

基于单作物系数法的温室秋季生菜蒸散量估算及验证

武佳乐^{1,2}, 李银坤², 张钟莉莉², 刘美英^{1*}, 刘胜尧³, 贾丽娟^{2,4}

(1.内蒙古农业大学 草原与资源环境学院/内蒙古自治区土壤质量与养分资源重点实验室, 呼和浩特 010018; 2.北京市农林科学院 智能装备技术研究中心, 北京 100097; 3.河北省农林科学院 农业信息与经济研究所, 石家庄 050051; 4.河北农业大学 农学院, 河北 保定 071001)

摘要:【目的】基于单作物系数法估算温室秋季生菜蒸散量。【方法】通过2021—2022年温室秋季生菜试验, 根据各生育期影响因素修正FAO-56推荐作物系数值, 即生育前期根据 ET_0 值和灌溉频率修正, 生育中期和生育后期根据气象因素和株高修正, 并采用单作物系数法对温室生菜蒸散量进行估算, 以称重式蒸渗仪实测蒸散量 ET_{cm} 为标准值对蒸散量估算值 ET_{cs} 进行验证。【结果】不同试验年度逐日 ET_0 均呈逐渐降低变化趋势, 介于1.18~2.44 mm/d。温室生菜作物系数修正值($K_{c\ adj}$)和实测值($K_{c\ loc}$)均在生育前期最高, 2 a均值分别为 0.74 ± 0.13 和 0.76 ± 0.13 ; 进入快速发育期后二者均呈降低趋势, 并在生育中后期逐渐稳定在0.5~0.6。各生育阶段的 $K_{c\ adj}$ 较FAO推荐值($K_{c\ FAO}$)更接近实测值($K_{c\ loc}$), $K_{c\ adj}$ 和 $K_{c\ loc}$ 相对误差介于-6.7%~5.4%。应用修正单作物系数法估算温室秋季生菜 ET_{cs} 与实测 ET_{cm} 的日均值分别为1.310 mm/d和1.283 mm/d, 决定系数(R^2)、平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)、一致性指数(d)分别为0.975、0.176 mm/d、0.222 mm/d、0.955。【结论】修正单作物系数法能够较为准确的估算温室秋季生菜蒸散量。

关键词: 温室生菜; 单作物系数; 蒸散量; 参考作物蒸散量; 称重式蒸渗仪

中图分类号: S636.2

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023399

武佳乐, 李银坤, 张钟莉莉, 等. 基于单作物系数法的温室秋季生菜蒸散量估算及验证[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(4): 9-14.
WU Jiale, LI Yinkun, ZHANG Zhonglili, et al. Estimation and verification of autumn lettuce evapotranspiration in greenhouse based on single crop coefficient method[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(4): 9-14.

0 引言

【研究意义】生菜是温室栽培的重要叶类蔬菜, 不仅具有较高的营养价值, 而且具有清肝利胆、降低胆固醇等功效^[1]。科学的水分管理是提高生菜产量、改善品质的重要措施^[2-3]。作物蒸散量(ET_c)是农业生态系统能量和水分平衡的关键参数, 也是制定合理灌溉方案和实现水分高效利用的重要依据^[4]。

【研究进展】FAO作物系数法是一种估算 ET_c 的重要方法^[5], 通过参考作物蒸散量(ET_0)与作物系数(K_c)的乘积计算^[6], 该方法已在大田作物和树木得到了广泛应用^[7-8]。其中 ET_0 代表参考作物表面蒸发蒸腾的能力, 不受作物和土壤因素的影响, 可根据气象资料计算^[6]。FAO56手册推荐值的 K_c 是基于标准农业气候变量和作物特定生长情况而制定的,

将其应用到其他地区时应该考虑大气蒸发强度、作物生理条件和农业实践等因素的影响^[9]。直接使用FAO56推荐的 K_c 计算作物蒸散量与实测蒸散量存在偏差^[10]。Jo等^[11]研究指出, 草莓生育前期、生育中期和生育后期的 K_c 值在大田种植时分别为0.3、0.8、0.7, 而在温室栽培下则分别为0.15、1.18、0.25。我国西北部种植的葡萄与以色列南部种植葡萄最大 K_c 值相差0.45^[12]。因此, 同一作物的 K_c 在种植环境改变后需要根据实际情况进行修正以提高作物系数法估算的准确性。

设施栽培环境是一个相对密闭的环境, 与室外栽培环境相比具有湿度高、风速低和无降水等特点^[13]。当前关于设施作物蒸散量的估算主要采用作物系数法, 闫浩芳等^[14]基于修正双作物系数法估算了温室黄瓜蒸散量, 春夏季和秋冬季的均方根误差分别为0.41 mm/d和0.48 mm/d。邱让建等^[15]率定双作物系数法相关参数并验证其在温室番茄蒸散量估算上的准确性, 模型估算平均标准误差为0.55 mm/d。Li等^[16]根据当地气候条件修正了温室茄子 K_c 值, 并与FAO56推荐的 K_c 值做了对比分析, 结果表明基于修正后作物系数估算的茄子蒸散量与实测蒸散量的一致性指数高达0.98。目前, 关于作物系数法在温室

收稿日期: 2023-08-29 修回日期: 2024-01-11

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFD1900404-02); 河北省重点研发计划项目(21326904D); 河北省现代农业产业技术体系(HBCT2023100214)

作者简介: 武佳乐(1997-), 女, 内蒙古和林格尔人。硕士研究生, 主要从事作物水肥高效利用研究。E-mail: wu971221@126.com

通信作者: 刘美英(1974-), 女, 内蒙古清水河人。教授, 硕士生导师, 主要从事土壤肥力与植物营养方面的教学科研工作。

E-mail: liumeiyingimau@163.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

中的研究主要集中在温室果类蔬菜^[14-18], 作为典型叶类蔬菜的生菜研究较少, 可能是由于生育期短、根区较浅及无地膜覆盖种植等原因^[19], 导致生长期间灌溉频繁, 特别是叶片覆盖率较低时, 温度、湿度和太阳辐射等环境因子的升高或降低易引起 K_c 波动^[20]。

【切入点】如何根据设施实际环境条件和生菜生长状况对 K_c 值进行修正至关重要, 且修正作物系数后的蒸散量估算结果的准确性也需要验证。【拟解决的关键问题】为此, 本研究通过 2021—2022 年温室秋季生菜试验, 以称重式蒸渗仪实测的生菜 ET_{cm} 为标准值, 研究温室生菜在不同作物生长阶段的 K_c 值, 并验证单作物系数法在估计 ET_c 时候的准确性, 为温室生菜蒸散耗水估算及水分管理提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2021—2022 年在北京农林科学院 (39°94'N, 116°29'E, 海拔约 56 m) 三连跨连栋温室的中跨开展。试验温室为三跨钢框架结构, 宽 11 m, 南北跨度 35 m。试验区为温带大陆性气候, 年均气温为 11.1 °C, 年均降水量为 500~600 mm。温室土壤质地为砂壤土, 土壤体积质量为 1.40 g/cm³, 田间体积持水率为 28.3%, 有机质量为 15.9 g/kg。

1.2 试验材料与方法

供试生菜品种为“富兰德里”, 提前育苗, 定植时选取 4 叶 1 心的秧苗 14 株移栽在称重式蒸渗仪上, 株行距为 20 cm×20 cm。为保证成活率, 需灌大量定植水。生菜定植时间分别为 2021 年 10 月 11 日和 2022 年 10 月 15 日, 收获时间分别为 2021 年 11 月 25 日和 2022 年 11 月 29 日。为保证生菜生长季内不发生水分亏缺的情况 ($K_s=1$), 灌水量为蒸发皿 (直径 20 mm) 累积蒸发量 (E_p) 的 70%^[2], 当累积蒸发量达到 12±1 mm 时进行灌溉。基肥为桃木有机肥 30 000 kg/hm² ($\omega(N)+\omega(P_2O_5)+\omega(K_2O) \geq 5\%$, 有机质 $\geq 45\%$), 之后追施水溶肥 125 kg/hm² ($\omega(N):\omega(P_2O_5):\omega(K_2O)=30:10:10$)。

1.3 测定项目及指标

1.3.1 气象数据

温室中央布置小型气象站 (型号 AG1000, 美国制造) 实时采集温室内气象数据, 包括日最高气温/最低气温、平均气温、相对湿度、太阳辐射等环境因子, 每 10 min 记录 1 次数据。

1.3.2 实测蒸散量

供试称重式蒸渗仪 (LYSI9S, 中国制造) 长 1 m, 宽 0.6 m, 土体深 0.9 m, 系统采集器为 SDI-12

总线接口, 分辨率为 0.01 mm。每 30 min 记录 1 次土柱质量, 实测日蒸散量为 0:00—24:00 数据累加。

$$ET_c = \frac{W_{t-1} - W_t}{A \times \rho} + I, \quad (1)$$

式中: ET_c 为蒸渗仪实测蒸散量 (mm); A 为蒸渗仪箱体的表面积 (0.6 m²); $W_{t-1}-W_t$ 为时间段内蒸渗仪箱体内水的质量变化量 (kg); ρ 为水的密度 1 g/cm³; I 为时段内的灌水量 (mm)。

1.3.3 植物株高

选择 3 株长势均匀的生菜, 每 5 天用直尺测 1 次株高取平均值。

1.4 模型描述

1.4.1 参考作物蒸散量

采用 Fernández 等^[21]修正后适合温室环境的 P-M 方程计算参考作物蒸散量 (ET_0)。在 Gong 等^[22]的试验中得到验证, ET_0 计算式为:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{628}{T_a + 273}(e_s - e_a)}{\gamma + 1.24\Delta}, \quad (2)$$

式中: ET_0 为参考作物蒸散量 (mm/d); R_n 和 G 分别为太阳净辐射和土壤热通量 MJ/(m²·d), R_n 根据 FAO56 文件^[6]计算, 日 G 值相对较小可忽略为 0^[6,22]; e_s 和 e_a 分别为饱和水汽压和实际水汽压 (kPa); Δ 为饱和水汽压-温度关系曲线在 T_a 处的切线斜率 (kPa/°C); γ 为干湿表常数 0.067 kPa/°C; T_a 为 2 m 高度处平均气温 (°C)。

1.4.2 单作物系数模型

单作物系数模型是较为常用的制定温室蔬菜作物灌溉的方法^[10], 单作物系数计算式为:

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_0}, \quad (3)$$

式中: ET_c 为实测作物蒸散量; ET_0 为参考作物蒸散量; K_c 为作物系数, FAO-56 给出的 K_c 值适用于中等风速的亚湿润地区 ($RH_{min}=45\%$, $u_2=2$ m/s)。 K_c 曲线通常用 4 个阶段来描述, 分别为生育前期、快速发育期、生育中期和生育后期, 确定生育前期 $K_{c\ ini}$ 、生育中期 $K_{c\ mid}$ 和生育后期 $K_{c\ end}$ 3 个典型值分别为 0.7、1.0 和 0.95^[6], 需要根据实际情况修正。

生育初期作物系数 ($K_{c\ ini}$) 根据 FAO56 手册^[6]确定, 由于生菜在初始阶段土壤蒸发所占比例较大, 主要考虑的是湿润时间间隔和次数及大气蒸发潜力 (用 ET_0 代表) 的影响^[6]。当平均入渗深度介于 10~40 mm 时, 作物系数计算式为:

$$K_{c\ ini} = K_{c\ ini(图29)} + \frac{(I-10)}{(40-10)}[K_{c\ ini(图30)} - K_{c\ ini(图29)}], \quad (4)$$

式中: $K_{c\ ini(图29)}$ 为查图 29^[6]得出的 $K_{c\ ini}$, $K_{c\ ini(图30)}$ 为查图 30^[6]得出的 $K_{c\ ini}$, I 为平均入渗深度 (mm)。

生育中后期作物系数值 ($K_{c\text{ mid}}$ 、 $K_{c\text{ end}}$) 是考虑了相对湿度、风速和株高影响的单作物系数修正方法^[6], 每日作物系数 K_c 修正计算式为:

$$K_{c\text{ adj}} = K_{c\text{ cal}} + [0.04(u-2) - 0.004(RH_{\min} - 45)] (h_c/3)^{0.3}, \quad (5)$$

式中: $RH_{\min}$ 是日最小相对湿度 (%); h_c 是植物高度 (m); u 是 2 m 高度的日风速 (m/s)。 $K_{c\text{ adj}}$ 是修正后的每日单作物系数值, $K_{c\text{ cal}}$ 为 FAO-56 推荐的基础作物系数值, 本文采用 2021 年温室生菜数据对 $K_{c\text{ cal}}$ 初始值进行率定, 根据与实测 K_c 值绝对偏差最小的原则, 得到 $K_{c\text{ mid}}$ 和 $K_{c\text{ end}}$ 分别为 0.6 和 0.53, 该值估算下的日 ET_c 与实测 ET_c 绝对误差为 -0.22~0.14。采用 2022 年温室秋茬生菜实测蒸散量 ET_{cm} 数据进行验证。

1.5 模型评价指标

选用均方根误差 ($RMSE$)、平均绝对误差 (MAE)、一致性指数 (d) 和决定系数 (R^2) 评估模型性能^[23]。

2 结果与分析

2.1 试验期间温室小气候特征

试验期间不同年份温室主要环境因子变化规律相似, 其中温度、太阳辐射和相对湿度随生育期变化明显。平均温度和太阳辐射均随生育期推进呈逐渐降低趋势。与生育前期相比, 2021、2022 年生育后期的平均温度分别下降了 3.89、3.17 °C, 平均太阳辐射分别下降了 29.43、25.74 W/m²。而相对湿度随生育期推进均呈先升高后降低的趋势, 2021 年相对湿度为 47.8%~91.6%; 2022 年相对湿度为 20.1%~72.4%。

表 1 2021、2022 年秋季生菜生育期内气象因子

Tab.1 Meteorological factors during the growth period of autumn lettuce in 2021 and 2022

年份	生育期	时间/d	最高气温/°C	最低气温/°C	平均温度/°C	相对湿度/%	太阳辐射/(W·m ²)
2021	生育前期	8	33.83	10.56	18.59	59.6	56.31
	快速发育期	13	34.17	9.81	18.06	65.0	47.71
	生育中期	17	24.87	7.80	13.49	76.2	29.14
	生育后期	8	27.40	8.85	14.70	70.7	26.88
	全生育期	46	29.49	9.03	15.88	69.2	38.72
2022	生育前期	9	34.05	11.61	20.06	34.6	44.44
	快速发育期	12	28.11	11.47	17.42	44.3	29.06
	生育中期	17	30.96	10.24	17.34	58.4	25.05
	生育后期	8	26.82	11.71	16.89	43.8	18.70
	全生育期	46	30.10	11.09	17.81	47.6	28.79

2.2 温室秋季生菜 ET_0 变化

试验期间不同年度的逐日 ET_0 均随时间延长呈逐渐降低趋势, 生育前期 ET_0 较高, 2021、2022 年分别为 2.29、2.44 mm/d; 生育后期 ET_0 相对较低, 2021、2022 年分别为 1.21、1.58 mm/d。2021、2022

年全生育期 ET_0 平均值分别为 1.65、1.93 mm/d, ET_0 累积量分别为 75.36、87.11 mm。

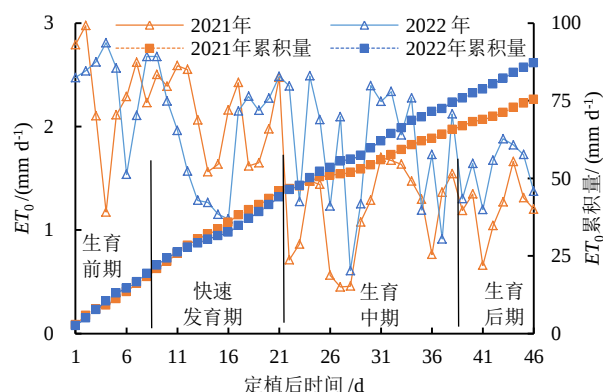


图 1 不同年度温室秋季生菜 ET_0 变化

Fig.1 Variation in reference crop evapotranspiration (ET_0) of autumn lettuce in greenhouse in different years

2.3 秋季生菜各阶段单作物系数

表 2 为温室秋季生菜各生育期单作物系数。由表 2 可知, 随着生菜生育期推进, $K_{c\text{ adj}}$ 呈逐渐降低的变化趋势, 其中 2021、2022 年生育前期的 $K_{c\text{ adj}}$ 分别为 0.60 和 0.87, 生育中期的 $K_{c\text{ adj}}$ 稳定在 0.58 左右, 生育后期的 $K_{c\text{ adj}}$ 在 0.55 左右。与 $K_{c\text{ FAO}}$ 相比, 2022 年生育前期的 $K_{c\text{ adj}}$ 高 24.3%, 其余各生育期的 $K_{c\text{ adj}}$ 均低于 $K_{c\text{ FAO}}$ 值, 降低幅度为 14.3%~43.2%。误差分析表明, $K_{c\text{ adj}}$ 与 $K_{c\text{ loc}}$ 在生菜各生长发育阶段差别较小, 相对误差介于 -6.7%~5.4%。

表 2 2 a 温室秋季生菜各生育期单作物系数

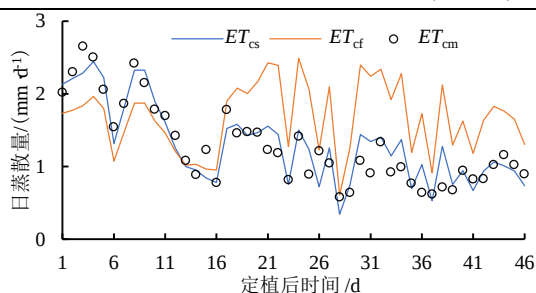
Tab.2 Single crop coefficient values of autumn lettuce in greenhouse at different growth stages in 2 years

年份	生育期	$K_{c\text{ FAO}}$	$K_{c\text{ adj}}$	$K_{c\text{ loc}}$
2021	生育前期	0.7	0.60	0.62
	快速发育期	-	0.60	0.56
	生育中期	1.0	0.58	0.58
	生育后期	0.95	0.54	0.52
2022	生育前期	0.7	0.87	0.89
	快速发育期	-	0.73	0.76
	生育中期	1.0	0.59	0.56
	生育后期	0.95	0.56	0.59

注 $K_{c\text{ FAO}}$ 是 FAO 56 建议的作物系数值^[6]。 $K_{c\text{ loc}}$ 定义为不同生长阶段的实测 ET_c 与 ET_0 的比值。

2.4 温室秋季生菜蒸散量估算

图 2 为修正单作物系数法估算的秋季生菜逐日蒸散量 (ET_{cs}) 全生育期变化趋势。由图 2 可知, ET_{cs} 最高值出现在定植后第 4 天, 为 2.44 mm, 随着生育期推进 ET_{cs} 明显下降并趋于稳定, 其值介于 0.7~1.5 mm。在秋季生菜生育期内, ET_{cs} 、FAO56 推荐 K_c 值估算的蒸散量 (ET_{cf}) 和实测蒸散量 (ET_{cm}) 的累计量分别为 60.25、77.07、59.01 mm。与 ET_{cm} 相比, ET_{cf} 和 ET_{cs} 分别高估了 18.06 mm 和 1.24 mm。由图 3 可知, ET_{cm} 与 ET_{cs} 极显著正相关, 决定系数 R^2 为 0.975 ($P < 0.01$), 而 ET_{cm} 与 ET_{cf} 的 R^2 为 0.839。



注 ET_{cm} 为称重式蒸渗仪实测蒸散量; ET_{cf} 为 FAO56 推荐 K_c 值估算的蒸散量; ET_{cs} 为修正单作物系数法估算蒸散量。

图 2 2022 年温室秋季生菜实测值 ET_{cm} 与估计值 ET_{cs} 、 ET_{cf}

Fig.2 The measured ET_{cm} and estimated ET_{cs} and ET_{cf} of

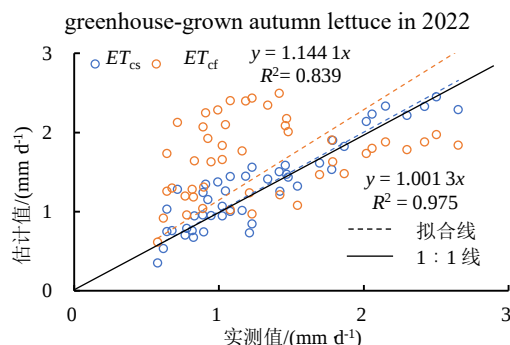


图 3 实测值 ET_{cm} 与估计值 ET_{cs} 、 ET_{cf} 相关性

Fig.3 Correlation of the measured ET_{cm} with the estimated ET_{cs} and ET_{cf}

2.5 模型统计指标

秋季生菜不同生育期 ET_{cm} 介于 0.924~2.169 mm/d, ET_{cs} 介于 0.881~2.120 mm/d, ET_{cf} 介于 1.536~1.711 mm/d。生菜各生育阶段 ET_{cs} 与 ET_{cm} 的 $RMSE$ 和 MAE 均低于 ET_{cf} 与 ET_{cm} , ET_{cs} 与 ET_{cm} 各阶段的一致性指数 d 均大于 ET_{cf} 与 ET_{cm} 。特别是在生育中期和生育后期, 利用修正 K_c 估算的 ET_{cs} 较 FAO56 推荐 K_c 估算的 ET_{cf} 在精度上提升较大, 生育中期 $RMSE$ 和 MAE 分别降低 69.3% 和 70.6%, 生育后期 $RMSE$ 和 MAE 降低 82.4% 和 84.2%, d 由 0.20 以下增加到 0.86 以上。

表 3 2022 年温室秋季生菜 ET_{cm} 、 ET_{cf} 、 ET_{cs} 统计分析

Tab.3 Statistical indicators of measured ET_{cm} and estimated ET_{cf} and ET_{cs} for greenhouse-grown autumn lettuce in 2022

指标类型	统计指标	生育前期	快速发育期	生育中期	生育后期	全生育期
ET_{cm}	Mean/(mm·d ⁻¹)	2.169	1.359	0.929	0.924	1.283
	Mean/(mm·d ⁻¹)	2.120	1.324	1.037	0.881	1.310
	MAE/(mm·d ⁻¹)	0.149	0.138	0.255	0.097	0.176
	RMSE/(mm·d ⁻¹)	0.177	0.183	0.300	0.111	0.222
	d	0.991	0.920	0.861	0.981	0.955
ET_{cf}	Mean/(mm·d ⁻¹)	1.711	1.571	1.796	1.536	1.675
	MAE/(mm·d ⁻¹)	0.458	0.368	0.868	0.612	0.612
	RMSE/(mm·d ⁻¹)	0.487	0.487	0.977	0.630	0.720
	d	0.885	0.653	0.200	0.057	0.517

3 讨论

本研究中温室秋季生菜生育前期作物系数 (K_c)

高, 进入快速发育期呈降低趋势, 并在生育中后期逐渐稳定在 0.5~0.6。这主要与本试验采用了单作物系数法有关, 单作物系数法将基础作物系数 (K_{cb}) 和土壤蒸发系数 (K_e) 作为一个整体考虑^[6]。在生菜生育前期, 由于温度相对较高 (表 1), 冠层覆盖度低, 裸露土壤面积大, 土壤蒸发是该阶段水分损失的主要途径^[6]; 其次, 生育前期的生菜根系未发育成熟, 储水能力较差, 期间频繁灌溉进一步增加了土壤蒸发强度^[24-25]。Gong 等^[26]研究表明, 在温室番茄生育前期, K_e 占 K_c 的比例为 48%~59%, 进而导致 K_c 随 K_e 增高而增高^[27]。之后随着生菜生长发育, 叶面积指数 (LAI) 逐渐增大; 生菜生育中期时, 75% 以上的土壤被生菜叶片遮挡^[28], 土壤蒸发部分 (K_e) 减弱, 此时以植株蒸腾 (K_{cb}) 为主, 受环境影响较小, 生菜生长发育稳定, K_c 介于 0.5~0.6。这与 Casanova 等^[29]研究相似, 但低于大田栽培条件下生菜在生育中期和后期 K_c 分别为 1.00 和 0.97 的研究结果^[30]。栽培环境不一致是导致不同研究中 K_c 数值差异的主要原因。为避免温室风速为 0 对利用 P-M 公式计算温室 ET_0 参数的影响, Fernández 等^[21]通过修剪作物高度以满足参考作物的假设条件, 并取空气动力学阻力 (r_a) 为 295 m/s, 从而得到了消除风速项的温室 ET_0 计算式。田间施用不同土壤调理剂, 因延长生育期而改变了冬季生菜 K_c 规律^[31]; 不同种植密度条件也因冠层覆盖度的差异而影响 K_c 值^[17]。说明田间管理条件不一致也是造成不同研究中同一作物 K_c 差异的原因。

作物系数法根据实际环境条件和作物生长状况修正 K_c 后可以准确地估算茄子^[16]、黄瓜^[32]、番茄^[18]等果类蔬菜的 ET_c 。Li 等^[16]利用修正作物系数法估算温室覆膜茄子各生育期蒸散量与实测蒸散量的 $RMSE$ 和 MAE 分别在 0.48 mm/d 和 0.39 mm/d 以内。赵爽等^[32]通过微气候、叶面积指数和根区水分数据对 FAO56 作物系数进行修正, 各生育期估算黄瓜蒸散量与实测蒸散量的 $RMSE$ 均低于 0.48 mm/d, MAE 低于 0.42 mm/d。与作物系数法在温室果类蔬菜上的应用相比, 生菜无地膜覆盖且种植前期温室温度高, 导致此阶段具有相对较高的土壤蒸发量, 进行影响作物系数的修正与蒸散量的估算。因此, 本研究在温室生菜生育前期以土壤蒸发为主时考虑了大气蒸发潜力和灌溉事件频率对作物系数进行修正, 生育中期和生育后期主要考虑了环境和株高的影响, 以此方法得到的作物系数修正值 $K_{c\ adj}$ 与实测值 $K_{c\ loc}$ 较为接近, 相对误差介于 -6.7%~5.4%。利用 $K_{c\ adj}$ 估算的不同生育期 ET_{cs} 和实测 ET_{cm} 的 $RMSE$ 和 MAE 分别为 0.111~0.300 mm/d 和

0.097~0.255 mm/d。从生菜全生育期看, 利用 $K_{c\ adj}$ 估算的 ET_{cs} 较利用 $K_{c\ FAO}$ 值估算的 ET_{cf} 更接近实测值 ET_{cm} , MAE 和 $RMSE$ 分别降低了 71.2% 和 69.2%。全生育期累积的 ET_{cs} 与 ET_{cf} 较实测蒸散量 ET_{cm} 分别高估了 2.1% 和 30.6%, 表明作物系数修正值比 FAO56 推荐值在估算蒸散量上更加符合实际情况。但作物系数法估算的蒸散量 ET_{cs} 仍出现部分高估情况。这与蒸渗仪本身存在一定误差有关, 由于蒸渗仪使用密闭容器来避免水分流失, 这样可能限制植物根系氧气供应和气体交换从而影响植物生长^[33]。在本研究中为提高称重式蒸渗仪测量 ET_c 的精度, 在其周围种植保护行, 避免出现局部平流以及晾衣绳效应^[34]。本研究作物系数法日估算的 ET_{cs} 与实测 ET_{cm} 的 $R^2 > 0.95$, 表明作物系数方法可以解释实测 ET_{cm} 的大部分变化。

4 结论

1) 秋季温室生菜作物系数修正值 ($K_{c\ adj}$) 变化规律为生育前期最高, 快速发育期逐渐下降, 生育中后期趋于稳定。各生育阶段的 $K_{c\ adj}$ 较 FAO 推荐值 ($K_{c\ FAO}$) 更接近实测值 ($K_{c\ loc}$)。

2) 基于修正后的单作物系数法估算秋季生菜蒸散量 (ET_{cs}) 较利用 $K_{c\ FAO}$ 值估算的蒸散量 (ET_{cf}) 更加接近实测值 (ET_{cm}), 精度更高, 方法可行。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- 李哲, 王喜山, 赵国臣, 等. 生菜的营养价值及高产栽培技术[J]. 吉林蔬菜, 2014(9): 14-15.
- 李银坤, 詹保成, 郭文忠, 等. 基于蒸发皿水面蒸发量的温室生菜适宜灌溉量研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(4): 13-19.
LI Yinkun, ZHAN Baocheng, GUO Wenzhong, et al. Optimizing irrigation amount for greenhouse lettuce production based on pan-measured evaporation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(4): 13-19.
- 张明宇, 杨晶, 安帅霖. 不同土壤水分含量对生菜生长特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(5): 59-61.
ZHANG Mingyu, YANG Jing, AN Shuailin. Effects of different soil water content on lettuce growth characteristics[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49(5): 59-61.
- 敬峰, 段爱旺, 张莹莹, 等. 基于大型蒸渗仪的冬小麦蒸散规律及其模拟[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(5): 17-26.
JING Feng, DUAN Aiwang, ZHANG Yingying, et al. The effects of soil water on accuracy of different methods for calculating evapotranspiration from winter wheat field[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(5): 17-26.
- PEREIRA L S, PAREDES P, HUNSAKER D J, et al. Standard single and basal crop coefficients for field crops. Updates and advances to the FAO56 crop water requirements method[J]. Agricultural Water Management, 2021, 243: 106 466.
- ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements[M]. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper56, 1998.
- 姚婷月, 王怡宁, 石磊韬, 等. 利用叶面积指数和气象因子修正双作物系数估算夏玉米蒸散量[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(2): 1-8.
YAO Tingyue, WANG Yining, SHI Leitao, et al. Modifying the dual crop coefficients with leaf area index and meteorological factors to improve the estimated evapotranspiration from maize fields[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(2): 1-8.
- 黄耀威, 何清燕, 姜守政, 等. 西南猕猴桃园蒸散发变化及敏感性分析[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(10): 26-33.
HUANG Yaowei, HE Qingyan, JIANG Shouzheng, et al. Evapotranspiration of kiwifruit orchards and its sensitivity to meteorological factors in southwest China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(10): 26-33.
- PAOLA L, GIANFRANCO R. The use of crop coefficient approach to estimate actual evapotranspiration: A critical review for major crops under Mediterranean climate[J]. Italian Journal of Agrometeorology-Rivista Italiana di Agrometeorologia, 2010, 15(2): 25-39.
- 赵明雨, 姚名泽, 李波, 等. 日光温室作物腾发量估算模型的研究综述[J]. 节水灌溉, 2023(4): 73-81.
ZHAO Mingyu, YAO Mingze, LI Bo, et al. Review on the estimation model of crop evapotranspiration in solar greenhouse[J]. Water Saving Irrigation, 2023(4): 73-81.
- JO W J, KIM D S, SIM H S, et al. Estimation of evapotranspiration and water requirements of strawberry plants in greenhouses using environmental data[J]. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2021, 5: 684 808.
- WANG Shangtao, ZHU Gaofeng, XIA Dunsheng, et al. The characteristics of evapotranspiration and crop coefficients of an irrigated vineyard in arid northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2019, 212: 388-398.
- 杨宜. 温室茄子日参考蒸散量的模型估算及评价研究[D]. 太谷: 山西农业大学, 2018.
YANG Yi. Study on model estimation and evaluation of daily reference evapotranspiration in greenhouse eggplant[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2018.
- 闫浩芳, 毋海梅, 张川, 等. 基于修正双作物系数模型估算温室黄瓜不同季节腾发量[J]. 农业工程学报, 2018, 34(15): 117-125.
YAN Haofang, WU Haimei, ZHANG Chuan, et al. Estimation of greenhouse cucumber evapotranspiration in different seasons based on modified dual crop coefficient model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(15): 117-125.
- 邱让建, 杜太生, 陈任强. 应用双作物系数模型估算温室番茄耗水量[J]. 水利学报, 2015, 46(6): 678-686.
QIU Rangjian, DU Taisheng, CHEN Renqiang. Application of the dual crop coefficient model for estimating tomato evapotranspiration in greenhouse[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(6): 678-686.
- LI Yinkun, GUO Wenzhong, WU Jiale, et al. Estimation of greenhouse-grown eggplant evapotranspiration based on a crop coefficient model[J]. Water, 2022, 14(19): 2 959.
- WANG Shunsheng, LI Bo, GONG Xuewen. Research on validity examination of simulated results of eggplant water requirements with drip irrigation under mulch in sunlight greenhouse[J]. Water, 2018, 10(2): 130.
- GONG Xuewen, LIU Hao, SUN Jingsheng, et al. Comparison of Shuttleworth-Wallace model and dual crop coefficient method for estimating evapotranspiration of tomato cultivated in a solar greenhouse[J]. Agricultural Water Management, 2019, 217: 141-153.
- DHUNGEL R, ANDERSON R G, FRENCH A N, et al. Assessing evapotranspiration in a lettuce crop with a two-source energy balance model[J]. Irrigation Science, 2023, 41(2): 183-196.
- 徐厚成, 程明, 安顺伟, 等. 不同灌溉方式对北京春茬露地生菜的影响[J]. 北方园艺, 2017(11): 8-12.
XU Houcheng, CHENG Ming, AN Shunwei, et al. Effects of different irrigation methods of lettuce of spring open cultivation in Beijing[J]. Northern Horticulture, 2017(11): 8-12.
- FERNÁNDEZ M D, BONACHELA S, ORGAZ F, et al. Measurement and estimation of plastic greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate[J]. Irrigation Science, 2010, 28(6): 497-509.
- GONG Xuewen, QIU Rangjian, SUN Jingsheng, et al. Evapotranspiration and crop coefficient of tomato grown in a solar greenhouse under full and deficit irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2020, 235: 106 154.

- [23] WILLMOTT C, MATSUURA K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance[J]. *Climate Research*, 2005, 30(1): 79-82.
- [24] 赵锦江, 马娟娟, 郑利剑, 等. 基于双作物系数法估算晋南地区冬小麦-夏玉米轮作系统蒸散量[J]. *节水灌溉*, 2023(2): 28-37.
- ZHAO Jinjiang, MA Juanjuan, ZHENG Lijian, et al. Estimation of evapotranspiration of winter wheat-summer maize rotation system in southern Shanxi based on dual-crop coefficient approach[J]. *Water Saving Irrigation*, 2023(2): 28-37.
- [25] 刘悦, 鞠琴, 舒心怡, 等. 裸地土壤蒸发与不同驱动要素之间的响应关系[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(3): 50-54.
- LIU Yue, JU Qin, SHU Xinyi, et al. Response relationships between bare land soil evaporation and different drivers[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2018, 39(3): 50-54.
- [26] GONG Xuewen, QIU Rangjian, GE Jiankun, et al. Evapotranspiration partitioning of greenhouse grown tomato using a modified Priestley-Taylor model[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 247: 106 709.
- [27] 耿耘, 刘浩, 李云峰, 等. 麦后移栽棉蒸发蒸腾规律和作物系数[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(7): 24-34.
- GENG Yun, LIU Hao, LI Yunfeng, et al. Evapotranspiration and crop coefficient of transplanted cotton after wheat harvest[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(7): 24-34.
- [28] 高海荣, 张钟莉莉, 岳焕芳, 等. 基于 Bayesian-XGBoost 的生菜作物系数估算方法[J]. *山西农业科学*, 2022, 50(10): 1 482-1 488.
- GAO Hairong, ZHANG Zhonglili, YUE Huanfang, et al. Estimation method of lettuce crop coefficient based on Bayesian-XGBoost[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2022, 50(10): 1 482-1 488.
- [29] CASANOVA P M, MESSING I, JOEL A, et al. Methods to estimate lettuce evapotranspiration in greenhouse conditions in the central zone of Chile[J]. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 2009, 69(1): 60-70.
- [30] FERNÁNDEZ-PACHECO D G, ESCARABAJAL-HENAREJOS D, RUIZ-CANALES A, et al. A digital image-processing-based method for determining the crop coefficient of lettuce crops in the southeast of Spain[J]. *Biosystems Engineering*, 2014, 117: 23-34.
- [31] 涂智勇. 不同土壤调理剂对设施生菜生长发育及水分利用效率影响试验研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2022.
- TU Zhiyong. Effects of different soil conditioners on growth and water use efficiency of lettuce in greenhouse[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2022.
- [32] 赵爽, 闫浩芳, 张川, 等. 基于改进的双作物系数模型与 Priestley-Taylor 模型估算温室黄瓜蒸散量[J]. *排灌机械工程学报*, 2023, 41(8): 849-857.
- ZHAO Shuang, YAN Haofang, ZHANG Chuan, et al. Estimation of cucumber evapotranspiration in greenhouse based on improved dual crop coefficient model and Priestley-Taylor model[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2023, 41(8): 849-857.
- [33] ALLEN R G, PEREIRA L S, HOWELL T A, et al. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(6): 899-920.
- [34] PEREIRA L S, PAREDES P, LÓPEZ-URREA R, et al. Standard single and basal crop coefficients for vegetable crops, an update of FAO56 crop water requirements approach[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 243: 106 196.

Estimation and verification of autumn lettuce evapotranspiration in greenhouse based on single crop coefficient method

WU Jiale^{1,2}, LI Yinkun², ZHANG Zhonglili², LIU Meiyang^{1*}, LIU Shengyao³, JIA Lijuan^{2,4}

(1. Inner Mongolia Key Laboratory of Soil Quality and Nutrient Resource, College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Intelligent Equipment Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 3. Institute of Agricultural Information and Economic, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051, China; 4. College of Agriculture, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China)

Abstract: 【Objective】 The variation in evapotranspiration is an important parameter in irrigation design. In this paper, we propose and verify a modified single crop coefficient method to calculate the evapotranspiration of greenhouse lettuce. 【Method】 The experiment was conducted in autumn from 2021 to 2022 in a greenhouse grown with lettuce. The crop coefficient was calculated using the formula recommended by FAO-56, with the calculated crop coefficient for initial growth stage being modified based on ET_0 and irrigation frequency, while for other growing stages it was modified based on meteorological factors and plant height. The modified single crop coefficient was then used to calculate the evapotranspiration of the lettuce, with the calculated results being validated against measured data from weighing lysimeters. 【Result】 The mean reference crop evapotranspiration (ET_0) of the lettuce varied between 1.18 to 2.44 mm/d, but showed a decreasing trend from 2021 to 2022. The modified crop coefficient and measured crop coefficient both peaked at the initial stage, with their associated two-year average being 0.74 ± 0.13 and 0.76 ± 0.13 , respectively. As the crop grew, both crop coefficients asymptotically decreased to 0.5~0.6 in the middle and later growing stages. The modified crop coefficient was closer to the measured crop coefficient than that calculated from the formula recommended by the FAO-56, with the relative error between them ranging from -6.7% to 5.4%. The mean estimated and the measured evapotranspiration of the lettuce in autumn were 1.310 mm/d and 1.283 mm/d, respectively. The determination coefficient, the mean absolute error, root mean square error and the index of the agreement between the measured and estimated evapotranspiration were 0.975, 0.176 mm/d, 0.222 mm/d and 0.955, respectively. 【Conclusion】 The modified single crop coefficient is more accurate than that calculated from the formula recommended by the FAO-56 for estimating the evapotranspiration of greenhouse lettuce.

Key words: greenhouse lettuce; single crop coefficient; evapotranspiration; reference crop evapotranspiration; weighing lysimeter

责任编辑: 白芳芳