

DOI:10.12403/j.1001-1498.20220501

华北土石山区荆条潜在蒸散量及作物系数分析

蒋丽娅^{1,3}, 张家兴^{1,3}, 程向芬^{2,3}, 高峻^{2,3}, 桑玉强^{1,3*}, 张劲松^{2,3}

(1. 河南农业大学林学院, 河南 郑州 450002; 2. 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业和草原局林木培育重点实验室, 北京 100091; 3. 河南黄河小浪底地球关键带国家野外科学观测研究站, 河南 济源 459000)

摘要: [目的] 研究荆条灌丛的潜在蒸散量及作物系数变化趋势, 为半干旱区水资源管理及植被建设提供依据。

[方法] 利用河南黄河小浪底地球关键带国家野外观测站 2021 年 5—10 月份的蒸渗仪数据、逐日气象数据、荆条叶面积指数 (LAI) 及新梢生长量数据, 利用 Penman-Monteith 公式计算参考作物蒸散量 (ET_0), 分析生长状况基本一致、水分充足条件下的荆条不同生育期的潜在蒸散量、作物系数的变化趋势及其与生长指标的关系。[结果] (1) 在荆条生育期内, ET_0 值整体呈下降趋势, 5、6 月份较高, 7 月份后开始下降, ET_0 总值为 630.86 mm, 日均值为 $3.43 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 。(2) 荆条生育期内荆条灌丛的潜在蒸散量呈抛物线式变化, 表现为开花期最大, 总值为 $336.26 \pm 18.19 \text{ mm}$, 日均值为 $5.51 \pm 0.30 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$; 结果期和展叶期次之, 落叶期最小, 总值为 $41.57 \pm 3.61 \text{ mm}$, 日均值为 $1.98 \pm 0.17 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$; 整个生育期的总值为 $716.47 \pm 40.21 \text{ mm}$, 日均值为 $3.89 \pm 0.22 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 。(3) 荆条灌丛 LAI 和新梢生长量在 5、6 月增长较快, 之后变缓。其中 LAI 在 8 月达到最大值 (2.93 ± 0.07), 之后开始下降, 10 月降为最小值 (1.63 ± 0.08)。新梢在 5 月增长量最大, 为 $6.85 \pm 0.25 \text{ cm}$, 10 月基本停止生长。(4) 荆条作物系数在生育期内呈先增后降的变化趋势, 结果期最大 (1.45 ± 0.22), 开花期次之 (1.25 ± 0.13), 展叶期 (0.98 ± 0.05) 和落叶期 (0.95 ± 0.14) 最小, 整个生育期平均为 1.28 ± 0.16 。作物系数与叶面积指数呈极显著正相关 ($p < 0.01$), 决定系数 R^2 为 0.736, 与新梢生长量相关性不显著 ($p > 0.05$)。

关键词: 华北土石山区; 参考作物蒸散量; 荆条; 潜在蒸散量; 作物系数; 叶面积指数

中图分类号: S274.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2023)05-0050-10

蒸散 (Evapotranspiration, ET) 是植物蒸腾量与植株间土壤蒸发量之和, 是土壤-植物-大气系统 (Soil-Plant-Atmosphere-Continuum, SPAC) 中重要的水交换过程, 对植物的生长发育情况有重要影响, 是陆地水文循环的重要组成部分^[1]。在全球气候变化的背景下, 深入了解蒸散过程对天气预报、干旱监测、区域水资源管理及全球气候变化等研究具有重要意义^[2]。目前测定蒸散的方法较多, 主要有波文比能量平衡法、遥感法、液流法、涡度相关法和作物系数法等^[3-7], 其中联合国粮农组织

(Food and Agriculture Organization, FAO) 推荐采用作物系数法来估算不同类型生态系统蒸散量^[8], 并得到了广泛应用。作物系数 (Crop coefficient, Kc) 指水分充足条件下植物的实际蒸散量 (潜在蒸散量) 与参考蒸散量的比值, 是计算植物蒸散量和确定不同时期灌水量的重要参数之一。李霞等^[9]通过建立作物系数估算模型计算得到了科尔沁地区草甸及沙丘试验区的植物蒸散量, 经过验证发现, 计算值与实测值有较好的对应关系; 李丰琇等^[10]利用双作物系数法估算并区分了新疆

收稿日期: 2022-10-25 修回日期: 2022-12-04

基金项目: 中国林业科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (CAFYBB2020SY001)

* 通讯作者: 桑玉强, 副教授, 博士。研究方向: 森林水文。E-mail: syuqiang@163.com

阿克苏地区局部覆膜滴灌条件下干旱区夏玉米生育期内蒸散量; Drechsler 等^[11]得到了美国加利福尼亚州杏园的作物系数,为计算该地的植物需水量奠定基础; Qiu 等^[12]利用改进的作物系数模型合理预测了水稻-冬小麦轮作系统的蒸散量。叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)是植物的主要生长指标之一,对植物蒸散起着十分重要的作用。王贺垒等^[13]发现华北地区茄子的作物系数与叶面积指数呈线性关系;李哲等^[14]研究发现陕北山地苹果叶面积指数与作物系数有较好的指数回归关系,并建立了蒸散量估算模型;Eliades 等^[15]利用叶面积指数构建了油桃作物系数模型,提高了灌溉效率。

当前对植物蒸散及作物系数的研究大都集中在农作物^[16-18]及果蔬^[19-22]方面,关于灌木的研究相对较少,且研究区域大多集中在西北干旱地区^[23-24],华北地区相对较少^[25-26]。华北土石山区是华北平原重要的生态安全屏障,其南端紧邻黄河,在黄河流域生态保护和高质量发展中发挥着重要作用。荆条(*Vitex negundo* L. var. *heterophylla* (Franch.) Rehd.)是华北土石山区的乡土树种,也是该地的优势灌木,在当地的植被建设中占有重要地位。本文以华北土石山区荆条灌丛为对象,利用2021年荆条生育期内的蒸渗仪数据、逐日气象数据、叶面积指数及新梢生长量数据,分析荆条各生育期潜在蒸散量与作物系数变化趋势,以期为当地的山区流域水资源管理和植被修复提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于河南省济源市境内的河南黄河小浪底地球关键带国家野外科学观测研究站(35°01'45" N, 112°28'08" E),地处华北土石山区的太行山南麓,是典型的低山丘陵区。海拔400 m左右,属暖温带大陆性季风气候,主要植被类型为暖温带落叶阔叶林及针阔混交林等。土壤母质多为石灰岩,风化淋溶后形成褐土,土层厚度50~80 cm,石砾含量10%~18%^[27],全年平均日照时数为2 368 h,0℃以上年均有效积温为5 282℃,年均气温12.4~14.3℃。年均降水量641.7 mm,降水季节分配不均,6—8月平均降水量438.0 mm,占全年降水量68.3%,年均蒸发量1 611.2 mm。

本文所需要的数据主要包括气象数据、蒸渗仪

数据、荆条叶面积指数及新梢生长量数据,计算指标主要包括参考作物蒸散量及作物系数。

1.2 数据来源及计算

1.2.1 潜在蒸散量 荆条的潜在蒸散量由蒸渗仪直接获取,试验采用3台长×宽×高为3 m×3 m×3 m的大型称重式蒸渗仪测量2021年土壤水分充足条件下荆条生育期内(5月1日—10月31日)潜在蒸散量。蒸渗仪型号为QYZS-201(中国,西安清远测控技术有限公司),测量精度为0.015 mm。每台蒸渗仪内均匀种植4株生长基本一致的荆条,种植密度约为4 444株·hm⁻²,荆条树龄为10 a,每1 h获取一组数据。蒸渗仪内埋有AV-EC5土壤水分探头(美国,AVALON公司),精度±3%,数据采集器为RR-2016(中国,北京雨根科技公司),采集和存储时间间隔30 min,可监测观测期内蒸渗仪内土壤水分变化。试验期间保持蒸渗仪内的荆条一直处于水分充足状态,即平均土壤含水量保持在田间持水量的75%以上,其中,田间持水量为28%。当平均土壤含水量低于田间持水量的75%时,对蒸渗仪进行灌水处理,使土壤含水量提高。

1.2.2 气象数据 在蒸渗仪南侧20 m处,建有地面标准气象站,其中的气象监测设备均由美国AVALON公司生产,主要包括AV-10TH空气温湿度传感器、AV-30WS风速计、AV-30WD风向传感器、AV-3665R翻斗式雨量计、AV-410BP大气压力计、AV-10T温度传感器等,可持续测量试验期间(5月1日—10月31日)的风速、风向、降雨、大气压强、气温、相对湿度及日照时数等气象数据,所有传感器均与CR1000型数据采集器(美国,Campbell公司)相连,每10 min可采集并存储一组数据。

1.2.3 叶面积指数及新梢生长量 荆条叶面积指数用LAI-2200冠层分析仪(美国,LICOR公司)测量,在荆条生育期内选择早上日出前或傍晚太阳落山后或阴天对蒸渗仪内的荆条进行测量,每个测量3个重复,测量间隔为15 d。在每株荆条上选取一个新梢,用钢卷尺测量新梢长度并计算新梢生长量,每15 d左右测量一次,直至试验结束。

叶面积指数及新梢生长量的测量起始时间均为2021年5月1日,结束时间为当年的10月31日。

1.2.4 参考作物蒸散量 参考作物蒸散量 (Reference crop evapotranspiration, ET_0) 为“假设植物高度为 0.12 m, 冠层阻力为 $70 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$, 反照率为 0.23 的参考冠层的蒸散量, 相当于生长旺盛、长势一致、完全覆盖地面且水分供应充足的开阔绿色草地的蒸散量”。FAO 推荐使用 Penman-Monteith 方法作为计算 ET_0 的标准方法^[8], 具体公式为:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

式中, R_n 为作物表面净辐射/ $(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1})$; G 为土壤热通量/ $(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1})$; T 为日均气温/ $^{\circ}\text{C}$; U_2 为距离地面 2 m 高处的风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$; e_s 为日饱和水汽压/ kPa ; e_a 为实际水汽压/ kPa ; Δ 为温度—饱和水汽压关系曲线在温度 T 处的切线斜率/ $(\text{kPa}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$; γ 为湿度计常数/ $(\text{kPa}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$, $\gamma=0.66$ 。以上各参数计算公式如下^[8]:

(1) 作物表面净辐射量 R_n

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (2)$$

其中 R_{ns} 为净短波辐射, R_{nl} 为净长波辐射, R_{ns} 计算公式如下:

$$R_{ns} = R_s - R_r = (1 - \alpha) \times \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a \quad (3)$$

设地面接收到的日短波太阳辐射为 R_s , R_s 计算公式如下:

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a \quad (4)$$

设反射太阳辐射为 R_r , R_r 计算公式如下:

$$R_r = \alpha \times R_s \quad (5)$$

设净空太阳总辐射为 R_a , R_a 计算公式如下:

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [(w_s) \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) (\sin(w_s))] \quad (6)$$

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi J}{365}\right) \quad (7)$$

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi J}{365} - 1.39\right) \quad (8)$$

$$w_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad (9)$$

$$N = \frac{24}{\pi} w_s \quad (10)$$

设净空短波太阳辐射为 R_{s0} , R_{s0} 计算公式如下:

$$R_{s0} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} \times z) R_a \quad (11)$$

设净长波太阳辐射为 R_{nl} , R_{nl} 计算公式如下:

$$R_{nl} = \sigma \times \left[\frac{T^4_{\max} + k + T^4_{\min} + k}{2} \right] \times (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \times \left(1.35 \times \frac{R_s}{R_{s0}} - 0.35 \right) \quad (12)$$

以上公式中: R_a 为净空太阳总辐射, $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$; R_s 为地面接收到的日短波太阳辐射, $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$; R_{s0} 为净空短波太阳辐射, $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$; R_r 为反射太阳辐射, $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$; R_{ns} 为净短波太阳辐射, $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$; R_{nl} 为净长波太阳辐射, $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$; R_n 为作物表面净辐射, $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$; G_{sc} 为太阳常数, $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$, $G_{sc}=0.0820$; d_r 为日地相对距离; δ 为太阳磁偏角; φ 为纬度; W_s 为日落时的角度; J 为年内天数; n 为实测日照时数, h ; N 为最大天文日照时数, h ; z 为地面海拔高程, m ; α 为反射系数, FAO 推荐值为 $\alpha=0.23$; $T_{\max, K}$ 为日最高绝对温度, ($T_{\max, K}=T_{\max} + 273.16 \text{ }^{\circ}\text{C}$); $T_{\min, K}$ 为日最低绝对温度, ($T_{\min, K}=T_{\min} + 273.16 \text{ }^{\circ}\text{C}$); σ 为 Stefan-Boltzmann 常数, $\sigma=4.903 \times 10^{-9} \text{ MJ}\cdot\text{K}^{-4}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$; e_a 为实际水汽压/ kPa ; a_s 与 b_s 为 Angstrom 系数, a_s 为全阴天辐射系数, a_s 与 b_s 是晴空辐射系数, a_s 与 b_s 分别取值为: $a_s=0.25$, $b_s=0.50$ ^[8]。

(2) 土壤热通量 G

$$G = 0.05 \times R_n \quad (13)$$

(3) 日均气温 T

$$T = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \quad (14)$$

(4) 距离地面 2 m 高处风速 U_2

$$U_2 = \frac{u_z \times 4.87}{\ln(67.8 \times z - 5.42)} \quad (15)$$

(5) 饱和水汽压 e_s

$$e_s = \frac{e_0(T_{\max}) + e_0(T_{\min})}{2} \quad (16)$$

其中

$$e_0(T_{\max}) = 0.6108 \times \exp\left[\frac{17.27 \times T_{\max}}{T_{\max} + 237.3}\right] \quad (17)$$

$$e_0(T_{\min}) = 0.6108 \times \exp\left[\frac{17.27 \times T_{\min}}{T_{\min} + 237.3}\right] \quad (18)$$

(6) 实际水汽压 e_a

$$e_a = \frac{e_s \times RH_{\text{mean}}}{100} \quad (19)$$

(7) 温度—饱和水汽压关系曲线在温度 T 处的切线斜率 Δ

$$\Delta = \frac{4\,098 \left[0.610\,8 \times \text{EXP} \left[\frac{17.27T}{T + 237.3} \right] \right]}{(T + 237.3) \times (T + 237.3)} \quad (20)$$

(8) 湿度计常数 γ

$$\gamma = \frac{c_p \times P}{\varepsilon \times \lambda} = 0.001\,63 \times \frac{P}{\lambda} \quad (21)$$

公式中: e_0 为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的饱和水汽压, $e_0=6.1 \times 103\text{ kPa}$; RH_{mean} 为平均相对湿度/%; C_p 为空气的定压比热, $C_p=1.103 \times 10^{-3}\text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$; ε 为水汽与干空气分子比重, 数值约为 0.622 ; P 为实际气压/kPa; λ 为水的气化潜热, $\lambda=2.501-(2.361 \times 10^{-3})T$; U_z 为距离地面 z 米高处风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$; z 为距离地面高度/m。

1.2.5 作物系数 FAO 中规定了计算作物系数 K_c 的具体公式^[8]:

$$K_c = \frac{ET}{ET_0} \quad (22)$$

式中, ET 为潜在蒸散量/ $(\text{mm}\cdot\text{d}^{-1})$; ET_0 为参考作物蒸散量/ $(\text{mm}\cdot\text{d}^{-1})$ 。

1.3 荆条生育期的划分

联合国粮农组织根据植物的生长发育状况, 将植物生长发育过程统一划分为 4 个时期: 初始生长期、快速生长期、发育中期和发育后期^[8]。基于对华北土石山区荆条灌丛的实地调查, 将荆条生育期

划分为: 5月1日—5月20日(展叶期)、5月21日—7月20日(开花期)、7月21日—10月10日(结果期)、10月11日—10月31日(落叶期)。

1.4 数据处理

运用 Excel 2021 软件分析气象数据、荆条潜在蒸散量、作物系数、叶面积指数及新梢生长量, 并用插补法对异常值进行处理, 用 SPSS 25 软件对作物系数与叶面积指数和新梢生长量进行双变量相关性分析 (**为 $P < 0.01$, *为 $P < 0.05$), 运用 Origin 2018 软件对数据进行作图。

2 结果与分析

2.1 参考作物蒸散量变化

根据 2021 年 5 月 1 日至 10 月 31 日的逐日气象数据, 利用式 (1-21) 计算得到荆条生育期内的参考作物蒸散量 ET_0 (图 1)。荆条生育期内的 ET_0 值整体呈下降趋势, 5、6 月份较高, 7 月份后开始逐渐下降。实验期间 ET_0 总值为 630.86 mm , 日均值为 $3.43\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$, 最大值和最小值分别为 6 月 5 日的 $13.14\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 9 月 18 日的 $0.16\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 。降雨量与 ET_0 变化趋势相反, 5、6 月份降雨量较少, 7—9 月份则显著增加 (表 1)。最大降雨量出现在 7 月 20 日, 为 178.50 mm , 观测期降雨总量为 $1\,259.60\text{ mm}$ 。

2.2 荆条潜在蒸散量变化

图 2 为荆条生育期内潜在蒸散量日变化, 荆条潜在蒸散量整体呈抛物线式波动变化, 其中 5 月份

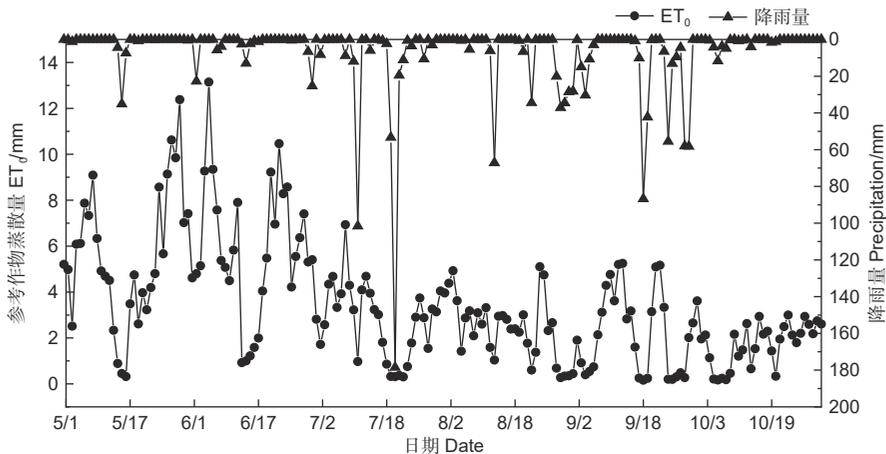


图 1 参考作物蒸散量及降雨量日变化

Fig. 1 Daily variation in reference crop evapotranspiration and precipitation

表1 研究区气象因子月变化

Table 1 Monthly changes of meteorological factors in the experiment area

月份 Month	月平均气温 Mean monthly temperature/°C	月净辐射 Monthly net radiance/(MJ·m ⁻²)	月平均相对湿度 Mean monthly relative humidity/%	月降雨量 Monthly precipitation/mm
5	22.18	394.74	48.55	49.40
6	27.36	385.08	55.12	84.20
7	26.51	399.53	80.06	419.80
8	24.99	347.90	80.31	241.10
9	22.05	269.09	81.43	432.20
10	15.17	168.63	68.37	32.90

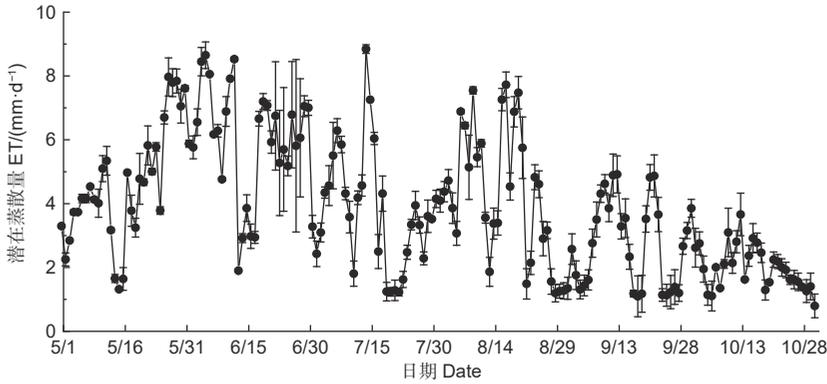


图2 荆条潜在蒸散量日变化

Fig. 2 Daily variation of potential evapotranspiration of *Vitex negundo* L. var. *heterophylla* (Franch.) Rehd.

较低且日际波动较小；之后逐渐升高，在6—8月份较高且日际波动也较大；9月份后的数值及日际波动幅度均逐渐减小；最大值为7月14日的 $8.84 \pm 0.14 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ，最小值为10月31日的 $0.37 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

各生育期的潜在蒸散量见表2，变化显著。在开花期最大，总值为 $336.26 \pm 18.19 \text{ mm}$ ，日均值

为 $5.51 \pm 0.30 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ；其次为结果期，总值为 $266.78 \pm 23.27 \text{ mm}$ ，日均值为 $3.25 \pm 0.28 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ；然后是展叶期，对应数值为 $71.86 \pm 2.36 \text{ mm}$ 和 $3.59 \pm 0.12 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ；落叶期最小，对应数值分别为 $41.57 \pm 3.61 \text{ mm}$ 和 $1.98 \pm 0.17 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。在整个生育期，潜在蒸散量总值为 $716.47 \pm 40.21 \text{ mm}$ ，日均值为 $3.89 \pm 0.22 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

表2 荆条各生育期潜在蒸散量

Table 2 Potential evapotranspiration in different growth stages of *Vitex negundo* L. var. *heterophylla* (Franch.) Rehd.

生育期 Growth stage	展叶期 Leaf unfolding stage	开花期 Blossom stage	结果期 Fruiting stage	落叶期 Defoliation stage	全生育期 Whole growth stage
总值 Total value/mm	71.86 ± 2.36	336.26 ± 18.19	266.78 ± 23.27	41.57 ± 3.61	716.47 ± 40.21
日均值 Daily average/(mm·d ⁻¹)	3.59 ± 0.12	5.51 ± 0.30	3.25 ± 0.28	1.98 ± 0.17	3.89 ± 0.22

2.3 水分充足条件下的荆条生长发育变化

荆条生长发育状况主要表现在 LAI 和新梢生长量上。由表3可知，荆条5月份 LAI 较低，仅为 1.90 ± 0.07 ；随着生育期推进和气温升高，6月份的荆条叶片变大，数量增加，LAI 增长迅速；8月份达到最大值 2.93 ± 0.07 ，之后缓慢降低，10月

份降为最小值 1.63 ± 0.08 。

荆条的新梢生长量表现为5月份生长最快，大小为 $6.85 \pm 0.25 \text{ cm}$ ，说明5月为荆条快速生长阶段，主要表现为营养生长。从5月中下旬开始，荆条进入花期，营养生长变缓，逐渐进入生殖生长阶段，直到9月份，荆条持续保持缓慢生长水平，进

表 3 荆条生理生长变化

Table 3 Physiological growth changes of *Vitex negundo* L. var. *heterophylla* (Franch.) Rehd.

月份 Month	5	6	7	8	9	10
叶面积指数 LAI	1.90 ± 0.07	2.41 ± 0.08	2.69 ± 0.03	2.93 ± 0.07	2.39 ± 0.06	1.63 ± 0.08
新梢生长量 Growth of new shoot length/cm	6.85 ± 0.25	3.55 ± 0.23	0.34 ± 0.20	0.34 ± 0.07	0.32 ± 0.10	0.003 ± 0.001

入稳定阶段。10 月份新梢基本停止生长, 增长量仅有 0.003 ± 0.001 cm。

2.4 荆条作物系数变化及其与生理生长指标的关系

根据参考作物蒸散量 ET_0 和荆条潜在蒸散量 ET 及式 (22), 计算得到荆条作物系数 K_c (图 3), 可知其在生育期内呈先增后降的变化趋势, 最大值为 8 月 17 日的 3.23 ± 0.17 , 最小值为 10 月 31 日的 0.30 ± 0.14 。整个生育期内的变化表现为

在展叶期较低, 之后逐渐增大到结果期的最大值, 之后逐渐下降并在落叶期最小。 K_c 的数值在整个生育期内平均为 1.28 ± 0.16 , 在展叶期为 0.98 ± 0.05 (0.45~1.70), 开花期为 1.25 ± 0.13 (0.63~2.32), 结果期为 1.45 ± 0.22 (0.94~3.23), 落叶期为 0.95 ± 0.14 (0.30~1.54)。

有研究认为植物生理生长指标与 K_c 有相关关系^[17, 28-31]。本文将 K_c 与 LAI 和新梢生长量进行相关分析并建立统计关系 (图 4), 图中 K_c 为 15

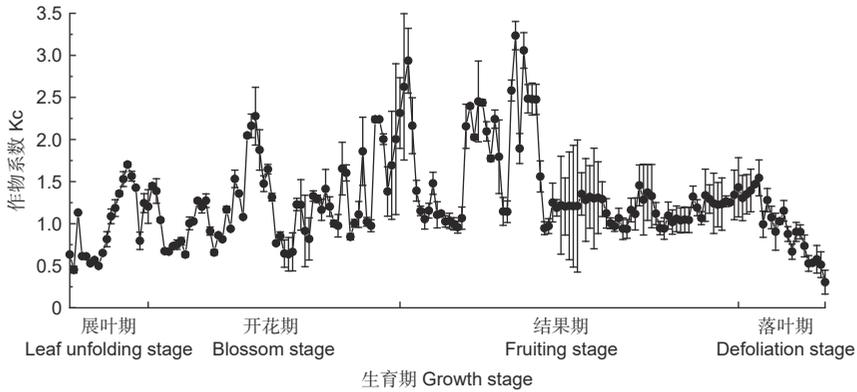
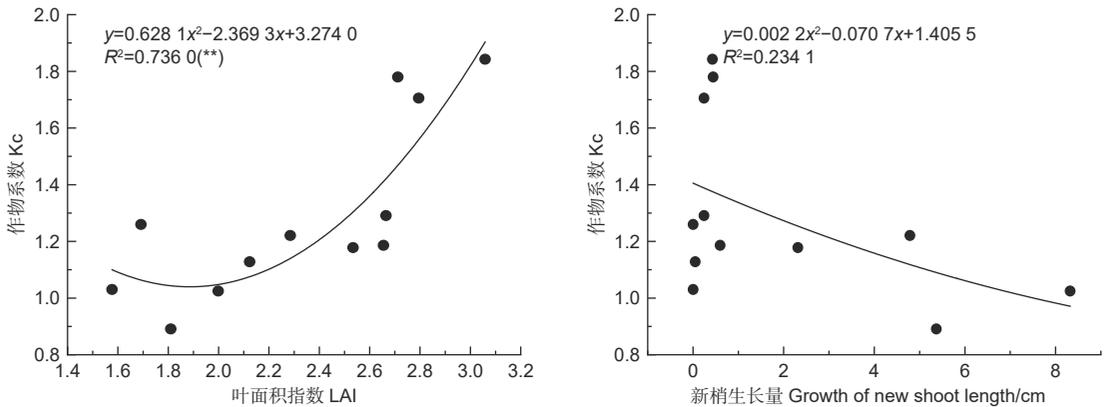


图 3 各生育期荆条作物系数变化

Fig. 3 Change of crop coefficient of *Vitex negundo* L. var. *heterophylla* (Franch.) Rehd. in different growth stages



注: **表示 $P < 0.01$ 水平显著

Note: ** mean significant differences among the values at 0.01 level

图 4 荆条作物系数与叶面积指数和新梢生长量的关系

Fig. 4 Relationship between crop coefficient and LAI and growth of new shoot length of *Vitex negundo* L. var. *heterophylla* (Franch.) Rehd.

d 平均值。可知, Kc 与 LAI 间呈极显著非线性正相关 ($p < 0.01$), 决定系数 R^2 为 0.736。Kc 与新梢生长量相关性不显著 ($p > 0.05$), 决定系数 R^2 为 0.234 1。Kc 与 LAI 的拟合关系优于新梢生长量, 因此可通过测量荆条的 LAI 来估算 Kc, 进而计算蒸散量。

3 讨论

ET_0 及潜在蒸散量的变化特征主要与气候环境和植物自身生长有关。前人^[32-35] 研究发现 ET_0 在试验期间呈下降趋势, 与本文结果较一致。主要原因在于该地春季降雨稀少 (表 1), 春旱现象较明显, 5 月 1 日至 6 月 30 日降雨量仅 133.60 mm, 占观测期间总降雨量的 10.61%, 导致相对湿度较低, 5、6 月份分别为 48.55% 和 55.12%; 且温度逐渐上升, 6 月达到了最高值 27.36 °C; 同时净辐射也逐渐增加, 5、6 月份分别为 394.74 $MJ \cdot m^{-2}$ 和 385.08 $MJ \cdot m^{-2}$, 因此植物蒸散过程强烈, 导致 ET_0 值较高。该地 7 月进入雨季, 7—9 月份降雨事件频发, 降雨量高达 1 093.10 mm, 占观测期间的 86.78%, 尤其 7 和 9 月份的降雨量分别为 419.80 和 432.20 mm。大量降雨及阴雨天气使相对湿度升高, 7—9 月份平均相对湿度均在 80% 以上, 导致温度和净辐射快速下降, 植物蒸散过程相应减弱, ET_0 值不断降低。不同时间的 ET_0 值大小略有差异主要与地域和气候环境有关。荆条生育期内的潜在蒸散量呈抛物线式变化, 与前人^[36-40] 研究结果相似, 主要是因为植物潜在蒸散量除受气象因子影响外, 还与自身生长发育有关^[41]。5 月份荆条刚开始生长, 叶片较小, 光合及蒸腾能力较弱, 潜在蒸散量较低; 6—8 月份荆条枝叶生长迅速, 且温度不断升高, 荆条生理活动强烈, 潜在蒸散量不断增加; 9 月份后, 荆条生长趋于稳定, 温度较 8 月份有所降低, 但降雨量比 8 月份增加了 191.10 mm, 导致土壤水分过大, 使得根区含氧量减少^[3], 抑制了植物生理作用, 加上荆条叶片逐渐脱落, 蒸腾作用不断下降, 导致潜在蒸散量不断降低。

大量研究表明 Kc 因植物种类、研究区域及环境不同而差异显著。胡永翔等^[29]、全国栋^[42]、Ding 等^[43] 发现黄土高原地区滴灌枣树、华北地区桃树、西北地区白菜的 Kc 均呈现先增后减的变化趋势, 与本文结果较为一致, 但不同生育期内

Kc 值大小略有差异, 主要与作物种类及当地气候环境有关。叶片可以显著影响植株蒸腾, 很多研究表明蒸散量受冠层 LAI 直接影响^[44]。Gong 等^[45] 对西北干旱地区苹果树、Testi 等^[46] 对西班牙橄榄树、王亚蕊等^[47] 对华北落叶松人工林的研究结果均表明蒸散量与 LAI 呈显著正相关。Kc 是潜在蒸散量与 ET_0 的比值, 因此 Kc 与 LAI 同样存在密切联系。Munitz 等^[48] 发现以色列中部山区葡萄园 Kc 与 LAI 呈显著线性关系, 胡永翔等^[29] 发现黄土高原滴灌枣树 Kc 与 LAI 存在显著的二次曲线关系。本研究发现, 荆条 Kc 与 LAI 存在极显著非线性正相关 ($p < 0.01$)。新梢生长量作为表征植物营养生长的指标, 受植物生长发育与气候因子的共同影响。陈秋帆等^[49] 发现用马铃薯植株高度计算 Kc 较为接近实测值; 但整体而言, 其对植物光合、蒸腾等生理作用的调控不如 LAI 直接, 进而表现为与 Kc 的相关性远不如 LAI。本研究表明, 可以利用相对容易获得的 LAI 及其与 Kc 的经验模型, 估算荆条的蒸散量, 从而为华北土石山区荆条灌丛的蒸散量预测、水资源管理等提供理论依据。

4 结论

荆条生育期内, ET_0 值整体呈下降趋势, 5、6 月份较高, 7 月份后开始逐渐下降; ET_0 总值为 630.86 mm, 日均值为 3.43 $mm \cdot d^{-1}$ 。荆条潜在蒸散量呈抛物线式变化, 开花期最大, 落叶期最小; 全生育期总值为 716.47 ± 40.21 mm, 日均值为 3.89 ± 0.22 $mm \cdot d^{-1}$ 。荆条潜在蒸散量受 ET_0 和荆条生育期共同作用。荆条 Kc 呈先增后降的变化趋势, 结果期最大, 落叶期最小, 全生育期平均值为 1.28 ± 0.16; 可利用 Kc 值与 LAI 的极显著非线性相关关系, 借助相对容易获取的 LAI 数据, 求算荆条蒸散量。

参考文献:

- [1] 于文颖, 纪瑞鹏, 贾庆宇, 等. 基于改进的双作物系数法估算辽河三角洲芦苇湿地蒸散量[J]. 生态学报, 2020, 40 (1): 325-335.
- [2] 张 功, 郑 宁, 张劲松, 等. 光闪烁法测算区域蒸散研究进展[J]. 生态学报, 2018, 38 (8): 2625-2635.
- [3] 全国栋. 北京平原区非充分灌溉下樱桃和桃树耗水规律及蒸散量估算研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
- [4] MARUYAMA T, ITO K, TAKIMOTO H. Abnormal data rejection range in the Bowen ratio and inverse analysis methods for es-

- timating evapotranspiration[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 269-270: 323-334.
- [5] WU J, LAKSHMI V, WANG D, *et al.* The reliability of global remote sensing evapotranspiration products over Amazon[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(14): 1-19.
- [6] SAITTA D, VANELLA D, RAMÍREZ-CUESTA J M, *et al.* Comparison of orange orchard evapotranspiration by eddy covariance, sap flow, and FAO-56 methods under different irrigation strategies[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2020, 146(7): 1-9.
- [7] 冯禹, 龚道枝, 王罕博, 等. 基于双作物系数的旱作玉米田蒸散估算与验证[J]. *中国农业气象*, 2017, 38(3): 141-149.
- [8] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, *et al.* Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56[J]. FAO, Rome, 1998, 300(9): D05109.
- [9] 李霞, 刘廷玺, 段利民, 等. 半干旱区沙丘、草甸作物系数模拟及蒸散发估算[J]. *干旱区研究*, 2020, 37(5): 1246-1255.
- [10] 李丰琇, 马英杰. 基于双作物系数法的新疆覆膜滴灌夏玉米蒸散量估算[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(11): 268-274.
- [11] KELLEY D, ALLAN F, ISAYA K. Crop coefficients and water use of young almond orchards[J]. *Irrigation Science*, 2022, 40(3): 379-395.
- [12] QIU R, LI L, LIU C, *et al.* Evapotranspiration estimation using a modified crop coefficient model in a rotated rice-winter wheat system[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 264: 107501.
- [13] 王贺垒, 李家曦, 范凤翠, 等. 华北地区设施茄子蒸散量估算模型及作物系数确定[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(12): 1819-1827.
- [14] 李哲, 费良军, 尹永乐, 等. 涌泉根灌下陕北山地苹果作物系数确定与蒸散量估算[J]. *水资源与水工程学报*, 2022, 33(2): 209-215.
- [15] MARINOS E, ADRIANA B, HAKAN D, *et al.* Quantifying evapotranspiration and drainage losses in a semi-arid nectarine (*Prunus persica* var. *nucipersica*) field with a dynamic crop coefficient (Kc) derived from leaf area index measurements[J]. *Water*, 2022, 14(5): 1-14.
- [16] 彭记永, 韩耀杰, 李树岩, 等. 乳熟期倒伏对夏玉米农田蒸散量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(7): 8-15.
- [17] 张淑杰, 周广胜, 李荣平. 基于涡度相关的春玉米逐日作物系数及蒸散模拟[J]. *应用气象学报*, 2015, 26(6): 695-704.
- [18] ZHANG Q, WANG W, YANG F. Drought-stress modified crop coefficients for estimation of evapotranspiration of spring wheat in the southwest loess plateau of China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 74(2): 91-100.
- [19] 耿琳, 王甫, 崔宁博, 等. 温室苦瓜耗水规律及作物系数研究[J]. *西北农业学报*, 2014, 23(12): 154-160.
- [20] GUPTA A, SARANGI A, SINGH D K. Determination of crop evapotranspiration and partitioning of bare soil evaporation of mustard using weighing type field lysimeters[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 17(2): 169-175.
- [21] 李青华, 穆艳, 王延平. 黄土丘陵沟壑区山地苹果林蒸散特征[J]. *地球科学*, 2019, 44(8): 2818-2828.
- [22] 滕云, 张忠学, 陶延怀, 等. 寒地温室豆角耗水规律分析及节水灌溉模式优化[J]. *节水灌溉*, 2016(11): 44-47 + 51.
- [23] 吴元芝, 黄明斌, 韩世涛. 黄土丘陵沟壑区乔灌木植物系数计算与适应性评价[J]. *干旱地区农业研究*, 2008, 26(2): 144-149.
- [24] 安玉艳, 梁宗锁, 韩蕊莲. 黄土高原3种乡土灌木的水分利用与抗旱适应性[J]. *林业科学*, 2011, 47(10): 8-15.
- [25] 桑玉强, 李龙, 施光耀, 等. 太行低山区荆条耗水特征及其与参考作物蒸散量的关系[J]. *中国农业气象*, 2021, 42(8): 657-665.
- [26] 何春霞, 张劲松, 孟平, 等. 太行山南麓3种常见灌木的水分利用特性[J]. *林业科学*, 2018, 54(9): 137-146.
- [27] 何春霞, 陈平, 张劲松, 等. 太行山南麓核桃-崧蓝/决明复合系统种间水分关系[J]. *林业科学研究*, 2021, 34(4): 22-31.
- [28] 王维, 王鹏新, 解毅. 基于动态模拟的作物系数优化蒸散量估算研究[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(11): 129-136.
- [29] 胡永翔, 李援农, 张莹. 黄土高原区滴灌枣树作物系数和需水规律试验[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(11): 87-91 + 79.
- [30] YU P, KRYSANOVA V, WANG Y, *et al.* Quantitative estimate of water yield reduction caused by forestation in a water-limited area in northwest China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(2): 1-5.
- [31] YAO Y, CAI T, JU C, *et al.* Effect of reforestation on annual water yield in a large watershed in northeast China[J]. *Journal of Forestry Research*, 2015, 26(3): 697-702.
- [32] 刘静霞, 蒙强, 曹志翔, 等. 基于云模型的西藏高原灌区参考作物蒸散量时间变化特征与影响因子研究[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(5): 135-144.
- [33] 冯禹, 崔宁博, 魏新平, 等. 川中丘陵区参考作物蒸散量时空变化特征与成因分析[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(14): 78-86 + 339.
- [34] 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(S1): 142-152.
- [35] 钱多, 查天山, 吴斌, 等. 毛乌素沙地参考作物蒸散量变化特征与成因分析[J]. *生态学报*, 2017, 37(6): 1966-1974.
- [36] 阳伏林, 张强, 王文玉, 等. 黄土高原春小麦农田蒸散及其影响因素[J]. *生态学报*, 2014, 34(9): 2323-2328.
- [37] 李传金, 胡顺军, 郑博文. 古尔班通古特沙漠南缘梭梭(*Haloxylon ammodendron*)群落能量平衡及蒸散特征[J]. *生态学报*, 2021, 41(1): 92-100.
- [38] 马亮, 郭丹丹, 雷庆元, 等. 地膜覆盖对新疆滴灌枣园土壤温度和腾发特性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(1): 25-33.
- [39] 马龙龙, 杜灵通, 丹杨, 等. 基于茎流-蒸渗仪法的荒漠草原带人

- 工灌丛群落蒸散特征[J]. 植物生态学报, 2020, 44 (8): 807-818.
- [40] 祁秀娇, 刘廷玺, 段利民, 等. 基于茎干液流法和涡度相关法的小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)群落蒸散特征[J]. 中国沙漠, 2019, 39 (4): 73-82.
- [41] 李龙. 基于大型称重式蒸渗仪的荆条耗水特征及影响因素研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2021.
- [42] 全国栋, 刘洪禄, 李法虎, 等. 双作物系数法计算华北地区桃树蒸散量的可靠性评价[J]. 农业机械学报, 2016, 47 (6): 154-162.
- [43] DING J, LI S, WANG H, *et al.* Estimation of evapotranspiration and crop coefficient of chinese cabbage using eddy covariance in northwest China[J]. *Water*, 2021, 13(19): 2781.
- [44] 王彦辉, 于澎涛, 张淑兰, 等. 黄土高原和六盘山区森林面积增加对产水量的影响[J]. 林业科学研究, 2018, 31 (1): 15-26.
- [45] GONG D, KANG S, YAO L, *et al.* Estimation of evapotranspiration and its components from an apple orchard in northwest China using sap flow and water balance methods[J]. *Hydrological Processes*, 2007, 21(7): 931-938.
- [46] TESTI L, VILLALOBOS F J, ORGAZ F. Evapotranspiration of a young irrigated olive orchard in southern Spain[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 121(1-2): 1-18.
- [47] 王亚蕊, 王彦辉, 于澎涛, 等. 华北落叶松人工林蒸散及产流对叶面积指数变化的响应[J]. 生态学报, 2016, 36 (21): 6928-6938.
- [48] MUNITZ S, SCHWARTZ A, NETZER Y. Water consumption, crop coefficient and leaf area relations of a *Vitis vinifera* cv. 'Cabernet Sauvignon' vineyard[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 219: 86-94.
- [49] 陈秋帆, 代兴梅, 陈劲松, 等. 马铃薯植株高度对FAO-56修正作物系数和实测作物系数的响应差别[J]. 江苏农业科学, 2015, 43 (10): 128-130.

Analysis of Potential Evapotranspiration and Crop Coefficient of *Vitex negundo* L. var. *heterophylla* (Franch.) Rehd. in the Rocky Mountainous Areas of North China

JIANG Li-ya^{1,3}, ZHANG Jia-xing^{1,3}, CHENG Xiang-fen^{2,3}, GAO Jun^{2,3},
SANG Yu-qiang^{1,3}, ZHANG Jin-song^{2,3}

(1. College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, Henan China; 2. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation of National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China; 3. Henan Xiaolangdi Earth Critical Zone National Research Station on the Middle Yellow River, Jiyuan 459000, Henan, China)

Abstract: [Objective] To reveal the variation of potential evapotranspiration and crop coefficient of *Vitex negundo* L. var. *heterophylla* (Franch.) Rehd., for providing a basis for water resources management and vegetation construction of semiarid area. [Method] Based on the lysimeter data, daily meteorological data, leaf area index (LAI) data and growth of new shoot length data from May to October in the year of 2021 in Henan Yellow River Xiaolangdi Earth Key Belt National Field Science Observatory, combined with the Penman-Monteith formula, the trends of potential evapotranspiration (ET_0) and crop coefficient of *Vitex negundo* L. var. *heterophylla* (Franch.) Rehd. under abundant water conditions in different growth stages and their relationship with physiological growth indexes were analyzed. [Result] (1) During the growth stage of *Vitex negundo* L. var. *heterophylla* (Franch.) Rehd., the ET_0 value showed a downward trend. The ET_0 value was higher in May and June, and began to decline after July. The total value of ET_0 was 630.86 mm, and the daily average value was $3.43 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$. (2) The potential evapotranspiration during the growth period of *Vitex negundo* L. var. *heterophylla* (Franch.) Rehd. showed a parabolic trend. The potential evapotranspiration was the largest at blossom stage, with total value of $336.26 \pm 18.19 \text{ mm}$ and daily average value of $5.51 \pm 0.30 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$, followed by fruiting stage and leaf unfolding stage, and the lowest value was found at defoliation stage with a total value of $41.57 \pm 3.61 \text{ mm}$ and a daily average value of $1.98 \pm 0.17 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$, respectively. The total value of potential evapotranspiration during growth stage of *Vitex negundo* L. var. *heterophylla* (Franch.) Rehd. was $716.47 \pm 40.21 \text{ mm}$, with a daily average value of $3.89 \pm 0.22 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$. (3) LAI and new shoot length increased rapidly in May and June, and then the growth rate slowed down gradually. The maximum value of LAI reached its maximum value (2.93 ± 0.07) in August, then began to decline, and the minimum value was found in October, with the value of 1.63 ± 0.08 . The growth of new shoots was the largest in May, $6.85 \pm 0.25 \text{ cm}$, and basically stopped growing in October. (4) During the growth stage, the crop coefficient showed a parabolic trend, with the largest fruiting stage (1.45 ± 0.22), followed by blossom stage (1.25 ± 0.13), leaf unfolding stage (0.98 ± 0.05) and defoliation stage (0.95 ± 0.14) was the smallest, and the average of the whole growth stage was 1.28 ± 0.16 . There was a significant positive correlation between crop coefficient and LAI ($p < 0.01$), with the coefficient of determination R^2 0.736, and there was no significant correlation between crop coefficient and growth of new shoot length ($p > 0.05$).

Keywords: rocky mountainous areas of North China; reference crop evapotranspiration; *Vitex negundo* L. var. *heterophylla* (Franch.) Rehd.; potential evapotranspiration; crop coefficient; leaf area index