	0.23013	0.17615	0.19550	0.20180	23.5	472.7	15.0	303.3	12.3	248.1
	0.08	0.26798	0.18636	0.21670	0.22583	30.5	715.0	19.1	449.3	15.7	369.3
	0.10	0.30584	0.19657	0.23789	0.24985	35.7	957.2	22.2	595.2	18.3	490.4
	0.12	0.34369	0.20678	0.25909	0.27388	39.8	1199.3	24.6	741.1	20.3	611.6
	0.14	0.38155	0.21699	0.28029	0.29790	43.1	1441.5	26.5	887.0	21.9	732.7
2 m 平均 气温(°C)	0.16	0.41940	0.22720	0.30149	0.32192	45.8	1683.7	28.1	1032.9	23.2	853.9
	11.0	0.42352	0.15749	0.15373	0.15449	62.8	2330.4	63.7	2363.3	63.5	2356.6
	11.5	0.42298	0.15747	0.15369	0.15445	62.7	2325.8	63.6	2358.9	63.5	2352.3
	12.0	0.42244	0.15744	0.15365	0.1544	62.7	2321.4	62.6	2354.6	63.4	2347.9
	12.5	0.42190	0.15742	0.15362	0.15436	62.8	2316.8	63.5	2350.2	63.4	2343.7
	13.0	0.42137	0.15740	0.15358	0.15432	62.6	2312.4	63.5	2345.9	63.3	2339.3
2 m 平均 风速 (m/s)	13.5	0.42084	0.15738	0.15354	0.15428	62.6	2307.8	63.5	2341.5	63.3	2335.1
	14.0	0.42031	0.15736	0.15350	0.15423	62.5	2303.4	63.4	2337.2	63.3	2330.8
	0.5	0.21682	0.15707	0.15100	0.15112	27.5	532.4	30.3	576.6	30.3	575.5
	1.0	0.28023	0.15982	0.15280	0.15292	42.9	1054.8	45.4	1116.2	45.4	1115.2
	1.5	0.33766	0.16233	0.15444	0.15455	51.9	1535.9	54.3	1604.9	54.2	1604.0
	2.0	0.38991	0.16461	0.15593	0.15603	57.7	1973.6	60.0	2049.6	59.9	2048.8
饱和水汽 压斜率 (kPa/°C)	2.5	0.43766	0.16671	0.15730	0.15739	61.9	2373.6	64.1	2455.9	64.0	2455.1
	3.0	0.48147	0.16863	0.15856	0.15865	64.9	2740.4	67.1	2828.6	67.0	2827.9
	0.11	0.43449	0.14974	0.14741	0.14819	65.5	2494.4	66.1	2514.8	65.9	2507.9
	0.12	0.42480	0.15361	0.15084	0.15152	63.8	2375.7	64.4	2399.9	64.3	2393.9
	0.13	0.41595	0.15709	0.15395	0.15454	62.2	2267.6	62.9	2295.1	62.8	2289.9
	0.14	0.40781	0.16023	0.15678	0.15730	60.7	2168.8	61.6	2199.0	61.4	2194.5

注:ED为自然沙地蒸散,PD为人工绿地蒸散。

值判断饱和水汽压与实际水汽压之差、2 m 平均气温、2 m 平均风速、饱和水汽压斜率可视为变异性研究的主要影响因子。上述 4 个因子作为赋值变量计算每个时次的蒸散值,当 1 个因子赋值时,其他因子不变,计算出各时次蒸散值。进而计算出由因子变量赋值后的蒸散差值百分比与蒸散年累计量差值,从而量化给出由每个变量因子所引发的蒸散计算差异。

文中各个变量的赋值参考观测值区间,以符合实际计算情况。根据 FAO56-PM 蒸散计算,判断出饱和水汽压与实际水汽压之差对计算结果是正影响,二者之差是最高、最低气温的函数,因此,客观反映出气温日较差对蒸散的影响是正效应。表 3 结果显示,随着饱和水汽压与实际水汽压之差赋值的增大,蒸散时次差值百分比与年累计量差值随之递增,气压差值因子赋值递增 0.02 kPa,时次差值百分比递增 4%—6%,蒸散年累计计算值递增 200 mm 左右,在接近影响因子观测的赋值区间内,饱和水汽压与实际水汽压之差造成蒸散年累计量差值增大,ED-PD 中:1441.5 mm,ED-PD 东:887.0 mm,ED-PD 西:732.7 mm。根据 FAO56-PM 蒸散公式,判断 2 m 平均气温对计算结果是负影响,受计算中单位换算的影响,量级上会客观减小。因此,反映出气温影响因子对蒸散的计算结果影响百分比表现极为稳定,即便是随着变化因子赋值递增 0.5℃,蒸散时次差值百分比也稳定在 62%—63%,在赋值区间内,2 m 平均气温对蒸散的年累计差值是负影响,约为 2300 mm。同样,接近影响因子观测的赋值区间内,2 m 平均气温造成蒸散年累计差值减小,ED-PD 中为 2307.8 mm,ED-PD 东为 2341.5 mm,ED-PD 西为 2335.1 mm。2 m 平均风速的减小有利于蒸散的减小,风速与蒸散的计算值成正比关系,在风速的赋值计算结果(表 3)中,随着赋值 0.5 m/s 的递增,蒸散时次差值百分比与蒸散年累计差值呈线性增长,在接近影响因子观测的赋值区间内,2 m 平均风速造成蒸散年累计差值增大,ED-PD 中为 1973.6 mm,ED-PD 东为 2019.6 mm,ED-PD 西为 2048.8 mm。对于饱和水汽压的斜率因子的研究提及较少,饱和水汽压斜率是平均气温的函数,根据算法,再结合实际观测值的量级比较饱和水汽压斜率总体对蒸散计算值为负影响。即便是饱和水汽压斜率的变化很小,对蒸散计算值的影响还是很大

的。存在一个有趣的现象(表 3)是,随着饱和水汽压斜率赋值 0.01 的增加,蒸散时次差值百分比是逐渐减小的,且蒸散年累计差值也随之逐渐减小,并有规律性的表现为百分比递减 1,蒸散计算值递减 100 mm 左右。在接近影响因子观测的赋值区间内,饱和水汽压斜率造成蒸散年累计差值减小,ED-PD 中为 2267.6 mm,ED-PD 东为 2295.1 mm,ED-PD 西为 2289.9 mm。

根据表 3 和上述分析,人工绿地计算值低于自然沙面及蒸发皿观测值,是由于生长季植被的影响,造成了饱和水汽压之差减小,平均气温降低,平均风速降低,饱和水汽压的斜率增大。从单一因子解析,饱和水汽压之差减小,蒸散计算值减小;平均气温对蒸散计算值是负影响,其值降低,蒸散计算值增大;平均风速降低,蒸散计算值减小;饱和水汽压斜率增大,蒸散计算值减小,因此,人工绿地的蒸散计算值较小是合理的。2015 年人工绿地(中)蒸散 1355.04 mm,人工绿地(东)蒸散 1361.97 mm,人工绿地(西)蒸散 1356.52 mm。段春锋等(2012)指出,49 年来塔克拉玛干沙漠周边地区潜在蒸散的年平均值约为 1091.95 mm。其中夏季的值最大,冬季的值最小。结合其他学者的研究结果和接近影响因子观测的赋值区间内,各个因子对蒸散计算值的影响增减进一步证实了计算结果的可信度。

5 结论与讨论

利用中国气象局塔克拉玛干沙漠气象野外科学试验基地自然沙地与人工绿地加密观测试验时次数数据,采用 FAO56-PM 蒸散算法,详细计算自然沙地、人工绿地以时次为单位的蒸散值,得出以下结论:

(1) 潜在蒸散计算公式 FAO56-PM 适用于自然沙地背景下的人工绿地,与观测值相比,蒸散计算值变化趋势很好地刻画了其年内变化,3 个人工绿地站点的计算值与观测值均有很好的线性相关,拟合优度分别为:人工绿地(中)0.933,人工绿地(东)0.943,人工绿地(西)0.942。自然沙地的潜在蒸散与蒸发皿观测值变化趋势基本一致,冷季的蒸散计算值与观测值差值相对较大,暖季(生长季)与观测值较为吻合,计算量级与观测一致。

(2) 人工绿地(中)2015 年蒸散计算值为 1355.04 mm,人工绿地(东)为 1361.97 mm,人工绿地(西)为 1356.52 mm,自然沙地为 3397.7 mm。

人工绿地蒸散计算值与蒸发皿观测值相比,冷季的蒸散计算值与观测值差值较小,暖季(生长季)差值较大,主要原因是植被的影响,导致蒸散降低。

(3) 饱和水汽压与实际水汽压之差、2 m 平均气温、2 m 平均风速、饱和水汽压斜率是计算蒸散主要的影响因子,通过对每个影响因子的赋值给出了蒸散时次差值百分比和蒸散年累计差值,量化指出了几个关键因子对 FAO56-PM 蒸散计算的影响。

文中采用多种观测数据,详细地计算了自然沙地与人工绿地的蒸散(时次)。通过与蒸发皿实际观测比较,突显出蒸散模型在干旱条件下估算的适用性,同时较好地证明了精细化观测数据能提高模型计算精度,如净辐射、风速、适用的干湿表常数、饱和水汽压与实际水汽压之差等。当然,个别参数的计算方法并不适合研究区域蒸散的计算,例如饱和水汽压的斜率。通过数据的解析,评估了各种参数对自然沙地与人工绿地蒸散计算的影响,例如土壤热通量,在蒸散模型计算中由于与净辐射的量级相差较大,对蒸散模拟结果的影响微乎其微。而在沙漠气候条件下,温度、水汽条件、风速都是蒸散的关键影响因子,将其映射到蒸散计算模型上,则分别表现出对蒸散的正、负影响。

干旱区,蒸散能力的观测本身存在误差,文中用蒸发皿作为观测标准值解析了不同下垫面的蒸散计算值的变化,值得关注的是,因为现行气象观测的要求,在冰期和无冰期采用不同的蒸发皿观测,换算统一之后的数据必然存在误差,由于塔中站采用这种观测的年限较短,所以采用了较为适合的其他地区的折算系数,未来有长序列的资料后应该通过观测数据对折算系数进行修正,从而提高比对结果的可靠性。

结果表明,GB/T 20481-2006 气象干旱等级的蒸散算法在沙漠地区的适用性较好,计算可信度较高。在不同下垫面计算表现不同。以观测为标准,人工绿地比自然沙地更为精准刻画了变化趋势,从本质上体现了气象干旱等级蒸散的算法在有植被背景下的计算优势。计算量级上自然沙地计算值比人工绿地更贴近,这是由下垫面状况不同造成气象观测计算参数的差异引发的必然结果。研究结果的高相关也进一步佐证了其在沙漠地区的适用性。

参考文献

曹雯,申双和. 2008. 我国太阳日总辐射计算方法的研究. 南京气

- 象学院学报, 31(4): 587-591. Cao W, Shen S H. 2008. Estimation of daily solar radiation in China. *J Nanjing Inst Meteor*, 31(4): 587-591 (in Chinese)
- 段春锋, 缪启龙, 曹雯. 2012. 塔克拉玛干沙漠周边地区潜在蒸散时空演变特征及其主要影响因素. *中国沙漠*, 32(6): 1723-1730. Duan C F, Miao Q L, Cao W. Spatio-temporal variations of potential evapotranspiration around Taklimakan Desert and the main influencing factors. *J Desert Res*, 32(6): 1723-1730 (in Chinese)
- 胡顺军, 雷加强, 徐新文等. 2008. 塔克拉玛干沙漠风沙土潜水极限蒸发强度的理论分析. *科学通报*, 53(S2): 107-111. Hu S J, Lei J Q, Xu X W, et al. 2008. Theoretical analysis of the limiting rate of phreatic evaporation for Aeolian sandy soil in Taklimakan Desert. *Chinese Sci Bull*, 53(S2): 107-111 (in Chinese)
- 霍文, 杨青, 李杨等. 2011. 阿克苏流域可能蒸发量的计算. *水土保持研究*, 18(1): 137-140, 145. Huo W, Yang Q, Li Y, et al. 2011. Calculation of potential evaporation at Akesu River Basin. *Res Soil Water Conserv*, 18(1): 137-140, 145 (in Chinese)
- 李祥余, 李帅, 何清. 2005. 沙漠化问题研究综述. *干旱气象*, 23(4): 73-82. Li XY, Li S, He Q. 2005. An overview of study on sandy desertification. *Arid Meteor*, 23(4): 73-82 (in Chinese)
- 刘永强, 何清, 张宏升等. 2011. 塔克拉玛干沙漠腹地地气相互作用参数研究. *高原气象*, 30(5): 1294-1299. Liu Y Q, He Q, Zhang H S, et al. 2011. Studies of land-atmosphere interaction parameters in Taklimakan desert hinterland. *Plateau Meteor*, 30(5): 1294-1299 (in Chinese)
- 刘钰, Pereira L S. 2001. 气象数据缺失条件下参照蒸发量的计算方法. *水利学报*, 32(3): 11-17. Liu Y, Pereira L S. 2001. Calculation methods for reference evapotranspiration with limited weather data. *J Hydraul Eng*, 32(3): 11-17 (in Chinese)
- 马宁, 王乃昂. 2016. 巴丹吉林沙漠腹地湖泊水面蒸发模拟的特殊性. *干旱区研究*, 33(6): 1141-1149. Ma N, Wang N A. 2016. On the simulation of evaporation from lake surface in the hinterland of the Badain Jaran Desert. *Arid Zone Res*, 33(6): 1141-1149 (in Chinese)
- 申双和, 盛琼. 2008. 45年来中国蒸发皿蒸发量的变化特征及其成因. *气象学报*, 66(3): 452-460. Shen S H, Sheng Q. 2008. Changes in pan evaporation and its cause in China in the last 45 years. *Acta Meteor Sinica*, 66(3): 452-460 (in Chinese)
- 孙朋. 2017. 极端干旱区沙漠包气带降水入渗与蒸发规律模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学. Sun P. 2017. Modeling the Water Infiltration and Evaporation in Unsaturated Zone of the Extremely Arid Area[D]. Lanzhou: Lanzhou University (in Chinese)
- 向友珍, 吴立峰, 张富仓等. 2016. 基于常规气象资料估算南方地区日辐射总量方法比较. *农业机械学报*, 47(10): 181-192, 155. Xiang Y Z, Wu L F, Zhang F C, et al. 2016. Comparison of total radiation estimation methods in south area based on conventional meteorological data. *Trans Chinese Soc Agric Mach*,

- 47(10): 181-192, 155 (in Chinese)
- 谢万银, 陈英, 徐彬. 2014. 甘肃民勤小型与 E-601 型蒸发皿蒸发量折算系数分析. 干旱气象, 32(3): 481-486. Xie W Y, Chen Y, Xu B. 2014. Analysis on small type and E-601 type evaporation conversion coefficient in Minqin of Gansu Province. J Arid Meteorol, 32(3): 481-486 (in Chinese)
- 阳坤, 王介民. 2008. 一种基于土壤温湿资料计算地表土壤热通量的温度预报校正法. 中国科学 D 辑: 地球科学, 38(2): 243-250. Yang K, Wang J M. 2008. A temperature prediction correction method for calculation of surface soil heat flux based on soil temperature and humidity data. Sci China Ser D: Earth Sci, 51(2): 721-729
- 张建国, 孙树国, 徐新文等. 2011. 塔克拉玛干沙漠公路防护林间土壤蒸发及蒸发量估算. 水土保持通报, 31(1): 145-148. Zhang J G, Sun S G, Xu X W, et al. 2011. Characterizing and estimating soil evaporation in Taklimakan Desert highway shelter belt. Bull Soil Water Conserv, 31(1): 145-148 (in Chinese)
- 张明江, 苏明磊, 张忠焱. 2015. 塔里木盆地沙漠腹地潜水蒸发量的数值计算. 新疆地质, 33(4): 550-555. Zhang M J, Su M L, Zhang Z Y. 2015. The digital computation of phreatic water evaporation capacity in desert hinterland of Tarim Basin. Xinjiang Geol, 33(4): 550-555 (in Chinese)
- 张志山, 李新荣, 王新平等. 2005. 沙漠人工植被区的蒸发蒸腾. 生态学报, 25(10): 2484-2490. Zhang Z S, Li X R, Wang X P, et al. 2005. Evaporation and transpiration in revegetated desert area. Acta Ecol Sinica, 25(10): 2484-2490 (in Chinese)
- 张志山, 何明珠, 谭会娟等. 2007. 沙漠人工植被区生物结皮类土壤的蒸发特性: 以沙坡头沙漠研究试验站为例. 土壤学报, 44(3): 404-410. Zhang Z S, He M Z, Tan H J, et al. 2007. Evaporation from soils covered with biological crusts in revegetated desert: A case study in Shapotou Desert research and experiment station. Acta Pedol Sinica, 44(3): 404-410 (in Chinese)
- 中国国家标准化管理委员会. 2006. GB/T 20481-2006 气象干旱等级. 北京: 中国标准出版社. Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 20481-2006 Classification of Meteorological Drought Category. Beijing: Standards Press of China (in Chinese)
- 周成龙, 杨兴华, 霍文等. 2017. 塔克拉玛干沙漠腹地降水特征. 中国沙漠, 37(2): 343-348. Zhou C L, Yang X H, Huo W, et al. 2017. Characteristics of precipitation at the hinterland of the Taklimakan Desert. J Des Res, 37(2): 343-348 (in Chinese)
- Allen R G, Smith M, Perrier A, et al. 1994. An update for the definition of reference evapotranspiration. ICID Bull, 43(2): 1-34
- Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations
- Hargreaves G H. 1974. Estimation of potential and crop evapotranspiration. Trans. ASAE, 17: 701-704
- Houston J. 2006. Evaporation in the Atacama Desert: An empirical study of spatio-temporal variations and their causes. J Hydrology, 330(3-4): 402-412
- Kidron G J. 2010. The effect of shrub canopy upon surface temperatures and evaporation in the Negev Desert. Earth Surface Processes & Landforms, 34(1): 123-132
- Kimura R, Abulaiti A, Mano M, et al. 2016. Surface heat flux analysis in Gobi Desert Steppe, Mongolia: An observation study. SOLA, 12: 175-180
- Menenti M. 1984. Physical aspects and determination of evaporation in deserts applying remote sensing techniques [D]. Wageningen: Landbouwhogeschool Wageningen: 1305-1309
- Moncrieff J B, Massheder J M, Bruin H D, et al. 1997. A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide. J Hydrol, 188-189: 589-611
- Yang X H, He Q, Ali M, et al. 2012. A field experiment on dust emission by wind erosion in the Taklimakan Desert. Acta Meteor Sinica, 26(2): 241-249
- Zhang J, Takahashi K, Wushiki H, et al. 1995. Water geochemistry of the rivers around the Taklimakan Desert (NW China): Crustal weathering and evaporation processes in arid land. Chem Geol, 119(1-4): 225-237