

DOI: 10.5846/stxb202007301985

张阳阳, 陈喜, 高满, 刘秀强. 内陆干旱区典型旱生植物蒸腾耗水量模拟研究. 生态学报, 2021, 41(19): 7751-7762.

Zhang Y Y, Chen X, Gao M, Liu X Q. Simulation of transpiration for typical xeromorphic plants in inland arid region of Northwestern China. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(19): 7751-7762.

内陆干旱区典型旱生植物蒸腾耗水量模拟研究

张阳阳^{1,2,3}, 陈喜^{1,2,3,4,*}, 高满^{1,2,3}, 刘秀强^{1,2,3}

1 天津大学地球系统科学学院, 天津 300072

2 天津大学表层地球系统科学研究院, 天津 300072

3 天津市环渤海关键带科学与可持续发展重点实验室, 天津 300072

4 河海大学水文水资源学院, 南京 210098

摘要: 内陆干旱区植物耗水量是生态恢复和水资源管理的重要依据。参照甘肃省民勤县青土湖附近气象条件、干旱区典型植物生理特征以及土壤水力特征参数, 采用 Tardieu-Davies 模型(气孔导度模型), 计算在适宜和极限生态地下水埋深下 7 种典型植物生长季蒸腾耗水量, 并与国内外研究成果对比, 得出以下结论: 适宜、极限生态地下水埋深下, 7 种植物生长季内平均蒸腾量分别为 793、602 mm。不同植物蒸腾量差异大, 适宜生态地下水埋深下水生植物芦苇(*Phragmites australis*)、河岸带植被柽柳(*Tamarix chinensis*)蒸腾量最大, 分别为 1292、1147 mm; 耐旱性强的荒漠植被梭梭(*Haloxylon ammodendron*)蒸腾量最小, 为 279 mm; 其它植被盐节木(*Halocnemum strobilaceum*) (940 mm)、罗布麻(*Poacynum hendersonii*) (913 mm)、白刺(*Nitraria tangutorum*) (534 mm)、胡杨(*Populus euphratica*) (448 mm) 蒸腾量依次减小。由适宜生态地下水埋深降低至极限生态地下水埋深时, 植物蒸腾量平均减少 24%。耐旱性强的梭梭、白刺减幅大, 分别为 53、35%; 耐旱性弱的芦苇、柽柳减幅小, 分别为 19、13%。

关键词: 内陆干旱区; 地下水埋深; 生长季蒸腾量; Tardieu-Davies 模型

Simulation of transpiration for typical xeromorphic plants in inland arid region of Northwestern China

ZHANG Yangyang^{1,2,3}, CHEN Xi^{1,2,3,4,*}, GAO Man^{1,2,3}, LIU Xiuqiang^{1,2,3}

1 School of Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China

2 Institute of Surface-Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China

3 Tianjin Key Laboratory of Science and Sustainable Development of Bohai rim, Tianjin 300072, China

4 College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China

Abstract: Plant transpiration is of great importance in restoration and water resources management, especially, in inland arid region of Northwestern China. In this study, based on the meteorological data of Qingtu Lake in Minqin County, Gansu Province of China, the physiological parameters of the seven typical desert plants, and soil hydraulic characteristics in the inland arid region of China, the transpirations of the seven typical plants were simulated by the Tardieu-Davies model. Moreover, since the xeromorphic plants rely on depth to groundwater. The plant transpiration modelling is executed in the two soil moisture conditions in root zone maintained by groundwater. The soil moistures were roughly estimated by the Van Genuchten model at the depths to groundwater table that were suitable and could lead to extinction for plant growth. The modeling obtained hourly and daily transpiration in the ten years during 2009—2018. Compared to the collected data from the published literatures, our simulated transpirations of the seven typical plants during growing season (April—September)

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0406101)

收稿日期: 2020-07-30; 修订日期: 2021-03-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xi_chen@tju.edu.cn

were proven to be reasonable. The modeling results show that the mean transpiration of the seven plants during growing season under the suitable and the extinction depths is 793 and 602 mm, respectively. The transpirations of individual plant species during growing season were different. Under the condition of the suitable depth, the transpirations of *Phragmites australis* of aquatic plant and *Tamarix chinensis* of riparian plant were largest, which were 1292 and 1147 mm in growing season, respectively; by contrast, *Haloxylon ammodendron* needs the least water for transpiration (279 mm) as *Haloxylon ammodendron* can resist extremely dry climate. The transpirations of the other plant species decrease in the order as follows: 940 mm for *Halocnemum strobilaceum*, 913 mm for *Poacynum hendersonii*, 534 mm for *Nitraria tangutorum*, and 448 mm for *Populus euphratica* in growing season. When the suitable depth declines to the extinction depth, the plant transpiration during growing season decreases by 24%, on average. The decreases of plant transpirations were also different for different plant species. Since *Haloxylon ammodendron* and *Nitraria tangutorum* have strong capacity of drought tolerance, their transpirations decrease markedly with depth to water table, e.g., 53 and 35%, respectively, when the suitable depth declines to the extinction depth. *Phragmites australis* and *Tamarix chinensis* have low capacity to resist drought. Thus, their transpirations decrease least with the depth to water table, e.g., 19 and 13%, respectively. For the other plant species, when the suitable depth declines to the extinction depth, the transpirations of *Populus euphratica*, *Poacynum hendersonii*, and *Halocnemum strobilaceum* decrease by 33, 25 and 25%, respectively.

Key Words: inland arid region; depth to groundwater table; transpiration in growing season; Tardieu-Davies model

西北干旱区降水量少、潜在蒸散发量大、土壤含水率低,生长一系列依赖地下水的旱生植被。随着气候变化和人类活动影响,过量开采地下水造成的水位下降,引发植被退化、沙漠化等一系列生态环境问题。近年来,我国实施的一系列生态恢复工程,迫切需要掌握植被耗水规律,为区域水资源和生态环境演变影响评估提供科学支撑。

植物耗水量计算分为单株植物耗水量、植物群落耗水量^[1]。单株植物耗水量观测和计算主要方法有:整容器法、快速称重法、液流法(热脉冲、热扩散、热平衡)。整树容器法简便易行、计量精确,通常将其作为基准测算树木蒸腾的准确性^[2]。快速称重法通过剪取枝叶在田间进行两次间隔称重,用离体失水量和间隔时间换算蒸腾速率,代表正常生长状况下的蒸腾速率^[3]。该方法的前提是假设枝叶离体短时间内蒸腾改变不大。液流法通过测定树干液流量来计算树冠部蒸腾量,方法简单且精度高^[4]。植被群落主要计算方法有:水量平衡法、微气象法、红外遥感法^[1]。水量平衡法通过计算区域内水量的收入支出差额来推求蒸散量。微气象法则主要基于修正的 Penman-Monteith 公式计算植物蒸腾量^[5]。红外遥感法根据植被的光谱特性、红外信息,结合微气象参数计算蒸腾量。受观测条件的限制,整树容器法等测量方法难以大范围推广,水量平衡法、微气象法等一般未考虑植物生理特征的差异,难以辨别区域内不同植物蒸腾量的差异。

西北干旱区不同流域典型植物耗水量已有较多研究(表1),已有结果表明:由于植物生长状态和供水条件、计算和实测方法的差异,蒸腾耗水量变化范围大。同一种植物在不同供水条件下植物耗水量存在差异,如胡杨(*Populus euphratica*)在常年输水河段和间歇性输水河段的生长季耗水量分别为 990、414 mm^[15];柽柳(*Tamarix chinensis*)在土壤含水量为 70%田间持水量下的生长季耗水量为 500 mm,当土壤含水量为 35%田间持水量时,生长季耗水量降低为 235 mm^[24];灌溉的人工梭梭林(*Haloxylon ammodendron*)耗水量为 534 mm^[9],荒漠区天然梭梭耗水量仅为 49 mm^[28];湿地芦苇(*Phragmites australis*)耗水量可达 1500 mm^[31],沙生芦苇耗水量可减少到 173 mm^[18]。植物耗水量还与树龄(通常用基径表示)有关,如民勤地区基径 3.03 cm 的柽柳耗水量是基径 1.5 cm 耗水量的 6 倍^[9];梭梭直径从 22.9 cm 降低至 9.9 cm,生长季耗水量从 113 mm 减少至 92 mm^[29]。不同测量方法实测的植物耗水量存在差异,如在黑河流域下游,液流法(热脉冲技术)得到胡杨、梭梭生长季耗水量分别为 154^[7]、127 mm^[29],而基于水量平衡法计算结果分别为 520^[6]、213 mm^[18];在塔里木河流域,柽柳生长季耗水量液流法得出 761 mm^[18],模型模拟得出 472 mm^[25]。

表 1 干旱区典型植物生长季耗水量已有研究方法和结果

Table 1 Transpiration of plants in arid region during growing season based on estimates of available methods and results

植物 Plant	基径 Stem base diameter/m	研究区 Area	方法 Method	数据量 Data	生长季耗水量 Transpiration during growing season/mm		参考文献 References
					范围 Range	平均 Mean	
胡杨 <i>Populus euphratica</i>	15.0—23.1	黑河、塔里木河、 石羊河	红外遥感法	10	154—990	538	[6-15]
白刺 <i>Nitraria tangutorum</i>	1.6	石羊河	液流法	1	—	318	[9]
怪柳 <i>Tamarix chinensis</i>	1.4—5.0	黑河、塔里木河、 石羊河	红外遥感法、液流 法、水量平衡法	13	44—1350	503	[9-11,16-25]
罗布麻 <i>Poacynum hendersonii</i>	—	阿姆河 (干旱地区)	红外遥感法	1	—	727	[16]
梭梭 <i>Haloxylon ammodendron</i>	2.0—22.9	石羊河、黑河、柴达 木盆地、阿拉善	液流法、微气象法、 快速称重法	8	64—534	140	[9,18,24,26-30]
芦苇 <i>Phragmites australis</i>	0.5—1.4	黑河、塔里木河	液流法	4	796—1500	1231	[16,31-33]

“—”表示文献中无具体数据

以上实测和计算方法,通常仅得到实测土壤水分、气象或者植物生长状态下蒸腾耗水量,难以预测不同气候、供水和生长状态下植物蒸腾量变化。自 Philip 提出“土壤-植物-大气”连续体概念后,构建的植物耗水量模型,具有分析植物生理特征参数(如气孔导度等)与气象条件以及土壤水分因子关系的功能,成为模拟和预测植物蒸腾量及其变化的重要途径。估算气孔导度对环境因子响应的模型主要为经验模型(如 Jarvis 模型)和半经验模型(如 Ball-Woodrow-Berry(BWB)模型两类^[34]。Jarvis 模型建立气孔导度与环境因子的单一函数^[35],BWB 模型旨在描述气孔导度与光合速率的关系^[36]。但无论是 Jarvis 模型还是 BWB 模型,都未考虑由根部到冠层的水分运输过程中植物根源信号对植物气孔导度的影响。

本文运用 Tardieu-Davies 模型^[37],考虑植物根源信号对植物气孔导度的影响,参照石羊河尾间湖(青土湖)气象条件和典型植物的生理特征数据,利用前期适宜和极限生态地下水埋深下土壤水分状态研究成果^[38],计算适宜和极限生态地下水埋深下植物耗水量,将模型计算结果与国内外现有研究成果对比,分析计算结果合理性和模型适用性,为流域水资源管理和生态环境修复提供科学依据。

1 Tardieu-Davies 模型

SPAC 水分传输理论明晰了水分传输途径,即由土壤到达植物根表皮、根系、茎,最后到达叶片,再由叶片气孔扩散到空气层。Tardieu-Davies 模型^[39]将植物体简化为根、主干和叶片三部分(图 1)。根源信号可作为植物在日尺度上感知土壤水分获取能力(土壤水分状况或对水流的阻抗)的指标^[26],脱落酸(ABA)参与对作物气孔行为调控。根源信号 ABA 的强弱依赖于土壤水势(Ψ_{soil})和根水势(Ψ_r)的共同作用;主干对根源信号起到传输和稀释作用;叶片气孔导度受传导来的根源信号 ABA 的影响;最终,水汽压差(VPD)和气孔导度(g_s)等决定植物的蒸腾耗水量。

植物叶片蒸腾流的计算公式为:

$$J_{\text{out}} = \frac{S(s R_n + \rho C_p g_a \text{VPD})}{\lambda \left[s + \gamma \left(1 + \frac{g_a}{g_s} \right) \right]}$$

(1)

式中, J_{out} 为植物叶片蒸腾流(mg/s), S 为叶面积(m^2), s 为饱和水汽压对温度的斜率($\text{Pa}/^\circ\text{C}$), R_n 为净辐射强度(W/m^2), ρ 为空气密度(kg/m^3), C_p 为定压比热($1012 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$), g_a 为边界层阻力($\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$),VPD 为水汽压差(KPa), λ 为蒸发潜热(J/kg), γ 为干湿球常数(Pa/K), g_s 为气孔导度($\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)。式中各分量计算

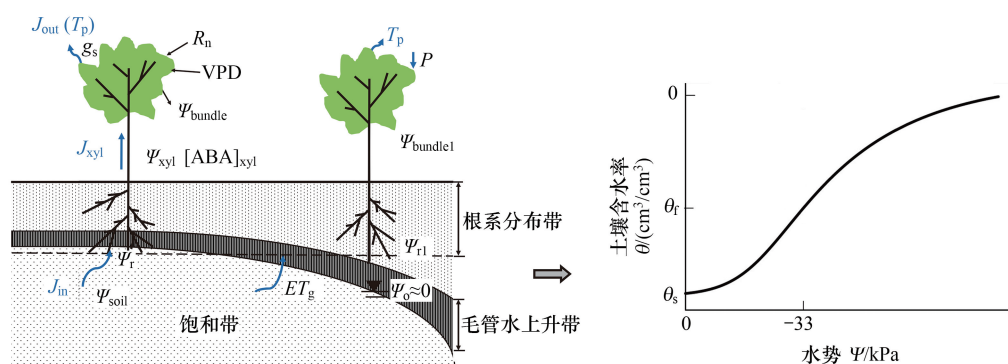


图1 依赖地下水的植物蒸腾过程及土壤水分剖面概化图

Fig.1 Transpiration of Phreatophytic Vegetation and soil water characteristic curve

J_{in} : 根系蒸腾流 Water flux entering into roots; J_{xyl} : 木质部水流 Water flux in the xylem; J_{out} : 叶片蒸腾流 Transpiration flux; ψ_{soil} : 土水势 Water potential in the rhizosphere; ψ_r : 根水势 Water potential in the root; ψ_{xyl} : 木质部水势 Water potential in the xylem; ψ_{bundle} : 叶片水势 Water potential in the bundle sheaths; $[ABA]_{xyl}$: 木质部 ABA 浓度 The amount of synthesized ABA in the xylem; VPD: 水汽压差 Air vapour pressure deficit; R_n : 净辐射强度 Net radiation; ET_g : 地下水蒸发 Groundwater evaporation; ψ_0 : 潜水位 Groundwater table; ψ_r : 根水势 Water potentials in the root; ψ_{bundle} : 叶片水势 Water potential in the bundle sheaths; θ : 含水率 Water content; Ψ : 水势 Water potential; P: 降水 Precipitation; T_p : 蒸腾 Transpiration

公式为:

$$g_s = g_{smin} + \alpha \exp [\beta [ABA]_{xyl} \exp (\delta \Psi_{bundle})] \quad (2)$$

$$[ABA]_{xyl} = -\frac{a \Psi_r}{J_{in} + b} \quad (3)$$

$$J_{in} = -\frac{\Psi_r - \Psi_{soil}}{R_{sp}} \quad (4)$$

$$R_{sp} = \frac{\ln \left(\frac{d^2}{r^2} \right)}{4\pi k(\Psi_{soil})} \quad (5)$$

式中, g_{smin} 为气孔导度最小值 ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); α , β 和 δ 为常数; $[ABA]_{xyl}$ 为木质部 ABA 浓度 (pmol/m^3), Ψ_{bundle} 为叶片水势 (MPa), Ψ_r 为根水势 (MPa), J_{in} 为根系蒸腾流 (mg/s)。 a ($\mu\text{mol kg m}^{-3} \text{s}^{-1} \text{MPa}^{-1}$)、 b 为经验系数, 通过拟合根水势与木质部 ABA 浓度进行确定。 Ψ_{soil} 为土壤水势 (MPa), R_{sp} 为根土界面阻力 ($\text{MPa s}^{-1} \text{mm}^{-3}$); d 为相邻根系平均距离 (m), r 为根系半径 (m), $k(\Psi_{soil})$ 为某一水势下的导水率 (cm/d)。

将植物蒸腾流 J_{out} 转化为蒸腾耗水量 T_p (mm/s):

$$T_p = \frac{J_{out}}{S} \quad (6)$$

模型中主要参变量计算方法如下:

(1) 气象要素相关参数 (R_n , s , VPD, g_a):

净辐射强度 (R_n):

$$R_n = \frac{\text{PPFD}}{2} \quad (7)$$

式中, PPFD 为光照强度 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), $\text{PPFD} = 4.72 R$, R 为太阳辐射 (W/m^2)。

饱和水汽压对温度的斜率 (s):

$$s = -0.1849 T^2 + 1.005 T + 50.87 \quad (8)$$

式中, T 为摄氏温度($^{\circ}\text{C}$)。

水汽压差(VPD)^[40]:

$$\text{VPD} = 0.61078(1 - RH) \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right) \quad (9)$$

式中, RH 为相对湿度(Pa/Pa), 在没有实测资料时, 可根据比湿(g/g)、压强(P_a) 计算^[41]。

(2) 植物生理特征参数(g_{min} 、 d 、 r 、 Ψ_r 、 Ψ_{bundle}):

植物气孔导度(g_{min}) 一日内变化最小可达 0.01^[42], 因此 $g_{\text{min}} = 0.01$ 。 Ψ_r 依据土水势、根土界面阻力和根系蒸腾流进行计算。

相邻根系平均距离 d :

$$d = \frac{1}{\sqrt{\pi} \times L_v} \quad (10)$$

式中, L_v 为根长密度(m/m^3), 即单位体积土壤中的根系总长度。根水势(Ψ_r)、叶水势(Ψ_{bundle}) 为:

$$\Psi_r = \Psi_{\text{soil}} - R_{\text{sp}} \times J_{\text{in}} \quad (11)$$

$$\Psi_{\text{bundle}} = \Psi_{\text{soil}} - R_{\text{sp}} \times J_{\text{in}} - \frac{J_{\text{in}}}{G_r} \quad (12)$$

式中, G_r 为根土界面到木质部的水力导度($\text{mg MPa}^{-1} \text{s}^{-1}$), 计算公式为:

$$G_r = \frac{\cos\left(\text{time}_{\text{photo}} \times \frac{\pi}{12}\right)}{8} \times (\Psi_{\text{xy}l\text{max}} - \Psi_{\text{xy}l\text{min}}) \quad (13)$$

式中, $\text{time}_{\text{photo}}$ 为光周期(h), 一天中 PPFD 大于 $10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 的时段即为光周期长, $\Psi_{\text{xy}l\text{max}}$ 、 $\Psi_{\text{xy}l\text{min}}$ 分别为木质部最大、最小水势(MPa)。木质部根水势最小、最大采用 -0.45、0.05 MPa^[39,43]。

(3) 土壤水力参数($k(\Psi_{\text{soil}})$ 、 Ψ_{soil}):

土壤导水率($k(\Psi_{\text{soil}})$) 采用 Van Genuchten 模型(V-G)^[44]:

$$k(\Psi_{\text{soil}}) = k_s \left(\frac{1}{1 + (\alpha_v \times \Psi_{\text{soil}})^n} \right)^{\left(\frac{p-\frac{p}{n}}{n}\right)} \times \left(1 - \left(1 - \left(\frac{1}{1 + (\alpha_v \times \Psi_{\text{soil}})^n} \right)^{\left(1-\frac{1}{n}\right)} \right)^2 \right) \quad (14)$$

土水势(Ψ_{soil}) 计算公式为:

$$\Psi_{\text{soil}}(W) = \frac{(1 - W)^{\left(\frac{n}{n-1}\right)} \left(\frac{1}{n}\right)}{(\alpha_v \times W)^{\left(\frac{1}{n-1}\right)}} \quad (15)$$

式中, W 为土壤实际含水率(θ)与饱和含水率(θ_s)之比, 即 $W = \frac{\theta}{\theta_s}$ 。

采用 V-G 模型计算 θ :

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha_1 \times h)^n]^m} \quad (16)$$

式中, α_1 为与进气值相关的参数, h 为压力水头(cm), λ 为与土壤特性相关的形状系数, m 、 n 为土壤水分特征曲线的形状参数。

将式(7)——(16) 计算所得参数带入式(1)——(5), 最终依据式(6) 可计算出植物蒸腾水量。

2 气象数据及模型参数

甘肃省民勤县青土湖($38^{\circ}52'30''$ — $39^{\circ}7'30''$ N、 $103^{\circ}22'30''$ — $103^{\circ}37'30''$ E) 为典型大陆性干旱荒漠气候区, 以该区域的气象数据为背景, 采用全球陆地数据同化系统(GLDAS: Global Land Data Assimilation System) 2009—2018 年气象数据, 时段间隔 3 h, 空间分辨率为 0.25° (<http://www.sharerresearch.me/>)。气象要素包

括:太阳辐射(R)、温度(T)、比湿(q_e)、压强(P_a)。研究期内, GLDAS 数据库与中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)逐日数据相比, 得出两个数据太阳辐射、温度、水汽压差的决定系数(R^2)为 0.89、偏离率(bias)为 20%。

植物生长期(4月1日—9月30日)各气象要素多年平均日变化过程中(图2), 光照强度(PPFD)变化范围为 400—800 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 温度(T)变化范围为 9—30 $^{\circ}\text{C}$, 水汽压差(VPD)变化范围为 0.9—3.2 kPa, 最高值大都出现在 7、8 月份。

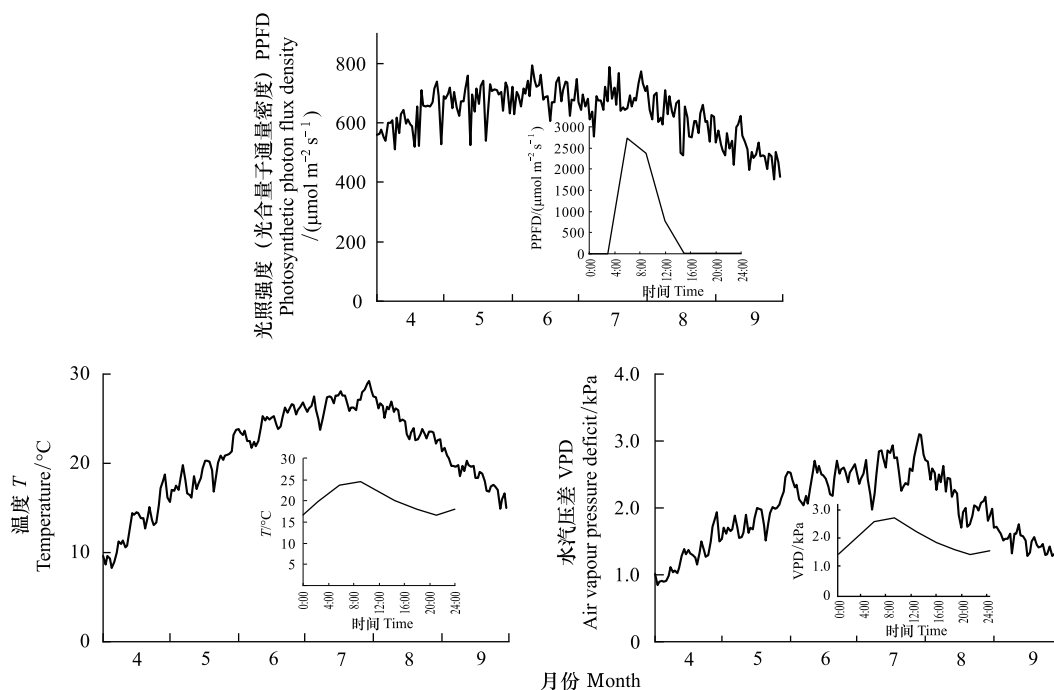


图2 PPFD、 T 、VPD 生长季逐日变化(小图为 5 月 19 日逐时变化)

Fig.2 Daily variations of PPFD, T , and VPD during growing season(The small figure shows hourly PPFD, T , and VPD on May 19)

根据前期研究结果^[38], 得出上述典型植物的适宜、极限生态地下水埋深, 以及根据土壤水分特征曲线(V-G 模型)确定的不同土壤类型和质地根系含水率(田间持水量的 70%和 67.5%), 即表 2 中土壤含水率(θ_1 、 θ_2)。参照国内外文献得出典型植物生理特征参数, 即植物根系半径(r)、根系密度(L_v)和 α 数据(表 2)。植物其它生理特征及耗水计算公式参数均采用统一值^[39](表 3)。

3 结果

3.1 植物蒸腾耗水量计算结果与验证

将研究区气象数据和模型参数输入 Tardieu-Davies 模型, 计算适宜、极限生态地下水埋深下 7 种典型植物生长期多年平均日蒸腾过程及生长季耗水量, 在适宜生态地下水埋深下生长季蒸腾耗水量介于 279—1292 mm, 平均为 793 mm; 极限生态地下水埋深下生长季耗水量为 130—1050 mm, 平均为 602 mm。

生长季内不同植物蒸腾耗水量存在较大差异。水生植物芦苇和河岸带植物柽柳的蒸腾量较大, 旱生植物梭梭蒸腾量最小, 盐节木、罗布麻、白刺和胡杨蒸腾量依次减少(表 4)。在适宜生态地下水埋深条件下, 生长季芦苇、柽柳的蒸腾量分别为 1292、1147 mm, 梭梭蒸腾量为 279 mm, 盐节木、罗布麻、白刺和胡杨蒸腾量分别为 940、913、534 mm 和 448 mm; 在极限生态地下水埋深下, 芦苇、柽柳的蒸腾量分别为 1050、999 mm, 梭梭蒸腾量为 130 mm, 盐节木、罗布麻、白刺和胡杨蒸腾量分别为 706、686、345 mm 和 298 mm。

绘制 7 种植物生长季蒸腾耗水量变化范围, 与表 1 文献中得出的内陆干旱区典型植物生长季耗水量统计

结果相比较。整体来看,Tardieu-Davies 模型计算得到的不同供水条件下植物生长季耗水量在现有研究成果的范围内,适宜、极限生态地下水埋深下本文模拟结果与已有研究成果的配对 t 检验, P 值分别为 0.12、0.94,均大于 0.05,即模拟值与已有文献成果的差异性不显著,说明本文模拟结果可靠。已有文献中植物蒸腾量来源于石羊河、塔里木河、黑河,存在气象条件、植物基径(树龄)差异,因此植物蒸腾量统计值变化范围大。

表 2 土壤水力特征和植物生理特征参数
Table 2 Soil hydraulic characteristics and plant physiological parameters

植物 Plant	V-G 模型参数 Parameters of V-G model				土壤含水量 Soil moisture		植物生理特征参数 Parameters of phytophysiology		
	$\theta_s/$ (cm^3/cm^3)	α_v	n	$K_s/$ (cm^3/d)	$\theta_1/$ (cm^3/cm^3)	$\theta_2/$ (cm^3/cm^3)	α	r/m	$L_v/(\text{m}/\text{m}^3)$
胡杨 <i>Populus euphratica</i>	0.57	0.018	3.61	335.2	0.13	0.09	0.45	0.0095	2491
白刺 <i>Nitraria tangutorum</i>	0.57	0.018	3.61	335.2	0.13	0.09	0.69	0.0003	636
柽柳 <i>Tamarix chinensis</i>	0.60	0.049	3.35	25.39	0.14	0.09	0.33	0.0013	400
罗布麻 <i>Poacynum hendersonii</i>	0.60	0.045	2.75	642.9	0.14	0.09	0.31	0.0001	7.8
梭梭 <i>Haloxylon ammodendron</i>	0.73	0.053	1.82	13.34	0.17	0.11	0.34	0.0005	221
盐节木 <i>Halocnemum strobilaceum</i>	0.60	0.045	2.75	642.9	0.14	0.09	0.33	0.0015	104
芦苇 <i>Phragmites australis</i>	0.59	0.075	2.51	328.2	0.13	0.09	0.41	0.0002	2.8

θ_s :饱和含水率 Saturated water content; α_v :土壤水力特征参数 Parameters of physical soil hydraulic; n :土壤水力特征参数 Parameters of physical soil hydraulic; K_s :饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity; θ_1 :70%田间持水量 70% of field capacity; θ_2 :67.5%田间持水量 67.5% of field capacity; α :经验系数 Empirical coefficient; r :根系半径 Root radius; L_v :根系密度 Root density

表 3 模型参数取值
Table 3 Values of model parameters

参数 Parameters	β	δ	g_a	g_{smin}	a	b	Ψ_{xylmax}	Ψ_{xylmin}
单位 Units	—	—	$\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	$\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	$\mu\text{mol kg m}^{-3}\text{s}^{-1}\text{MPa}^{-1}$	—	MPa	MPa
取值 Values	-0.003	-1.0	0.17	0.01	-600	4.0	-0.05	-0.45

β :经验系数 Empirical coefficient; δ :经验系数 Empirical coefficient; g_a :气孔边界层阻力 Stomatal boundary resistance; g_{smin} :气孔导度最小值 Minimum stomatal conductance; a :经验系数 Empirical coefficient; b :经验系数 Empirical coefficient; Ψ_{xylmax} :木质部最大水势 Maximum water potential of xylem; Ψ_{xylmin} :木质部最小水势 Minimum water potential of xylem;“—”表示无单位

3.2 生长季植物蒸腾耗水量变化特征

植物蒸腾耗水量变化如图 4,与光照和温度逐月变化(图 2)相似,呈现先增加后减少的变化形态,最大值、最小值分别出现在 7 月、4 月。在 7 月,适宜、极限生态地下水位埋深下蒸腾量平均值(表 5 中 T_{p1} 、 T_{p2})分别为 161、122 mm;远大于 4 月蒸腾耗水量,平均值分别为 99、74 mm。

在适宜生态地下水位埋深下,耗水量大的芦苇、柽柳 7 月蒸腾耗水量分别为 256、232 mm,4 月蒸腾耗水量的平均值分别为 166、142 mm;耗水量最小的梭梭 7 月蒸腾耗水量为 58 mm,4 月蒸腾耗水量为 34 mm。在极限生态地下水位埋深下,耗水量大的芦苇、柽柳 7 月蒸腾耗水量分别为 210、203 mm,4 月蒸腾耗水量的平均值分别为 133、123 mm;耗水量最小的梭梭 7 月蒸腾耗水量为 29 mm,4 月蒸腾耗水量为 14 mm。

日时间尺度上(图 4 中 5 月 19 日)蒸腾耗水量变化大。植物蒸腾耗水量变化趋势与光照和温度变化趋势相似:在光照和温度较大的时刻植物蒸腾耗水量多,光照和温度较小时植物蒸腾耗水量少。不同植物蒸腾耗

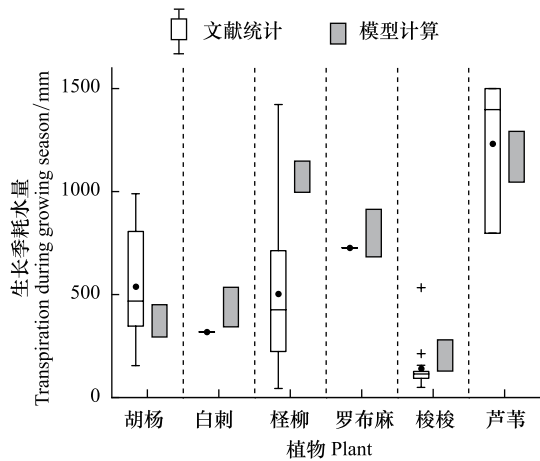


图 3 模型计算植物蒸腾耗水与已有成果对比
Fig.3 Comparison of plant transpirations between simulation results and existing statistical results

水量在日尺度上也存在极大的差异。以 5 月 19 日为例,适宜生态地下水埋深条件下,芦苇、柽柳的日蒸腾量分别为 7.1、6.3 mm,而梭梭日蒸腾量仅为 1.5 mm,其它植物如盐节木、罗布麻、白刺和胡杨蒸腾量分别为 5.1、5.0、2.9、2.5 mm;在极限生态地下水埋深下,芦苇、柽柳的蒸腾量分别为 5.7、5.5 mm,梭梭蒸腾量为 0.7 mm,盐节木、罗布麻、白刺和胡杨蒸腾量分别为 3.9、3.7、1.9 mm 和 1.6 mm。

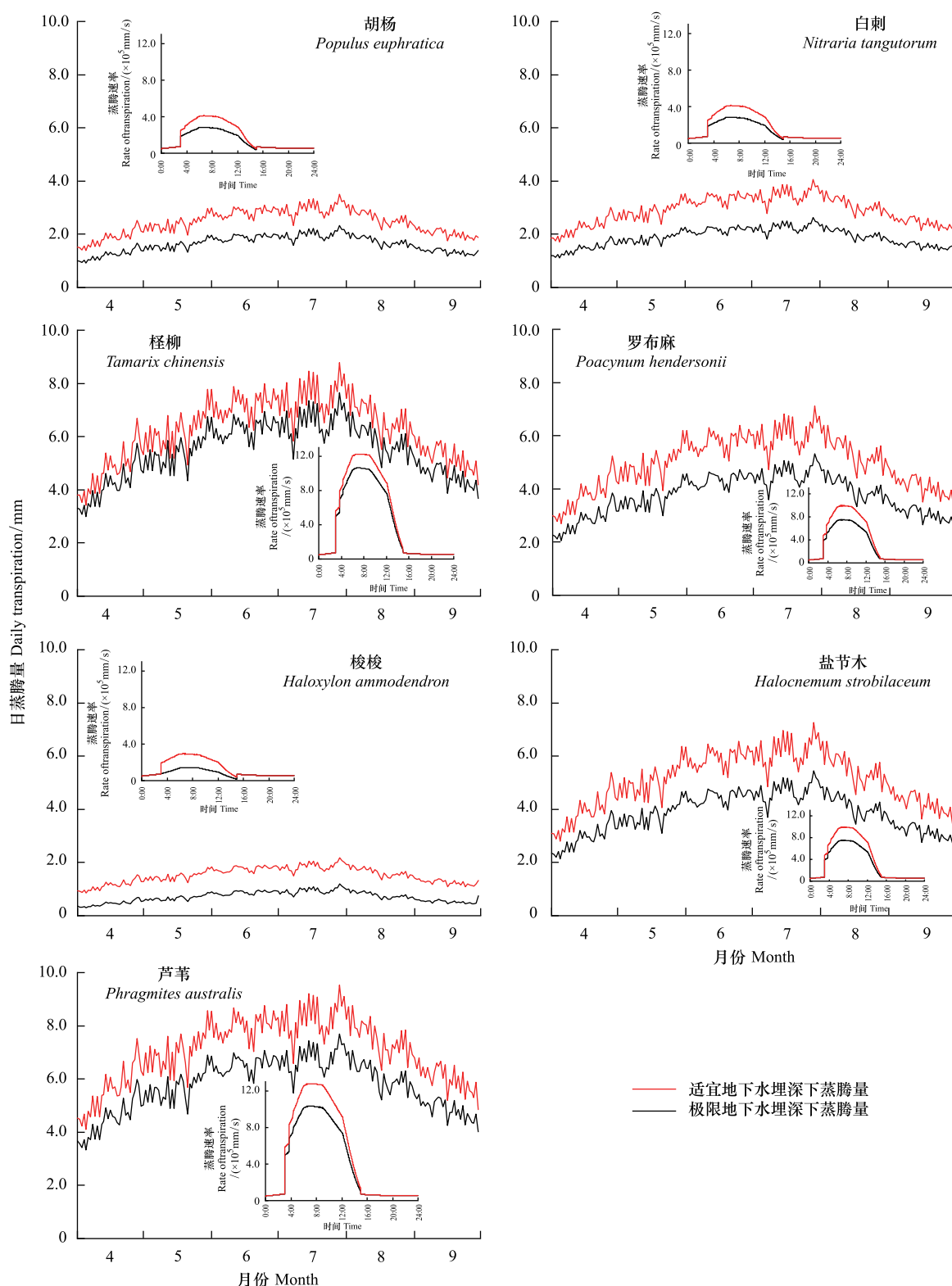


图 4 典型植物生长季逐日蒸腾量(小图为 5 月 19 日日时间尺度蒸腾耗水量变化过程)

Fig.4 Daily transpiration of typical plants during growing season (The small figure shows diurnal change of transpiration on May 19)

表 4 典型植物蒸腾量/mm
Table 4 Transpirations of typical plants

植物 Plant	适宜地下水埋深下蒸腾 T_{p1} Transpiration under suitable depth							总和 Sum
	4 月 Apr	5 月 May	6 月 Jun	7 月 Jul	8 月 Aug	9 月 Sep	平均 Mean	
胡杨 <i>Populus euphratica</i>	55	74	85	92	82	61	74	448
白刺 <i>Nitraria tangutorum</i>	67	88	100	108	97	74	89	534
柽柳 <i>Tamarix chinensis</i>	142	191	216	232	209	157	191	1147
罗布麻 <i>Poacynum hendersonii</i>	111	152	173	187	167	123	152	913
梭梭 <i>Haloxylon ammodendron</i>	34	46	53	58	51	38	47	279
盐节木 <i>Halocnemum strobilaceum</i>	115	156	178	192	172	127	157	940
芦苇 <i>Phragmites australis</i>	166	216	240	256	234	181	215	1292

植物 Plant	极限地下水埋深下蒸腾量 T_{p2} Transpiration under extinction depth							总和 Sum
	4 月 Apr	5 月 May	6 月 Jun	7 月 Jul	8 月 Aug	9 月 Sep	平均 Mean	
胡杨 <i>Populus euphratica</i>	37	49	56	61	55	41	49	298
白刺 <i>Nitraria tangutorum</i>	43	57	65	70	63	48	57	345
柽柳 <i>Tamarix chinensis</i>	123	166	189	203	182	136	166	999
罗布麻 <i>Poacynum hendersonii</i>	84	113	130	141	126	92	114	686
梭梭 <i>Haloxylon ammodendron</i>	14	21	26	29	24	16	22	130
盐节木 <i>Halocnemum strobilaceum</i>	86	117	134	145	129	95	118	706
芦苇 <i>Phragmites australis</i>	133	176	196	210	191	146	175	1050

表 5 适宜和极限生态地下水位埋深下植物蒸腾耗水量变化
Table 5 Change of transpiration when the groundwater depth from suitable to extinction depths

植物 Plant	变化量 Change/(mm; $T_{p1}-T_{p2}$)							总和 Sum
	4 月 Apr	5 月 May	6 月 Jun	7 月 Jul	8 月 Aug	9 月 Sep	平均 Mean	
胡杨 <i>Populus euphratica</i>	19	25	28	31	27	20	25	150
白刺 <i>Nitraria tangutorum</i>	24	31	35	38	34	26	32	189
柽柳 <i>Tamarix chinensis</i>	19	25	27	29	27	21	25	148
罗布麻 <i>Poacynum hendersonii</i>	28	38	43	46	42	31	38	227
梭梭 <i>Haloxylon ammodendron</i>	20	25	27	28	27	22	25	149
盐节木 <i>Halocnemum strobilaceum</i>	29	40	44	47	43	32	39	234
芦苇 <i>Phragmites australis</i>	32	41	44	47	43	35	40	242

植物 Plant	变化率 Rate of change/(% : $(T_{p1}-T_{p2})/T_{p1} \times 100\%$)							总和 Sum
	4 月 Apr	5 月 May	6 月 Jun	7 月 Jul	8 月 Aug	9 月 Sep	平均 Mean	
胡杨 <i>Populus euphratica</i>	34	34	33	33	33	33	34	33
白刺 <i>Nitraria tangutorum</i>	36	36	35	35	35	35	36	35
柽柳 <i>Tamarix chinensis</i>	14	13	13	13	13	13	13	13
罗布麻 <i>Poacynum hendersonii</i>	25	25	25	25	25	25	25	25
梭梭 <i>Haloxylon ammodendron</i>	60	55	51	49	52	58	53	53
盐节木 <i>Halocnemum strobilaceum</i>	25	25	25	24	25	25	25	25
芦苇 <i>Phragmites australis</i>	19	19	18	18	18	19	19	19

3.3 供水对植物蒸腾耗水量影响

随着地下水位埋深加大,荒漠植物根系所能利用的水分降低,植物可通过调节生理特征(如气孔导度)以

减少蒸腾耗水。对比适宜生态地下水埋深增大到极限生态地下水埋深下植物蒸腾耗水量(表5),7种植物月平均蒸腾耗水量减少13%—53%,平均减少29%。不同植物蒸腾量减少程度有所差异,耗水量大的植物蒸腾量减少较小,如怪柳减少量最小(13%),芦苇次之(19%);耗水量小的植物蒸腾量减少较大,如梭梭减少量最大(53%);白刺和胡杨次之(35、33%)。

4 讨论与结论

4.1 讨论

本文计算结果表明,不同植物在生长季内和日时间尺度上的蒸腾耗水量均存在显著差异性。芦苇和怪柳的蒸腾耗水量较大,梭梭、白刺和胡杨蒸腾耗水量小。这与不同类型植物根系分布及供水状态有关,植物根系影响水的利用效率以及植物耐旱性^[45-46]。芦苇通常生长在河湖湿地,对水依赖性强、消耗量大^[47]。胡杨、怪柳为河岸带植物,但两者耗水量差异明显^[11,48],胡杨根系延伸范围大(如最深可达地下7.0 m),对极端环境的忍耐力强,在有限水源条件下,会降低蒸腾耗水量以维持自身生长。梭梭和白刺耐旱性最强,耗水量最小^[24,27],这与本研究中白刺、梭梭生长季耗水量较小的结果一致。

当地下水位埋深增大时,植物蒸腾耗水减少,如从适宜增大至极限生态地下水位埋深,本文计算的植物蒸腾耗水量平均减少24%,且不同植物的减少量差异明显。说明当地下水位降低时,植物减少蒸腾耗水量以维持自身的生长^[13]。植物蒸腾量减少程度与植物水分利用效率有关,在干旱条件下耐旱性强的植物水分利用效率调节程度大,蒸腾耗水降低幅度大^[49]。Farid等^[15]采用液流计法对常年输水和间歇性输水河段胡杨蒸腾耗水量监测发现,胡杨在间歇性输水河段蒸腾耗水量(396 mm)较常年输水河段的(936 mm)减少57.8%;Dong^[24]对柴达木盆地不同供水条件下白刺的蒸腾量研究,得出当土壤含水量由16.8%降低为6.0%,白刺耗水量减少67%。但对水生植物芦苇而言,植物耗水量随水分条件和地下水位埋深变化不大,如Xu等^[50]通过监测不同降水年份芦苇耗水量,得出当降水量减少21%,芦苇耗水量无明显降低趋势。

植物在生长季内和日时间尺度上的蒸腾耗水量变化过程与气象因子的变化过程相似。植物蒸腾耗水量变化特征与Dang等^[51]采用液流计法得出的变化过程一致,气象因子对蒸腾耗水量变化的影响与Yu等^[52]运用涡度相关法分析结果一致,即植物蒸腾耗水量受光照强度、温度和水气压差的影响。

本文运用Tardieu-Davies模型计算的是特定供水条件下(适宜、极限生态地下水位埋深对应的根系水分状态)单株植物生长季蒸腾耗水量,即单位叶面积植物叶片蒸腾流(式(1)中 J_{out})。应用于区域荒漠植被实际蒸腾耗水量估算,还需要根据不同干旱区气象条件、水分状态和地下水埋深,并结合遥感等方法推求植物覆盖度,扩展式(1)计算功能,推求流域生态系统的蒸腾耗水总量。并可根据适宜、极限地下水位埋深下植被覆盖度等推求的蒸腾耗水量与实际地下水位埋深下植被状态及蒸腾耗水量之间的差值,探讨干旱区地下水位控制对覆被状态及生态耗水量的影响程度。

4.2 结论

本文选择我国西北内陆干旱区7种典型旱生植物,采用Tardieu-Davies模型计算不同地下水埋深(适宜和极限)以及不同植物生长季耗水量,分析其耗水量的差异及其成因,得出以下结论:

(1)建立的Tardieu-Davies模型综合考虑了气象条件(如光照、温度和水汽压差)、植被生理特征(如气孔导度)和水分状态(如根系层土壤含水率)对植物蒸腾耗水的影响。计算的典型旱生植物生长季蒸腾量与已有研究成果对应的植物蒸腾耗水量对比表明,Tardieu-Davies模型计算结果合理,体现出“SPAC”系统中不同植物蒸腾耗水及其对水分的适应性。

(2)在适宜、极限生态地下水埋深下7种植物生长季蒸腾量平均值分别为793、602 mm。不同植物耗水量差异大,芦苇生长季蒸腾量最大,梭梭的最小。适宜、极限生态地下水埋深下,生长季芦苇蒸腾量分别为1292、1050 mm,远大于梭梭的蒸腾量(分别为279、130 mm)。年内植物蒸腾量4月最小、7月最大。

(3)供水条件影响植物蒸腾耗水量,由适宜生态地下水位埋深增大为极限生态地下水位埋深时,植物生

长季耗水量平均减少 24%。耐旱性强的梭梭、白刺蒸腾量减幅大(53、35%),耐旱性弱的芦苇、怪柳蒸腾量减幅小(19、13%)。

参考文献(References):

- [1] 陈永金,陈亚宁,薛燕. 干旱区植物耗水量的研究与进展. 干旱区资源与环境, 2004, 18(6): 152-158.
- [2] 李广德,贾黎明,富丰珍. 不同方法测定三倍体毛白杨整树蒸腾的比较. 林业科技开发, 2014, 28(5): 41-44.
- [3] 刘奉觉,郑世楷,巨关升. 树木蒸腾耗水测算技术的比较研究. 林业科学, 1997, 33(2): 117-126.
- [4] Xia G M, Kang S Z, Li F S, Zhang J H, Zhou Q Y. Diurnal and seasonal variations of sap flow of *Caragana korshinskii* in the arid desert region of north-west China. Hydrological Processes, 2008, 22(8): 1197-1205.
- [5] Lecina S, Marti-nez-Cob A, Pérez P J, Villalobos F J, Baselga J J. Fixed versus variable bulk canopy resistance for reference evapotranspiration estimation using the Penman-Monteith equation under semiarid conditions. Agricultural Water Management, 2003, 60(3): 181-198.
- [6] 张经天,席海洋,王春林,李培都. 基于地下水位变化的荒漠河岸林蒸散估算. 高原气象, 2019, 38(1): 179-186.
- [7] 张小由,龚家栋,周茂先,司建华. 应用热脉冲技术对胡杨和怪柳树干液流的研究. 冰川冻土, 2003, 25(5): 585-590.
- [8] Keyimu M, Halik Ü, Kurban A. Estimation of water consumption of riparian forest in the lower reaches of Tarim River, northwest China. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(16): 547.
- [9] 徐先英. 石羊河下游绿洲—荒漠过渡带典型固沙植被生态水文效应研究[D]. 北京:北京林业大学, 2008.
- [10] 袁国富,罗毅,邵明安,张佩,朱绪超. 塔里木河下游荒漠河岸林蒸散规律及其关键控制机制. 中国科学:地球科学, 2015, 45(5): 695-706.
- [11] Nagler P L, Cleverly J, Glenn E, Lampkin, D, Huete A, Wan Z M. Predicting riparian evapotranspiration from MODIS vegetation indices and meteorological data. Remote Sensing of Environment, 2005, 94(1): 17-30.
- [12] Flanagan L B, Orchard T E, Logie G S J, Coburn C A, Rood S B. Water use in a riparian cottonwood ecosystem: eddy covariance measurements and scaling along a river corridor. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 232: 332-348.
- [13] Gazal R M, Scott R L, Goodrich D C, Williams D G. Controls on transpiration in a semiarid riparian cottonwood forest. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 137(1-2): 56-67.
- [14] Sun G, Alstad K, Chen J Q, Chen S P, Ford C R, Lin G H, Liu C F, Lu N, McNulty S G, Miao H X, Noormets A, Vose J M, Wilske B, Zeppel M, Zhang Y, Zhang Z Q. A general predictive model for estimating monthly ecosystem evapotranspiration. Ecohydrology, 2011, 4(2): 245-255.
- [15] Farid A, Goodrich D C, Bryant R, Sorooshian S. Using airborne lidar to predict Leaf Area Index in cottonwood trees and refine riparian water-use estimates. Journal of Arid Environments, 2008, 72(1): 1-15.
- [16] Thevs N, Ovezmuradov K, Zanjani L V, Zerbe S. Water consumption of agriculture and natural ecosystems at the Amu Darya in Lebap Province, Turkmenistan. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(2): 731-741.
- [17] 张小由,康尔泗,司建华,周茅先. 额济纳绿洲中怪柳耗水规律的研究. 干旱区资源与环境, 2006, 20(3): 159-162.
- [18] 赵爱芬,赵雪,陈怀顺,杜明武,李启森,常学向. 黑河中游人工绿洲防护体系植物耗水分析. 水土保持学报, 2004, 18(6): 148-151.
- [19] Dennison P E, Nagler P L, Hultine K R, Glenn E P, Ehleringer J R. Remote monitoring of tamarisk defoliation and evapotranspiration following saltcedar leaf beetle attack. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(7): 1462-1472.
- [20] Hultine K R, Nagler P L, Morino K, Bush S E, Burtch K G, Dennison P E, Glenn E P, Ehleringer J R. Sap flux-scaled transpiration by tamarisk (*Tamarix* spp.) before, during and after episodic defoliation by the saltcedar leaf beetle (*Diorhabda carinulata*). Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(11): 1467-1475.
- [21] Nagler P L, Glenn E P, Didan K, Osterberg J, Jordan F, Cunningham J. Wide-area estimates of stand structure and water use of *Tamarix* spp. on the lower colorado river: implications for restoration and water management projects. Restoration Ecology, 2008, 16(1): 136-145.
- [22] Owens M K, Moore G W. Saltcedar water use: realistic and unrealistic expectations. Rangeland Ecology and Management, 2007, 60(5): 553-557.
- [23] Sala A, Smith S D, Devitt D A. Water use by *Tamarix Ramosissima* and associated phreatophytes in a mojave desert floodplain. Ecological Applications, 1996, 6(3): 888-898.
- [24] 董梅. 柴达木地区主要树种抗旱耐盐生理研究[D]. 北京:北京林业大学, 2013.
- [25] Wang P, Niu G Y, Fang Y H, Wu R J, Yu J J, Yuan G F, Pozdniakov S P, Scott R L. Implementing dynamic root optimization in Noah-MP for simulating phreatophytic root water uptake. Water Resources Research, 2018, 54(3): 1560-1575.
- [26] 李妙伶,周宏飞,孙鹏飞. 准噶尔盆地南缘梭梭树干液流规律比较. 干旱区研究, 2012, 29(1): 101-108.
- [27] 何炎红. 乌兰布和沙漠植被与水资源相互影响的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2006.

- [28] 常学向, 赵文智, 张智慧. 荒漠区固沙植物梭梭(*Haloxylon ammodendron*)耗水特征. 生态学报, 2007, 27(5): 1826-1837.
- [29] 曹晓明, 陈曦, 王卷乐, 王权, 王珊珊. 古尔班通古特沙漠南缘非灌溉条件下梭梭(*Haloxylon ammodendron*)蒸腾耗水特征. 干旱区地理, 2013, 36(2): 292-302.
- [30] 褚建民. 干旱区植物的水分选择性利用研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2007.
- [31] 褚润, 陈年来, 王巧芳. 西北干旱、半干旱地区高盐人工湿地适宜植物筛选. 湿地科学, 2018, 16(2): 204-212.
- [32] 冉新军, 沈利, 李新虎. 博斯腾湖沼泽芦苇需水规律研究. 水资源与水工程学报, 2010, 21(3): 66-69.
- [33] 邓红章. 基于 MODIS 的格尔木地区蒸散量研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.
- [34] 高冠龙, 冯起, 刘贤德, 李伟. 三种经验模型模拟荒漠河岸怪柳叶片气孔导度. 生态学报, 2020, 40(10): 3486-3494.
- [35] Jarvis P G. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences, 1976, 273(927): 593-610.
- [36] Ball J T, Woodrow I E, Berry J A. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions//Biggins J. Progress in Photosynthesis Research. Dordrecht: Springer, 1987: 221-224.
- [37] Dewar R C. The Ball-Berry-Leuning and Tardieu-Davies stomatal models: synthesis and extension within a spatially aggregated picture of guard cell function. Plant, Cell & Environment, 2002, 25(11): 1383-1398.
- [38] 张阳阳, 陈喜, 高满, 刘秀强. 基于元数据分析的西北干旱区生态地下水埋深及其影响因素. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(5): 57-65.
- [39] Tardieu F, Simonneau T, Parent B. Modelling the coordination of the controls of stomatal aperture, transpiration, leaf growth, and abscisic acid: update and extension of the Tardieu-Davies model. Journal of Experimental Botany, 2015, 66(8): 2227-2237.
- [40] Ghanem M E, Kehel Z, Marrou H, Sinclair T R. Seasonal and climatic variation of weighted VPD for transpiration estimation. European Journal of Agronomy, 2020, 113: 125966.
- [41] Sahin S. An aridity index defined by precipitation and specific humidity. Journal of Hydrology, 2012, 444-445: 199-208.
- [42] Klein T. The variability of stomatal sensitivity to leaf water potential across tree species indicates a continuum between isohydric and anisohydric behaviours. Functional Ecology, 2014, 28(6): 1313-1320.
- [43] 安锋, 蔡靖, 姜在民, 张远迎, 赵平娟, 张硕新. 8 种木本植物木质部栓塞变化与生理生态指标间关系的研究(II)——与光合生理生态指标的关系. 西北林学院学报, 2006, 21(1): 37-42.
- [44] Van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898.
- [45] Maxwell R M, Condon L E. Connections between groundwater flow and transpiration partitioning. Science, 2016, 353(6297): 377-380.
- [46] Naumburg E, Mata-Gonzalez R, Hunter R G, McIendon T, Martin D W. Phreatophytic vegetation and groundwater fluctuations: a review of current research and application of ecosystem response modeling with an emphasis on great basin vegetation. Environmental Management, 2005, 35(6): 726-740.
- [47] Moro M J, Domingo F, López G. Seasonal transpiration pattern of *Phragmites australis* in a wetland of semi-arid Spain. Hydrological Processes, 2004, 18(2): 213-227.
- [48] Irmak S, Kabenge I, Rudnick D, Knezevic S, Woodward D, Moravek M. Evapotranspiration crop coefficients for mixed riparian plant community and transpiration crop coefficients for Common reed, Cottonwood and Peach-leaf willow in the Platte River Basin, Nebraska-USA. Journal of Hydrology, 2013, 481: 177-190.
- [49] Nagler P, Jetton A, Fleming J, Didan K, Glenn E, Erker J, Morino K, Milliken J, Gloss S. Evapotranspiration in a cottonwood (*Populus fremontii*) restoration plantation estimated by sap flow and remote sensing methods. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 144(1-2): 95-110.
- [50] Xu S G, Ma T, Liu Y. Application of a multi-cylinder evapotranspirometer method for evapotranspiration measurements in wetlands. Aquatic Botany, 2011, 95(1): 45-50.
- [51] Dang H Z, Zha T S, Zhang J S, Li W, Liu S Z. Radial profile of sap flow velocity in mature Xinjiang poplar (*Populus alba* L. var. *pyramidalis*) in Northwest China. Journal of Arid Land, 2014, 6(5): 612-627.
- [52] Yu T F, Qi F, Si J H, Si J H, Zhang X Y, Zhao C Y. *Tamarix ramosissima* stand evapotranspiration and its association with hydroclimatic factors in an arid region in northwest China. Journal of Arid Environments, 2017, 138: 18-26.