

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.017

大田玉米作物系数无人机多光谱遥感估算方法

韩文霆^{1,2} 邵国敏^{1,2} 马代健^{1,2} ZHANG Huihui³ 王毅^{1,2} 牛亚晓^{1,2}
(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100;
3. 美国农业部农业研究服务属, 柯林斯堡 CO 80526)

摘要: 作物系数 K_c 快速获取是大田作物蒸散量 (Evapotranspiration, ET) 估算的关键, 为研究无人机多光谱遥感估算玉米作物系数的可行性和适用性, 以 2017 年内蒙古达拉特旗昭君镇实验站大田玉米、土壤、气象等数据为基础, 采用经气象因子和作物覆盖度校正后的双作物系数法计算不同生长时期与不同水分胁迫玉米的作物系数, 并使用自主研发的无人机多光谱系统航拍玉米的冠层多光谱 (蓝、绿、红、红边、近红外, 475 ~ 840 nm) 影像, 研究了不同生长时期 (快速生长期、生长中期和生长后期) 玉米的 6 种常用植被指数 (Vegetation indices, VIs): 归一化差值植被指数 (NDVI)、土壤调节植被指数 (SAVI)、增强型植被指数 (EVI)、比值植被指数 (SR)、绿度归一化植被指数 (GNDVI) 和抗大气指数 (VARI), 与作物系数 K_c 的关系模型及水分胁迫对其的影响。结果表明: 玉米生长时期和水分胁迫是影响玉米 VIs- K_c 模型相关性的两个重要因素。不同生长时期玉米植被指数和 K_c 相关性不同: 充分灌溉情况下, 快速生长期玉米 VIs- K_c 模型的相关性 (R^2 为 0.731 2 ~ 0.940 1, $p < 0.05$, $n = 25$) 与生长中期至生长后期 VIs- K_c 模型的相关性 (R^2 为 0.276 5 ~ 0.373 2, $p < 0.05$, $n = 40$) 不同; 水分胁迫情况下, 快速生长期玉米 VIs- K_c 模型的相关性 (R^2 为 0.0002 ~ 0.0830, $p < 0.05$, $n = 25$) 与生长中期至生长后期 VIs- K_c 模型的相关性 (R^2 为 0.366 2 ~ 0.848 7, $p < 0.05$, $n = 40$) 不同。水分胁迫对 VIs- K_c 模型的相关性影响较大: 快速生长期, 充分灌溉玉米 VIs- K_c 模型的相关性 (R^2 最大为 0.940 1) 比水分胁迫玉米 VIs- K_c 模型的相关性 (R^2 最大为 0.083 0) 强; 生长中期至生长后期, 充分灌溉玉米 VIs- K_c 模型的相关性 (R^2 最大为 0.373 2) 比水分胁迫玉米 VIs- K_c 模型的相关性 (R^2 最大为 0.848 7) 弱。部分植被指数和作物系数相关性较强: 快速生长期充分灌溉玉米的 VIs- K_c 模型的相关性由大到小依次为: SR、EVI、VARI、GNDVI、SAVI、NDVI; 生长中期至生长后期水分胁迫玉米的 VIs- K_c 模型的相关性由大到小依次为: SR、GNDVI、VARI、NDVI、SAVI、EVI; 其中比值植被指数 SR 与作物系数 K_c 的相关性最好。结果表明采用无人机多光谱技术估算 K_c 具有一定的可行性。

关键词: 玉米; 无人机遥感; 作物系数; 植被指数; 蒸散量
中图分类号: S252; S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)07-0134-10

Estimating Method of Crop Coefficient of Maize Based on UAV Multispectral Remote Sensing

HAN Wenting^{1,2} SHAO Guomin^{1,2} MA Daijian^{1,2} ZHANG Huihui³ WANG Yi^{1,2} NIU Yaxiao^{1,2}
(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi, 712100, China
2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
3. Water Management and Systems Research Unit, USDA-ARS, Fort Collins CO 80526, USA)

Abstract: Rapid acquisition of crop coefficient K_c is the key to estimation of field evapotranspiration (ET), in order to study the feasibility and applicability of unmanned aerial vehicle (UAV) multispectral remote sensing in estimation of maize crop coefficient, based on the data of field maize in experimental station, soil and meteorology in Zhaojun Town, Dalate Qi, Inner Mongolia in 2017, by using meteorological factors and crop canopy cover to correct dual crop coefficient method at different growth stages and different water stresses. The multi-spectral (blue, green, red, red edge, near IR, 475 ~ 840 nm) images from UAV were used to calculate vegetation indices (normalized difference vegetation

收稿日期: 2018-01-16 修回日期: 2018-02-28
基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0403203)、新疆自治区科技援疆项目 (2016E02105)、西北农林科技大学学科重点建设项目 (2017-C03) 和陕西省水利科技项目 (2017SLKJ-7)
作者简介: 韩文霆 (1972—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事无人机遥感与精准灌溉技术研究, E-mail: hanwt2000@126.com

index (NDVI), soil adjusted vegetation index (SAVI), enhanced vegetation index (EVI), simple ratio (SR) and green normalized difference vegetation index (GNDVI), visible atmospherically resistant index (VARI)) of maize in different growth stages (rapid growth stage, mid-growth stage and late growth stage). Thus the model relation of VIs and crop coefficient K_c could be established, and the effect of water stress on it was studied. Results demonstrated that maize growth period and water stress were two important factors influencing the VIs - K_c model. The correlation between VIs and K_c in different growth stages was different: under full irrigation condition, the correlation of VIs - K_c model in the rapid growth stage (R^2 was 0.731 2 ~ 0.940 1, $p < 0.05$, $n = 25$) was different with the correlation of VIs - K_c model from mid to late growth stage (R^2 was 0.276 5 ~ 0.373 2, $p < 0.05$, $n = 40$); under water stress condition, the correlation of VIs - K_c model in the rapid growth stage (R^2 was 0.000 2 ~ 0.083 0, $p < 0.05$, $n = 25$) was different with the correlation of VIs - K_c model from mid to late growth stage (R^2 was 0.336 2 ~ 0.848 7, $p < 0.05$, $n = 40$). Water stress had a significant effect on the correlation of VIs - K_c model: in the rapid growth stage, the correlation of VIs - K_c model for full irrigation maize (the maximum value of R^2 was 0.940 1) was better than the correlation for water stress maize (the maximum value of R^2 was 0.083 0); from mid to late growth stage, the correlation of VIs - K_c model for full irrigation maize (the maximum value of R^2 was 0.373 2) was worse than the correlation for water stress maize (the maximum value of R^2 was 0.848 7). The correlation of part of VIs and crop coefficient K_c was good; the descending order of correlation of VIs - K_c model for full irrigated maize in the rapid growth stage was SR, EVI, VARI, GNDVI and SAVI; the descending order of correlation of the VIs - K_c model for water stress maize from mid to late growth stage was SR, GNDVI, VARI, NDVI, SAVI and EVI; the correlation of SR and crop coefficient K_c was the best. Estimation of K_c based on UAV multispectral technology was feasible.

Key words: maize; UAV remote sensing; crop coefficient; vegetation indices; evapotranspiration

0 引言

作物蒸散量 (Evapotranspiration, ET) 主要由土壤蒸发 (Evaporation) 和作物蒸腾 (Transpiration) 两部分组成^[1], 是连接生态与水文过程的重要纽带^[2], 其快速监测对准确制定和管理大田灌溉制度及提高大田灌溉用水效率有着非常关键的作用。常用的估算蒸散量的方法包括: 涡度相关法、蒸渗仪法、土壤水量平衡法、波文比能量平衡法、Penman - Monteith 模型等^[3-4]。其中 PM 模型基于能量平衡、空气动力学原理和冠层阻力来估算 ET, 具有明确的物理依据, 可以清晰地分析 ET 变化过程及影响机制^[2]。但 PM 模型计算复杂, 因此联合国粮农组织 (Food and agricultural organization, FAO) 提出了参考作物蒸散量 (Reference evapotranspiration, ET_0), 由 ET_0 和作物系数估算 ET^[5]。FAO - 56 作物系数法^[6-7]是世界公认的估算作物蒸散量方法, 具有操作简便、精度可靠、实用性强等特点, 在世界范围内被广泛应用。

目前, 国内外研究人员^[1, 3, 8-15]利用蒸渗仪数据、涡度相关数据或者水量平衡法获得作物的实际蒸散量 ET_c , 并采用气象数据获得参考蒸散量 ET_0 , 结果已证实上述方法具有很好的精度和普适性, 其中双作物系数法估算蒸散量的精度更好^[4], 冯禹等^[9]的黄土高原旱作玉米蒸散估算结果表明, 引入

叶面积指数计算覆盖度并校正双作物系数的方法能够较好地估算旱作玉米 ET ($R^2 = 0.871$)。

由于作物生长状况、气象条件和水分胁迫等因素的影响, 作物系数必须进行校正才能估算实际蒸散量^[7], 但及时发现这些外界因素造成的影响并快速调整作物系数曲线较难, 并且在时空尺度上, 田间作物用水存在差异性, 使用推荐的作物系数计算作物蒸散量误差较大。作物系数 K_c 和作物冠层光谱植被指数均受作物覆盖度、叶面积指数 LAI、绿度等因素的影响^[16-18], 此关系使遥感技术估算作物系数成为可能。李贺丽等^[4]采用地面光谱技术研究了华北平原地区小麦作物系数与植被指数 (NDVI、差值植被指数 DVI、RVI、SAVI、绿波段叶绿素指数 CI_{green} 、EVI、修正型土壤调整植被指数 MASVI 和重归一化植被指数 RDVI) 的关系以及水分和氮素胁迫对其的影响, 结果表明不同施氮水平下 K_c 无明显规律性差异, 且植被指数和 K_c 的相关性较弱。HUNSAKER 等^[8]采用地面光谱技术研究了美国西南部沙漠地区棉花充分覆盖前和充分覆盖后的基础作物系数 K_{cb} 与 NDVI 和积温 GDD 的关系。ER-RAKI 等^[19]基于地面光谱技术研究了采用摩洛哥中心干旱地区小麦的 NDVI 估算其基础作物系数 K_{cb} 和覆盖度 f_c 的方法, 结果显示植被指数与 K_{cb} 和 f_c 有很高的相关性。GONTIA 等^[20]基于卫星遥感技术研究了印度西孟加拉邦小麦植被指数 (NDVI 和

SAVI) 与其生育期内每月的作物系数 K_c 的关系。MASELLI 等^[21] 采用意大利中部地区 250 m 精度的 MODIS-NDVI 卫星影像估算其植被覆盖度并结合不同下垫面的气象站观测数据估算区域实际蒸散量。

现有研究中,地面光谱技术可以较好地估算基础作物系数 K_{cb} ,但难以估算作物系数 K_c ;卫星遥感技术可以较好地估算区域作物的作物系数,但卫星的拍摄频率和影像分辨率难以满足大田作物的日蒸散量估算要求。无人机遥感技术由于其平台构建容易、运行维护简便、分辨率高、作业周期短等特点,广泛应用于植被信息监测研究中^[22-24],为估算大田作物系数提供了新的解决方案^[25]。目前基于无人机遥感技术估算大田作物的作物系数研究较少,且准确估算水分胁迫大田作物的作物系数对制定大田灌溉制度有重要意义。基于此,本文以 2017 年内蒙古达拉特旗昭君镇实验站大田玉米、土壤、气象等数据为基础,采用经气象因子和作物覆盖度校正后的双作物系数法计算不同水分胁迫与不同生长时期玉米的作物系数,并使用自主研发的无人机多光谱系统航拍玉米的冠层多光谱影像,提取 6 种植被指数 (SR、EVI、VARI、GNDVI、SAVI 和 NDVI),研究不同生长时期 (快速生长期、生长中期和生长后期) 玉米

K_c 与 6 种常用植被指数的关系及水分胁迫对其影响,分析无人机多光谱遥感估算玉米 K_c 的可行性和适用性,为大田玉米作物系数的遥感估算研究提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 实验区概况

实验区域位于内蒙古自治区鄂尔多斯市达拉特旗昭君镇 (40°26′0.29″N, 109°36′25.99″E), 海拔 1 010 m,属于典型温带大陆性气候。实验区域玉米 (钧凯 918) 播种时间为 2017 年 5 月 20 日,出苗时间为 2017 年 6 月 1 日,抽穗时间为 2017 年 7 月 20 日,收获时间为 2017 年 9 月 7 日 (青储),生育期 (Day after planting, DAP) 共 110 d。实验数据采集时间为 2017 年 6 月 26 日—8 月 29 日,对应玉米的生长阶段见表 1。实验地块 (图 1 中圆形区域) 总面积为 1.13 hm²,播种深度约 5 cm,行距 58 cm,株距 25 cm,播种时秸秆还田,并按照当地种植习惯施底肥,出苗后根据出苗情况进行补苗,并在玉米拔节期、大喇叭口期分别追加氮肥 (240 kg/hm²)。实验阶段总降雨量为 44 mm,日平均气温 22.9℃,日平均风速 0.5 m/s,日平均相对湿度为 57.1%,日平均太阳净辐射为 145.1 W/m²。生育期内自然降雨难以

表 1 2017 年玉米生长阶段划分
Tab.1 Maize growth stage division in 2017

	生长初期	快速生长期	生长中期	生长后期
时间段	5 月 20 日—6 月 10 日	6 月 11 日—7 月 20 日	7 月 21 日—8 月 20 日	8 月 21 日—9 月 7 日
生育时期	出苗期	拔节期至大喇叭口期	抽穗期至吐丝期	成熟期

注:玉米生长阶段划分依据参考 FAO-56 指南^[7]。

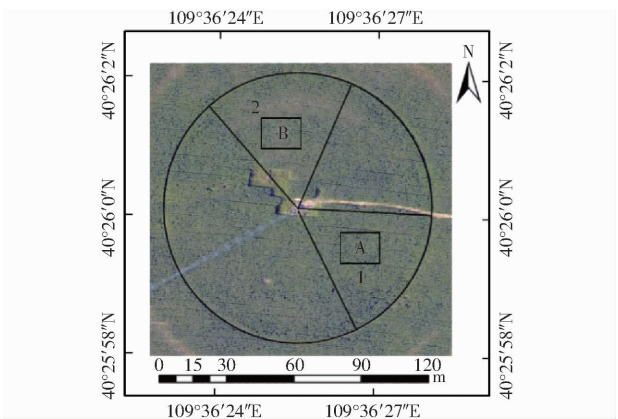


图 1 实验地俯视图 (2017-08-15, 无人机 RGB 影像, 5 cm/pixel)
Fig.1 Experimental ground view (2017-08-15, unmanned aerial vehicle RGB image, 5 cm/pixel)

满足作物需水要求,主要的水分供给方式为喷灌。实验区土壤为砂壤土,其中砂粒 (0.05 ~ 2 mm) 占 80.7%、粉粒 (0.002 ~ 0.05 mm) 占 13.7%、黏粒

(0 ~ 0.002 mm) 占 5.6%,耕层土壤有机质质量比为 47.15 g/kg,田间持水率为 29% (体积含水率),土壤容重为 1.56 g/cm³。实验地中选取 2 个扇形区域 (图 1),在区域 1 和区域 2 内分别选取一块 10 m × 10 m 的方形样地 (图 1 中 A 和 B 区域),并对样地 A 和样地 B 的玉米进行长期监测 (2017 年 6 月 26 日—8 月 29 日)。

1.2 水分胁迫处理

实验地灌溉方式和灌溉量测量方法如图 2 所示,采用中心支轴喷灌机 (图 2a) 灌溉,在玉米不同生育期进行不同的水分胁迫处理,如表 2 所示,田间持水量的 50% 为充分灌溉,采用雨量筒 (图 2b) 测量样地 A 和样地 B 的灌溉量和降雨量,每个样地内均匀放置 3 个雨量筒,取其平均值。

1.3 无人机系统及影像数据采集方法

采用自主研发的无人机多光谱影像采集系统

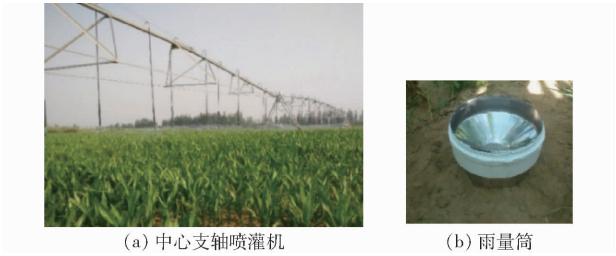


图 2 灌溉方式和灌溉量测量方法

Fig.2 Irrigation method and irrigation depth measuring method

(图 3), 该系统采用开源飞控 Pixhawk 控制, 经纬

M600 型机架,最大载量 5 kg,最大续航时间 30 min。搭载的多光谱相机(图 3b)为 RedEdge(MicaSense, USA),该相机有 5 个波段(表 3),相机焦距为 5.5 mm,视场角为 47.2°,图像分辨率为 1 280 像素 × 960 像素。该相机配备了两块 3 m × 3 m 的灰板(Group VIII, USA)(图 3c)及光强传感器(图 3d)。光强传感器可校正航拍过程中外界光线的变化对光谱影像造成的影响,灰板具有固定的反射率,如表 3 所示,可对航拍影像进行反射率校正,生成反射率影像图,并提取植被指数。

表 2 实验区实际灌溉量与降雨量

Tab.2 Actual irrigation amount and rainfall in experimental area										mm
水分处理 区域	快速生长期(DAP/d:31~61)			生长中期(DAP/d:62~92)			生长后期(DAP/d:93~101)			
	灌溉量	降雨量	总量	灌溉量	降雨量	总量	灌溉量	降雨量	总量	
1	185.2	2.8	188(100%)	93.2	38.8	132(100%)	79.2	2.8	82(100%)	
2	155.2	2.8	158(84%)	52.2	38.8	91(69%)	20.2	2.8	23(28%)	



图 3 无人机多光谱影像采集系统

Fig.3 UAV multispectral images acquisition system

表 3 RedEdge 多光谱相机参数及灰板对其中心波长的反射率

Tab.3 Multispectral camera parameters and reflectivity of gray plate to its center wavelength					
波段 编号	波段 名称	中心 波长/nm	波段宽/ nm	灰板 1 反射率/%	灰板 2 反射率/%
1	蓝	475	20	2.946	58.446
2	绿	560	20	2.945	57.958
3	红	668	10	2.993	57.339
4	近红外	840	40	3.070	56.682
5	红边	717	10	3.010	57.128

选取晴朗无云天气,于 11:00—13:00 拍摄玉米冠层多光谱影像,拍摄时镜头垂直向下,如图 4 所示,每隔 3 d 拍摄一次,飞行高度 70 m,地面分辨率为 5 cm/pixel,航向和旁向重叠度均为 80%,每次航拍采用固定航线。无人机作业时,首先飞至作业高度并拍摄地面两块灰板,然后进行航拍作业。整个生育期共采集 20 组多光谱影像数据。



图 4 无人机航拍作业现场图

Fig.4 UAV aerial photography

1.4 地面数据采集方法

(1)气象站数据采集:农业气象站由中国河北清易电子科技有限公司组装和调试,位于实验区西南 100 m 处(40°25′55.53″N,109°36′22.69″E),其下垫面为青草,草平面高度保持在 12 cm 左右。监测参数包括空气温度、相对湿度、风速、太阳净辐射和降雨量,每 30 min 采集一次数据。

(2)土壤含水率测量:采用干燥法测量实验区玉米的土壤含水率变化。在 A 和 B 样地中心点附近随机选取 3 组样点,测量 180 cm 土层含水率变化。测量时,按照 30 cm 间隔对土壤进行分层采样,每 3 d 采集 1 次,并在灌溉前、灌溉后和降雨后进行加测,取 180 cm 厚土层各采样层土壤含水率的平均值。采用线性插值法对土壤含水率进行处理,得到样地 A 和样地 B 土壤含水率的逐日数据序列。

(3)玉米生态指标观测:采用随机采样法对玉米的叶面积指数(LAI)、株高等指标进行采集,每 7 d 测量一次。在样地 A 和样地 B 内随机选取 10 个采样点,采用 LAI-2200C 型冠层分析仪测量叶面积指数(LAI),取其平均测量值;在样地 A 和样

地 B 内随机选取 10 株具有代表性的玉米,采用米尺测量株高,取其平均测量值。

1.5 作物系数与植被指数计算方法

1.5.1 FAO 双作物系数法

FAO-56^[7]中指出双作物系数法的计算流程。首先将作物的生育期分成 4 个生长阶段:生长初期、快速生长期、生长中期和生长后期;然后在 FAO-56 中查找该作物类型在标准情况下(无任何胁迫,田间管理良好,最小相对湿度为 45%,冠层上方 2 m 高度风速为 2 m/s)不同生长阶段的基础作物系数推荐值 $K_{cb,tab}$,可得到标准情况下的基础作物系数逐日曲线;标况下玉米生长初期、生长中期和生长末期的基础作物系数分别取 0.15、1.15、0.15。根据实验区气候条件、作物生理参数(作物高度、LAI 等)、土壤水分、田间管理等信息对标况下的基础作物系数曲线进行校正,并按照 FAO-56 给出的算法^[7]计算水分胁迫系数 K_s 和土壤蒸发系数 K_e ,计算公式为

$$K_s = \frac{K_{cb}}{K_{cb,a}} \tag{1}$$

$$K_e = K_c - K_s K_{cb,a} \tag{2}$$

其中

$$K_{cb,a} = K_{e,min} + (K_{cb,adjust} - K_{e,min}) [1 - \exp(-0.7L_{AI})] \tag{3}$$

$$K_{cb,adjust} = K_{cb,tab} + \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} [0.04(u_2 - 2) - 0.004(R_{H,min} - 45)] \tag{4}$$

式中 $K_{cb,adjust}$ ——不同生长阶段经气象因子校正后的基础作物系数

$K_{cb,tab}$ ——标准情况下的基础作物系数

u_2 ——不同生长阶段冠层上方 2 m 处的日平均风速, m/s

$R_{H,min}$ ——不同生长阶段日平均最小相对湿度, %

K_{cb} ——不同生长阶段经水分胁迫系数校正后的基础作物系数

h ——不同生长阶段平均株高, m

$K_{cb,a}$ ——根据作物实际覆盖度校正的基础作物系数

K_c ——作物系数

$K_{e,min}$ ——裸土最小作物系数,取值为 0.15 ~ 0.20

L_{AI} ——实测的冠层叶面积指数

1.5.2 玉米植被指数提取方法

植被指数可以对地表植被状况进行简单、有效地度量,前人研究中也使用了植被指数建立作物系数的估算模型。常用的植被指数中,NDVI 可以估

算植被的生理生态参数(覆盖度、叶面积指数、光合有效辐射等),SR 可监测植被覆盖变化且在植被覆盖浓密的情况下效果最好,SAVI 可降低土壤背景的影响,EVI 可解决植被指数易饱和的问题,VARI 可减小光照差异和大气效应的影响,GNDVI 对作物的色素变化敏感^[26-27]。因为作物系数 K_c 综合考虑了作物蒸腾和土壤蒸发两方面的影响因素,所以可监测作物系数变化情况的植被指数应能较好地反映植被和土壤的变化情况。

因此本文选取了 6 种植被指数(NDVI、SR、SAVI、EVI、VARI 和 GNDVI),其计算公式见表 4。采用 Pix4DMapper 软件平台对 RedEdge 相机拍摄的多光谱影像进行几何校正、高斯均值滤波和拼接处理,生成正射影像图,并利用灰板和光照传感器对光谱影像进行反射率校正,生成反射率影像。采用 ENVI 软件平台裁剪样地 A 和样地 B 的反射率影像,并提取上述 6 种植被指数。计算时,灰板对多光谱相机各波段中心波长的平均反射率分别作为蓝、绿、红、近红外波段的反射率。

表 4 植被指数计算公式

Tab.4 Vegetation indices

植被指数	计算公式	文献序号
归一化差值植被指数(NDVI)	$NDVI = \frac{R_{Nir} - R_{Red}}{R_{Nir} + R_{Red}}$	[28]
土壤调节植被指数(SAVI)	$SAVI = 1.5 \frac{R_{Nir} - R_{Red}}{R_{Nir} + R_{Red} + 0.5}$	[29]
增强型植被指数(EVI)	$EVI = 2.5 \frac{R_{Nir} - R_{Red}}{R_{Nir} + 6R_{Red} - 7.5R_{Blue} + 1}$	[30]
比值植被指数(SR)	$SR = \frac{R_{Nir}}{R_{Red}}$	[31]
绿度归一化植被指数(GNDVI)	$GNDVI = \frac{R_{Green} - R_{Red}}{R_{Green} + R_{Red}}$	[32]
抗大气指数(VARI)	$VARI = \frac{R_{Green} - R_{Red}}{R_{Green} + R_{Red} - R_{Blue}}$	[33]

注: R_{Blue} 、 R_{Green} 、 R_{Red} 、 R_{Nir} 分别为灰板对 RedEdge 相机蓝、绿、红、近红外波段的平均反射率。

2 结果与分析

2.1 玉米生理指标

快速生长期至生长后期样地 A 和样地 B 玉米株高和 LAI 如图 5 和图 6 所示。

图 5 中,样地 A 和样地 B 在快速生长期玉米高度逐渐增大,且两样地的株高差异较小,生长中期达到最大值,最大高度分别为 273 cm 和 268 cm。图 6 中,样地 A 和样地 B 在快速生长期玉米 LAI 逐渐增大;生长中期两样地的 LAI 都先增大再减小,样地 A 和样地 B 玉米 LAI 最大值分别为 3.07 和 2.70,两

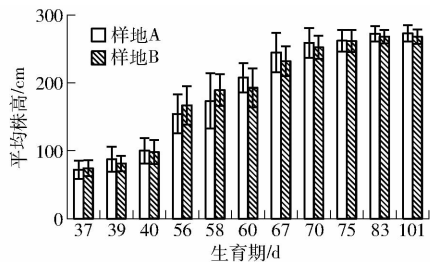


图 5 样地 A 和样地 B 玉米株高变化

Fig. 5 Variation of maize height in sample fields A and B

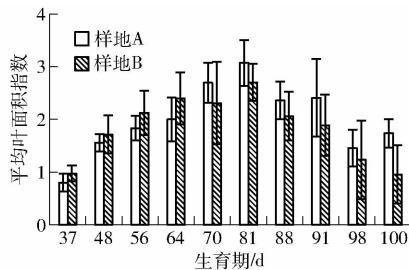


图 6 样地 A 和样地 B 玉米 LAI 变化

Fig. 6 Variation of maize LAI in sample fields A and B

样地 LAI 的整体变化规律符合作物的生长规律;生长中期和生长后期由于样地 B 的灌溉频率和灌溉量小于样地 A 的值,样地 B 出现水分胁迫,所以样地 B 的 LAI 小于样地 A 的值。

2.2 植被指数

快速生长期至生长后期样地 A 和样地 B 玉米植被指数如图 7 和图 8 所示。

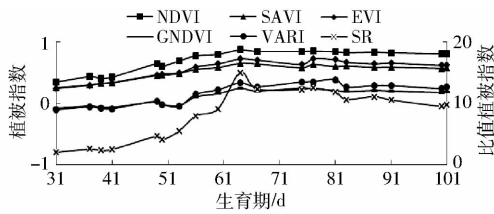


图 7 样地 A 植被指数变化曲线

Fig. 7 Curves of vegetation indices in sample field A

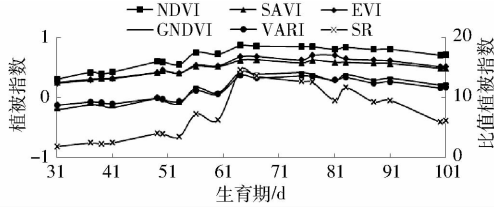


图 8 样地 B 植被指数变化曲线

Fig. 8 Curves of vegetation indices in sample field B

由图 7 和图 8 可知,样地 A 和样地 B 在快速生长期植被指数逐渐增大,生长中期和后期植被指数 NDVI、EVI、SAVI、GNDVI、VARI 有缓慢降低趋势,植被指数 SR 有较大的减小趋势;生长中期和后期,水分胁迫使得样地 B 的叶面积指数小于样地 A,植被指数 SR 对作物的覆盖度变化比较敏感,因此样地 B 的植被指数 SR 比样地 A 减小幅度大。

2.3 作物系数

快速生长期至生长后期样地 A 和样地 B 玉米的基础作物系数 K_{cb} 、土壤蒸发系数 K_e 、水分胁迫系数 K_s 和作物系数 K_c 的逐日变化曲线如图 9 所示。

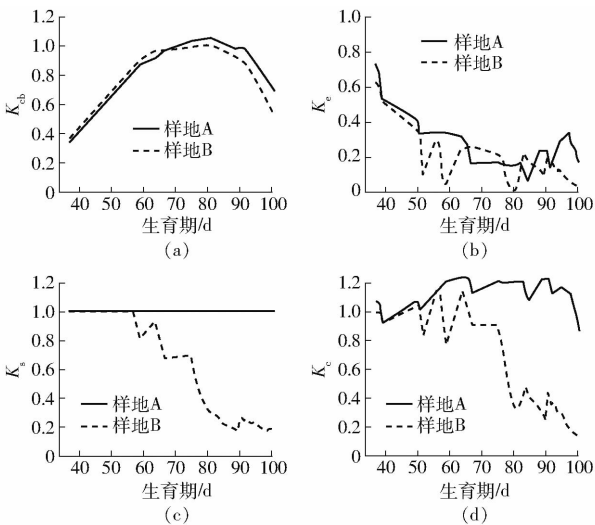


图 9 快速生长期至生长后期作物系数逐日变化曲线

Fig. 9 Curves of daily crop coefficient from rapid growth stage to late growth stage

图 9a 中,样地 A 和样地 B 玉米基础作物系数 K_{cb} 在快速生长期逐渐增大,生长中期 K_{cb} 达到稳定的较大值,生长后期 K_{cb} 逐渐降低,该变化规律主要由于作物覆盖度变化所致;生长中期和生长后期,由于水分胁迫的影响,样地 B 的作物蒸腾受限,所以其 K_{cb} 小于样地 A 的值;生长中期和后期的 K_{cb} 变化是土壤水分条件和作物长势状况等因素综合影响的结果。图 9b 中,快速生长期和生长中期土壤蒸发系数 K_e 逐渐减小,主要由于作物覆盖度增大限制了土壤蒸发所致;生长后期样地 A 的 K_e 有增大趋势,样地 B 的 K_e 逐渐减小,主要原因在于生长后期作物覆盖度逐渐降低,充分灌溉条件下有利于土壤蒸发,水分胁迫会限制土壤蒸发;生长后期的 K_e 变化也是土壤水分条件和作物长势状况等因素综合影响的结果; K_e 出现的波动变化主要因为灌溉调整土壤含水率所致。图 9c 中,快速生长期至生长后期,由于样地 A 无水分胁迫,所以其水分胁迫系数 K_s 保持不变,样地 B 有水分胁迫,随着作物蒸腾和土壤蒸发,其水分胁迫系数逐渐降低。图 9d 中,样地 A 的作物系数 K_c 在快速生长期逐渐增大,生长中期保持相对稳定的较大值,生长后期逐渐减小,此变化规律和 FAO-56 中标准况下的 K_c 值变化情况基本相符。样地 B 的 K_c 在快速生长期有一定的波动变化,是水分胁迫和土壤蒸发综合作用结果;生长中期和生长后期作物系数 K_c 开始快速下降,主要由于较长时间的

水分胁迫(表2)使得水分胁迫系数 K_s 持续下降所致。上述结果与冯禹等^[9]在黄土高原东部地区春玉米试验结果较为一致。

2.4 玉米植被指数与 K_c 关系模型

快速生长期样地A和样地B玉米植被指数与作物系数 K_c 的关系如图10、11所示。

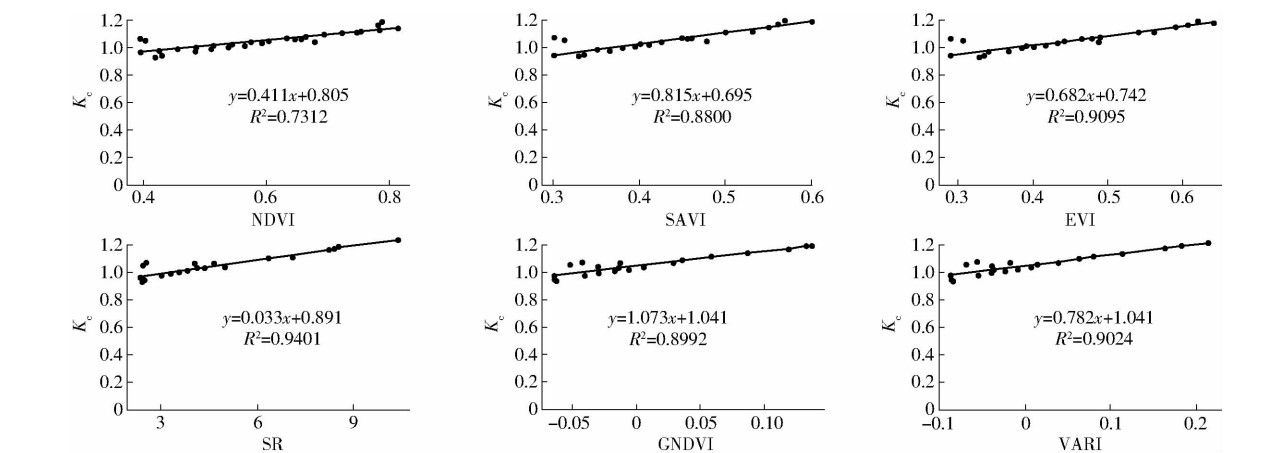


图10 快速生长期样地A植被指数与作物系数 K_c 的关系($n=25$)

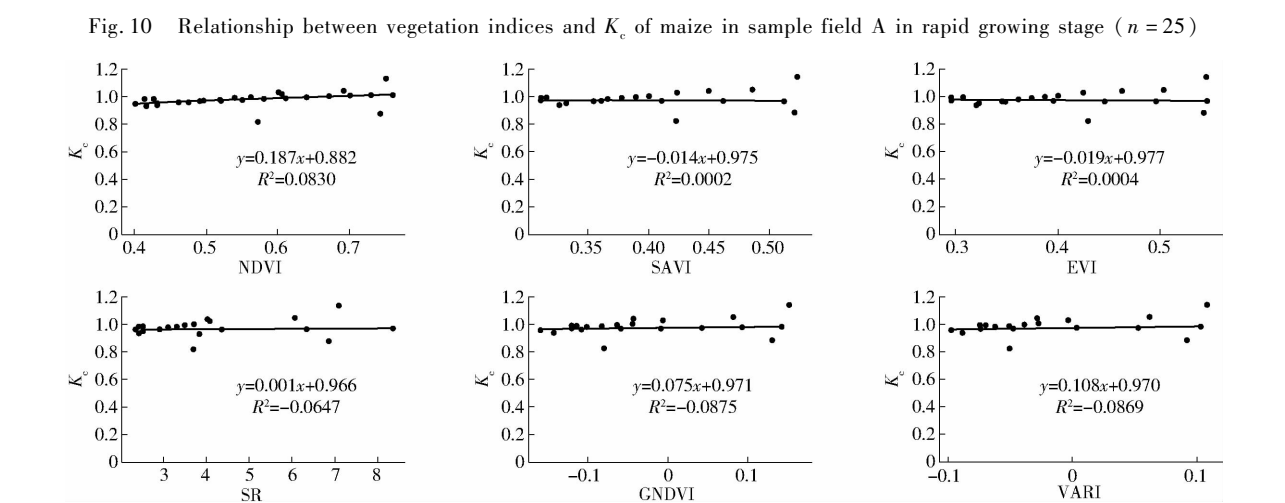


图11 快速生长期样地B植被指数与作物系数 K_c 的关系($n=25$)

由图10、11可知,快速生长期样地A玉米植被指数与作物系数 K_c 的相关性较强(R^2 为0.7312~0.9401, $p<0.05$, R_{MSE} 为0.0250~0.0530, $n=25$),见表5,其中比值植被指数SR与 K_c 的相关性最好。主要原因在于快速生长期玉米的植被指数(图7)逐渐增大,灌溉充足玉米的 K_c 也逐渐增大,因此植被指数和作物系数具有较好的相关性。样地B玉米植被指数和作物系数 K_c 相关性较弱(R^2 为0.0002~0.0830),因为快速生长期样地B在水分胁迫和作物覆盖度变化的影响下其 K_c 波动较大,使得 K_c 波动也较大,而植被指数变化趋势较平滑(图8),所以两者相关性较弱。

表5 快速生长期样地A玉米植被指数与作物系数 K_c 的关系

Tab.5 Relationship between vegetation indices and K_c of maize in sample field A in rapid growing stage				
因变量 Y	自变量 x	拟合关系式	R^2	R_{MSE}
K_c	NDVI(0.3495~0.8021)	$Y=0.411x+0.805$	0.7312	0.0530
	SAVI(0.2554~0.5849)	$Y=0.815x+0.695$	0.8800	0.0354
	EVI(0.2376~0.6439)	$Y=0.682x+0.742$	0.9095	0.0308
	SR(2.0744~9.1068)	$Y=0.033x+0.891$	0.9401	0.0250
	GNDVI(-0.0782~0.1575)	$Y=1.073x+1.041$	0.8992	0.0324
	VARI(-0.1019~0.2190)	$Y=0.782x+1.041$	0.9024	0.0319

生长中期至生长后期样地A和样地B玉米植被指数与作物系数 K_c 的关系如图12、13所示。由图12、13可知,生长中期至生长后期样地A玉米植被指数与作物系数 K_c 相关性(R^2 为0.2765~

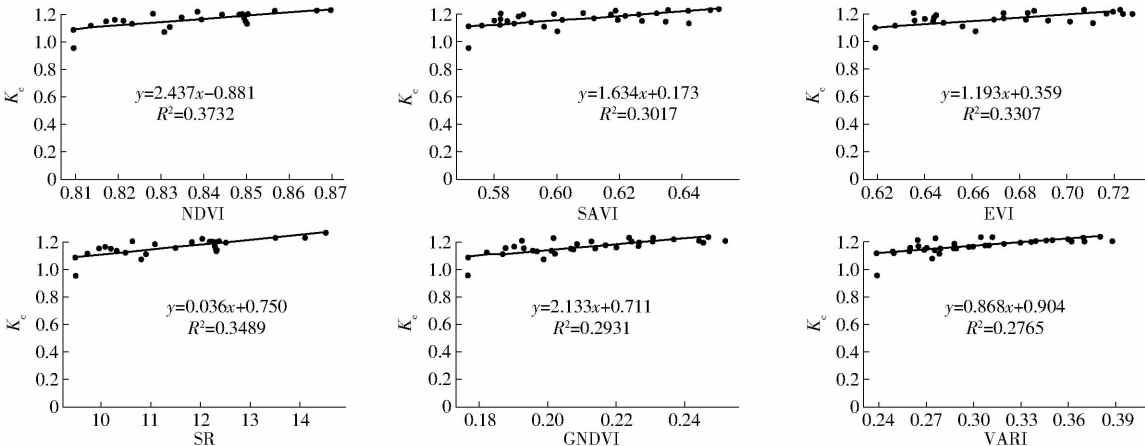


图 12 生长中期至生长后期样地 A 植被指数与作物系数 K_c 的关系 ($n=40$)

Fig. 12 Relationship between vegetation indices and K_c of maize in sample field A from middle growing stage to later growing stage ($n=40$)

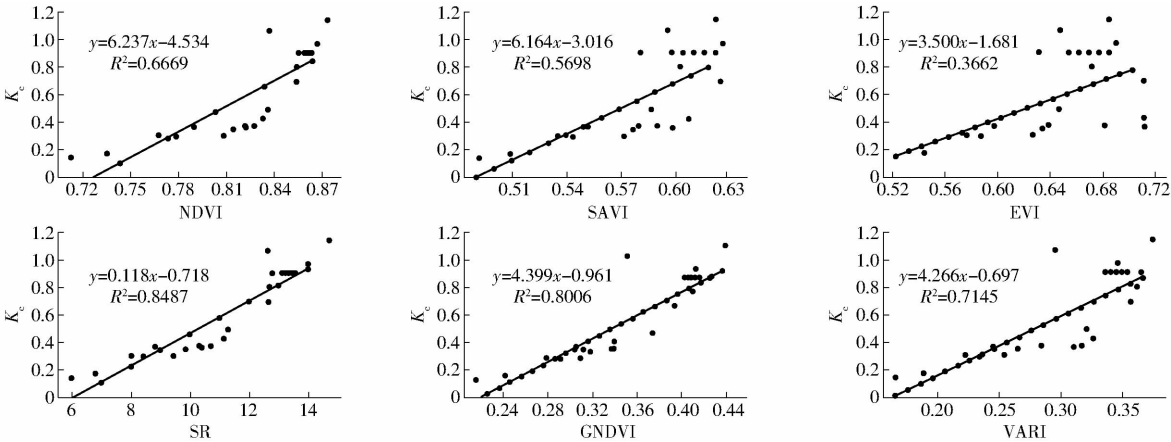


图 13 生长中期至生长后期样地 B 植被指数与作物系数 K_c 的关系 ($n=40$)

Fig. 13 Relationship between vegetation indices and K_c of maize in sample field B from middle growing stage to later growing stage ($n=40$)

0.373 2) 较弱, 因为生长中期至生长后期样地 A 玉米的覆盖度较高, 植被指数已达到饱和, 对作物系数变化不敏感, 所以两者的相关性较弱。样地 B 部分植被指数与作物系数 K_c 的相关性 (R^2 为 0.366 2 ~

0.848 7, $p < 0.05$, R_{MSE} 为 0.114 2 ~ 0.233 8, $n=40$) 较强, 见表 6, 主要因为该生长中期至生长后期样地 B 有水分胁迫, 玉米覆盖度逐渐减小, 部分植被指数减小趋势较明显, 所以两者相关性较高。

表 6 生长中期至生长后期样地 B 植被指数与作物系数 K_c 的关系

Tab. 6 Relationship between vegetation indices and crop coefficient K_c of maize in sample field B from middle growing stage to later growing stage

因变量 Y	自变量 x	拟合关系式	R^2	R_{MSE}
K_c	NDVI(0.713 1 ~ 0.872 4)	$Y = 6.237x - 4.534$	0.666 9	0.169 5
	SAVI(0.489 5 ~ 0.629 4)	$Y = 6.164x - 3.016$	0.569 8	0.192 6
	EVI(0.526 6 ~ 0.711 9)	$Y = 3.500x - 1.681$	0.366 2	0.233 8
	SR(5.970 5 ~ 14.669 7)	$Y = 0.118x - 0.718$	0.848 7	0.114 2
	GNDVI(0.215 9 ~ 0.438 4)	$Y = 4.399x - 0.961$	0.800 6	0.131 1
	VARI(0.166 0 ~ 0.373 8)	$Y = 4.266x - 0.697$	0.714 5	0.156 9

由以上可知, 不同生长时期玉米的比值植被指数 (SR) 和作物系数相关性最好 (R^2 最大为 0.940 1, $p < 0.05$, $R_{MSE} = 0.025 0$, $n=25$), 本研究相对于前人研究取得了较好的结果, 李贺丽等^[4] 基于地面光谱

技术建立小麦的 VIs - K_c 模型, 决定系数 R^2 最大为 0.15, $p < 0.01$, $n=195$, PARK 等^[34] 基于卫星遥感技术建立 NDVI、LAI 和土壤含水率与 K_c 模型, 决定系数 R^2 最大为 0.64。本文采用的水分胁迫程度较大,

模型的适用性有待进一步验证,后期实验应划分多个水分胁迫水平,对多种水分胁迫玉米的 K_c 估算精度进行评价。时间上非连续采集土壤含水率,对模型也存在一定的影响。目前水分胁迫的监测手段有热红外影像^[35]、地面传感器网络等。后期实验可同时采集多光谱影像和热红外影像数据,并搭建地面传感器网络连续监测作物、土壤等相关参数,对大田玉米作物系数的无人机遥感技术估算模型进一步修正。

3 结论

(1)采用无人机多光谱技术估算 K_c 具有一定的可行性。在快速生长期充分灌溉和生长后期水分胁迫条件下,均可以采用无人机多光谱技术估算玉米作物系数 K_c 。

(2)不同时期玉米的植被指数和作物系数的相关性不同。快速生长期充分灌溉玉米的 $VI_s - K_c$ 模型的相关性 (R^2 为 0.731 2 ~ 0.940 1, $p < 0.05$, R_{MSE} 为 0.025 0 ~ 0.053 0, $n = 25$) 与生长中期至生长后期充分灌溉玉米的 $VI_s - K_c$ 模型的相关性 (R^2 为 0.276 5 ~ 0.373 2, $p < 0.05$, R_{MSE} 为 0.073 8 ~ 0.079 3, $n = 40$) 不同;快速生长期水分胁迫玉米的 $VI_s - K_c$ 模

型的相关性 (R^2 为 0.000 2 ~ 0.083 0, $p < 0.05$, R_{MSE} 为 0.099 4 ~ 0.114 4, $n = 25$) 与生长中期至生长后期水分胁迫玉米 $VI_s - K_c$ 模型的相关性 (R^2 为 0.366 2 ~ 0.848 7, $p < 0.05$, R_{MSE} 为 0.114 2 ~ 0.233 8, $n = 40$) 不同。

(3)不同水分胁迫玉米的植被指数和作物系数的相关性不同。快速生长期充分灌溉玉米的 $VI_s - K_c$ 模型相关性 (R^2 为 0.731 2 ~ 0.940 1, $p < 0.05$, $n = 25$) 比水分胁迫玉米的 $VI_s - K_c$ 模型的相关性 (R^2 为 0.000 2 ~ 0.083 0, $p < 0.05$, $n = 25$) 强;生长中期至生长后期充分灌溉玉米的 $VI_s - K_c$ 模型相关性 (R^2 为 0.276 5 ~ 0.373 2, $p < 0.05$, $n = 40$) 比水分胁迫玉米的 $VI_s - K_c$ 模型相关性 (R^2 为 0.366 2 ~ 0.848 7, $p < 0.05$, $n = 40$) 弱。

(4)不同植被指数和作物系数相关性不同,比值植被指数 SR 与作物系数 K_c 的相关性最好。快速生长期充分灌溉玉米的 $VI_s - K_c$ 模型的相关性由大到小依次为:SR、EVI、VARI、GNDVI、SAVI、NDVI;生长中期至生长后期水分胁迫玉米的 $VI_s - K_c$ 模型的相关性由大到小依次为:SR、GNDVI、VARI、NDVI、SAVI、EVI;其中比值植被指数 SR 与作物系数 K_c 的相关性最好。

参 考 文 献

- 1 PHOGAT V, SIMUNEK J, SKEWES M, et al. Improving the estimation of evaporation by the FAO-56 dual crop coefficient approach under subsurface drip irrigation [J]. Agriculture Water Management, 2016, 178: 189-200.
- 2 张宝忠, 许迪, 刘钰, 等. 多尺度蒸散发估测与时空尺度拓展方法研究进展[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 8-16.
- 3 ZHANG Baozhong, XU Di, LIU Yu, et al. Review of multi-scale evapotranspiration estimation and spatio-temporal scale expansion [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 8-16. (in Chinese)
- 4 TAYLOR N J, MAHOHOMA W, VAHRMEIJER J T, et al. Crop coefficient approaches based on fixed estimates of leaf resistance are not appropriate for estimating water use of citrus [J]. Irrigation Science, 2015, 33: 153-166.
- 5 李贺丽, 罗毅, 赵春江, 等. 基于冠层光谱植被指数的冬小麦作物系数估算[J]. 农业工程学报, 2013, 29(20): 118-127.
- 6 LI Heli, LUO Yi, ZHAO Chunjiang, et al. Estimating crop coefficients of winter wheat based on canopy spectral vegetation indices [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(20): 118-127. (in Chinese)
- 7 ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration [C]//FAO Irrigation and Drainage Paper NO.56, 1998.
- 8 DOORENBOS J, PRUITT W O. Crop water requirement [C]. FAO, 1977.
- 7 JENSEN M E, ALLEN R G. Evaporation, evapotranspiration, and irrigation water requirements [M]. 2nd ed. ASCE Task Committee on Revision of Manual 70, 2016.
- 8 HUNSAKER D J, JR P J P, BARNES E M, et al. Estimating cotton evapotranspiration crop coefficients with a multispectral vegetation index [J]. Irrigation Science, 2003, 22: 95-104.
- 9 冯禹, 崔宁博, 龚道枝, 等. 基于叶面积指数改进双作物系数法估算旱作玉米蒸散[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9): 90-98.
- 10 FENG Yu, CUI Ningbo, GONG Daozhi, et al. Estimating rainfed spring maize evapotranspiration using modified dual crop coefficient approach based on leaf area index [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(9): 90-98. (in Chinese)
- 10 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/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 154-162. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160620&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.020.
- 11 TONG Guodong, LIU Honglu, LI Fahu, et al. Reliability evaluation of dual crop coefficient approach on evapotranspiration calculation of peach tree in North China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 154-162. (in Chinese)
- 11 宿梅双, 李久生, 饶敏杰. 基于称重式蒸渗仪的喷灌条件下冬小麦和糯玉米作物系数估算方法[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 25-29.
- 12 SU Meishuang, LI Jiusheng, RAO Minjie. Estimation of crop coefficients for sprinkler-irrigated winter wheat and sweet corn using a weighing lysimeter [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(8): 25-29. (in Chinese)
- 12 HUNSAKER D, JR P, KIMBALL B. Wheat basal crop coefficients determined by normalized difference vegetation index [J]. Irrigation Science, 2005, 24(1): 1-14.

- 13 ANDERSON R G, ALFIERI J G, TIRADO-CORBALÁ R, et al. Assessing FAO-56 dual crop coefficients using eddy covariance flux partitioning [J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 179: 92-102.
- 14 汪顺生, 费良军, 高传昌, 等. 不同沟灌方式下夏玉米单作物系数试验研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(11): 105-111. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131119&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.11.019.
- WANG Shunsheng, FEI Liangjun, GAO Chuanchang, et al. Experiment on single crop coefficient of summer maize under different furrow irrigations [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(11): 105-111. (in Chinese)
- 15 刘钰, PEREIRA L S. 对 FAO 推荐的作物系数计算方法的验证[J]. *农业工程学报*, 2000, 16(5): 26-30.
- LIU Yu, PEREIRA L S. Validation of FAO methods for estimating crop coefficients [J]. *Transactions of the CSAE*, 2000, 16(5): 26-30. (in Chinese)
- 16 DEJONGE K C, ASCOUGH J C, ANDALES A A, et al. Improving evapotranspiration simulations in the CERES-Maize model under limited irrigation [J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 115(Supp. C): 92-103.
- 17 刘海军, 康跃虎. 冬小麦拔节抽穗期作物系数的研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(10): 52-56.
- LIU Haijun, KANG Yuehu. Calculation of crop coefficient of winter wheat at elongation-heading stages [J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(10): 52-56. (in Chinese)
- 18 DUCHEMIN B, HADRIA R, ERRAKI S, et al. Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: on the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices [J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 79(1): 1-27.
- 19 ER-RAKI S, CHEHBOUNI A, GUEMOURIA N, et al. Combining FAO-56 model and ground-based remote sensing to estimate water consumptions of wheat crops in a semi-arid region [J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 87(1): 41-54.
- 20 GONTIA N K, TIWARI K N. Estimation of crop coefficient and evapotranspiration of wheat (*Triticum aestivum*) in an irrigation command using remote sensing and GIS [J]. *Water Resources Management*, 2010, 24(7): 1399-1414.
- 21 MASELLI F, PAPAIE D, CHIESI M, et al. Operational monitoring of daily evapotranspiration by the combination of MODIS NDVI and ground meteorological data: application and evaluation in Central Italy [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 152(Supp. C): 279-290.
- 22 韩文霆, 郭聪聪, 张立元, 等. 基于无人机遥感的灌区土地利用与覆被分类方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(11): 270-277. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161137&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.037.
- HAN Wenting, GUO Congcong, ZHANG Liyuan, et al. Classification method of land cover and irrigated farm land use based on UAV remote sensing in irrigation [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(11): 270-277. (in Chinese)
- 23 韩文霆, 张立元, 张海鑫, 等. 基于无人机遥感与面向对象法的田间渠系分布信息提取[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(3): 205-214. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170326&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.026.
- HAN Wenting, ZHANG Liyuan, ZHANG Haixin, et al. Extraction method of sublateral canal distribution information based on UAV remote sensing [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(3): 205-214. (in Chinese)
- 24 韩文霆, 李广, 苑梦婵, 等. 基于无人机遥感技术的玉米种植信息提取方法研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(1): 139-147. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170118&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.018.
- HAN Wenting, LI Guang, YUAN Mengchan, et al. Extraction method of maize planting information based on UAV remote sensing technology [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(1): 139-147. (in Chinese)
- 25 汪沛, 罗锡文, 周志艳, 等. 基于微型无人机的遥感信息获取关键技术综述[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(18): 1-12.
- WANG Pei, LUO Xiwen, ZHOU Zhiyan, et al. Key technology for remote sensing information acquisition based on micro UAV [J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(18): 1-12. (in Chinese)
- 26 虞连玉, 蔡焕杰, 姚付启, 等. 植被指数反演冬小麦植被覆盖度的适用性研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(1): 231-239. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150133&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.033.
- YU Lianyu, CAI Huanjie, YAO Fuqi, et al. Applicability of vegetation indices to estimate fractional vegetation coverage [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(1): 231-239. (in Chinese)
- 27 田庆久, 闵祥军. 植被指数研究进展[J]. *地球科学进展*, 1998, 13(4): 10-16.
- TIAN Qingjiu, MIN Xiangjun. Advances in study on vegetation indices [J]. *Advance in Earth Sciences*, 1998, 13(4): 10-16. (in Chinese)
- 28 BANNARI A, MORIN D, BONN F, et al. A review of vegetation indices [J]. *Remote Sensing Reviews*, 1995, 13(1-2): 95-120.
- 29 HUETE A R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 25(3): 295-309.
- 30 WANG Z, LIU C, HUETE A. From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI: advances in vegetation index research [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 979-987.
- 31 CHEN J M. Evaluation of vegetation indices and a modified simple ratio for boreal applications [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1996, 22(3): 229-242.
- 32 WANG F, HUANG J, TANG Y, et al. New vegetation index and its application in estimating leaf area index of rice [J]. *Rice Science*, 2007, 14(3): 195-203.
- 33 SCHNEIDER P, ROBERTS D A, KYRIAKIDIS P C. A VARI-based relative greenness from MODIS data for computing the Fire Potential Index [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(3): 1151-1167.
- 34 PARK J, BAIK J, CHOI M. Satellite-based crop coefficient and evapotranspiration using surface soil moisture and vegetation indices in Northeast Asia [J]. *CATENA*, 2017, 156(Supp. C): 305-314.
- 35 BALUJA J, DIAGO M P, BALDA P, et al. Assessment of vineyard water status variability by thermal and multispectral imagery using an unmanned aerial vehicle (UAV) [J]. *Irrigation Science*, 2012, 30(6): 511-522.