

基于冠层光谱植被指数的冬小麦作物系数估算

李贺丽^{1,2,3}, 罗毅^{2*}, 赵春江¹, 杨贵军¹

(1. 北京农业信息技术研究中心, 北京市农林科学院, 北京 100097; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院遥感与数字地球研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101)

摘要: 目前针对局地气候条件下某一作物类型的作物系数及其年际变化已开展了较多分析, 但适于区域尺度运用的作物系数估算方法的研究还比较缺乏, 这是将 FAO 56 作物系数法成功应用于区域作物实际蒸散量估算的关键环节。该文基于 2008—2009 和 2009—2010 年度 2 个冬小麦生长季的大田试验数据, 研究了作物系数 (K_c)、基本作物系数 (K_{cb}) 与 8 种常用冠层光谱植被指数 (VIs) 的相关关系以及水分和氮素胁迫对其的影响, 分析了基于 VIs 估算作物 K_c 、 K_{cb} 的可行性, 并对其估算精度进行了验证。结果表明, 高氮水平下 K_{cb} 较大而土壤蒸发系数 (K_e) 较小, 低氮水平下 K_{cb} 较小而 K_e 较大, 不同施氮水平下 K_c 无明显规律性差异。冬小麦 K_c 与 VIs 相关性较弱 (决定系数 $R^2=0.094\sim 0.150$, $p<0.01$, $n=195$), 而 K_{cb} 与 VIs 则具有很强的相关性 (决定系数 $R^2=0.511\sim 0.685$, $p<0.01$, $n=195$); 施氮水平不影响 K_{cb} -VIs 关系, 而不足以使冠层光谱出现明显表征的水分胁迫可使 K_{cb} -VIs 相关关系减弱。利用 VIs 估算的冬小麦实际生长条件下的 K_{cb} 值与 FAO 56 确定的 K_{cb} 值均具有很好的线性回归关系 ($R^2=0.765\sim 0.864$, $n=150$), 其中增强型植被指数 (EVI) 的估算精度最好。但在不足以使冠层光谱出现明显表征的水分胁迫条件下, 利用该法可能会产生较大误差, 还需要结合其他途径获取的水分胁迫信息来准确确定。

关键词: 估算, 试验, 氮, 作物系数, 冬小麦, 植被指数

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.20.017

中图分类号: S181; TP79

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-20-0118-10

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.

Li Heli, Luo Yi, Zhao Chunjiang, et al. Estimating crop coefficients of winter wheat based on canopy spectral vegetation indices[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(20): 118-127. (in Chinese with English abstract)

0 引言

作物蒸散量 (ET_{crop}) 是农田水循环过程中一个极其重要的参数, 其精确测量或估算对土壤水平衡分析、科学灌溉制度的确定以及农业水资源高效利用与管理等都非常关键。目前常用的确定方法有: 蒸渗仪法、热脉冲技术、热量平衡法、波文比能量平衡法、涡度相关技术、土壤水量平衡法、FAO 56 作物系数法等^[1]。其中, FAO 56 作物系数法^[2]由于易于操作、精度可靠、实用性强, 同时可将作物蒸腾量和土壤蒸发量分离开来, 在世界范围内已被普

遍采用^[3-6], 包括单作物系数法 (式 1) 和双作物系数法 (式 2):

$$ET_{crop} = K_c \cdot ET_0 \quad (1)$$

$$ET_{crop} = (K_{cb} + K_e) \cdot ET_0 \quad (2)$$

其中 $K_{cb} \cdot ET_0 = T_c$, $K_e \cdot ET_0 = E_s$, $K_{cb} + K_e = K_c$ 。式中, ET_{crop} 为作物实际蒸散量, 包括作物蒸腾量 (T_c) 与土壤蒸发量 (E_s) 2 个组分。最适宜条件下的 ET_{crop} 数值即为作物潜在蒸散量或作物需水量。 ET_0 为参照作物蒸散量, 该参照作物表面类似于水分充足、生长旺盛、高度一致 (0.12 m)、叶面阻力为 70 s/m、反射率为 0.23、完全覆盖地表的开阔绿草地; 利用 FAO 56 Penman-Monteith 修正公式计算, 其数值大小仅取决于当地气象条件, 与实际作物生长状况无关。 K_c 为作物系数, 它反映了作物实际蒸散量与参照作物蒸散量的差异, 其数值大小与作物类型、作物生长阶段、冠层高度和结构、地表覆盖度、当地气候条件以及田间农艺管理措施等因素有关。单作物系数法利用 K_c 表征了作物蒸腾与土壤蒸发 2 类因素的综合影响; 双作物系数法则将二者分开考虑, 用基本作物系数 (K_{cb}) 表征作物蒸腾

收稿日期: 2013-04-12 修订日期: 2013-09-12

基金项目: 国家自然科学基金 (41201421), 北京市自然科学基金 (6132015), 中国博士后科学基金 (2013T60081), 北京市博士后工作经费和北京市农林科学院博士后科研基金资助。

作者简介: 李贺丽 (1982-), 女, 河南遂平县人, 博士, 主要从事农业生态遥感方面的研究。北京 北京农业信息技术研究中心, 100097。Email: lhl237666@126.com

*通信作者: 罗毅 (1966-), 男, 河南省罗山县人, 研究员, 博士生导师, 主要从事农业生态水文方面研究。北京 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 100101。

Email: luoyi.cas@hotmail.com

因素的影响，而用土壤蒸发系数 (K_e) 来表征土壤蒸发因素的影响。

目前针对局地气候条件下某一作物类型作物系数的大小及其年际变化规律已开展了较多的研究分析^[2,7-12]，但适于区域尺度运用的作物系数估算方法研究还比较少，这是利用 FAO 56 作物系数法高效估算区域作物实际蒸散发的关键环节，其对区域尺度农田水分平衡和水资源合理配置与利用具有重要意义。鉴于作物系数和冠层光谱植被指数均受地表覆被比例、叶面积指数 (LAI)、绿度等因素的影响^[4,6,13]，此联系为作物系数的区域遥感估算提供了可能，可快速获取实际生长状况下作物系数的动态变化与田块间的差异^[3]。目前已有研究基于站点和卫星遥感数据或模型模拟结果 (热量平衡模型和冠层辐射传输模型) 探讨了不同土地覆被类型 (森林、草地或灌溉作物等) 正常条件下作物系数与植被指数的关系^[4,14-17]，而基于大田试验数据 (尤其是存在胁迫的情况) 的检验与比较研究还很缺乏。鉴于此，本文通过收集冬小麦氮肥处理试验的相关数据 (2008—2009 和 2009—2010 年度 2 个生长季)，研究了作物 K_c 、 K_{cb} 与冠层光谱植被指数的关系以及水分和氮素胁迫对其的影响，分析了基于冠层植被指数估算 K_c 、 K_{cb} 的可行性，并利用独立数据系列对多种植被指数的估算精度进行了对比评价，以期为区域作物系数的遥感估算提供方法支撑，并为实现 FAO 56 作物系数法的区域应用 (即区域作物蒸散或蒸腾量估算) 提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验概况

田间试验在中国科学院禹城综合试验站实施 (36.8°N, 116.6°E)。该站位于华北平原粮食主产区，平均海拔约 20 m。土壤属潮土，成土母质为黄河冲积物，质地以粉砂和轻壤土为主，pH 值 8.5 左右，有机质质量分数为 0.6%~1.0%，肥力中等。冬小麦于当年 10 月中旬播种，次年 6 月 10 号左右收获。根据冬小麦全生育期内氮肥 (N) 施用量，设置了多年连续 (2005—2010 年) 试验，包括 5 种处理：① 空白，不施氮肥 (N0)；② 总生育期内施氮肥 70 kg/hm² (N70)；③ 总生育期内施氮肥 140 kg/hm² (N140)；④ 总生育期内施氮肥 210 kg/hm² (N210)；⑤ 总生育期内施氮肥 280 kg/hm² (N280)。氮肥分 2 次施用，播种底肥和返青追肥各施用一半的肥量。每种处理含 3 个重复，小区采用随机分布。小区规格参照 FAO 56 田间试验标准，大小设计为 5 m×10 m，四周内壁采用水泥衬砌，不透水；小区底部无封底措施，水分可向下渗漏，与地下水含水层存

在水力联系。施用返青追肥时，对各个小区进行灌溉，灌溉量均为 50 mm。此外，各处理磷 (P)、钾 (K) 水平一致 (P₂O₅ 为 100 kg/hm²；K₂O 为 50 kg/hm²)，其他栽培管理措施与当地农户保持一致。本文采用的数据来自 2008—2009 和 2009—2010 年度 2 个冬小麦生长季。需要指出的是，2008—2009 冬小麦生长季，在 50 mm 灌溉量 (上述) 和 238 mm 累积降水量的条件下，各区土壤水分条件较好，基本满足作物需求；2009—2010 冬小麦生长季，灌溉相同，但累积降水量仅 111 mm，尚不及常规年份降水量的 50%，致使各区土壤水分在 3 月下旬至 4 月初、5 月及其后时段存在供给不足的情况，出现水分胁迫。

1.2 数据收集

1) 小气候观测：试验站内设有自动气象站观测系统 (MLOS 520, VAISALA, 芬兰) 和人工气象观测场，观测项目包括太阳辐射、相对湿度、气温、风速、降水量等。上述 2 套气象采集系统保证了本文所用气象数据的可靠性。

2) 土壤水分监测：采用中子仪观测冬小麦生育期的土壤水分动态。每个小区设置 3 个观测孔，观测土层深度为 1.5 m。测定时，按照 10 cm 厚度间隔对整个土壤剖面实施分层观测。每 5 d 观测 1 次，并在灌水前、后和降水后实施加测。最后采用三次样条函数插值方法对测得的土壤水分数据进行插值处理，得到各小区土壤水分的逐日数据序列。

3) 冬小麦生态指标观测：自冬小麦返青至收获期间，采用田间采样调查法对冬小麦叶面积指数 LAI、株高等指标实施连续观测，每 7 d 测定 1 次。测定 LAI 时，取 20 cm 行长植株样本，采用 LI-3000C 面积仪 (LI-COR, 美国) 测定样本的总叶面积，叶面积指数再根据取样面积计算得到。株高测定是在各小区内随机选取多个测点读取 30 个株高数值再取其平均。最后采用三次样条函数插值方法对测得的 LAI 和株高数据进行插值处理，得到冬小麦 LAI 与株高自返青至收获期间的逐日数据序列。

4) 冬小麦冠层光谱观测：采用 Field Spec Handheld 野外光谱仪 (ASD, 美国) 收集冬小麦冠层光谱数据，每周测定 1 次。该光谱仪测定范围为 325~1075 nm，视场角为 25°。测定选取晴好天气，于每个观测日正午 90 min 内完成。每个小区取 3 个测点，观测前先执行暗电流采集、优化和已知反照率特性的参考白板的光谱采集等操作，然后在每个测点处按照最优时间间隔读取 5 个光谱数据，取其均值。2008—2009 季从冬小麦拔节开始观测，至收获共收集 10 期数据；2009—2010 季从冬小麦返青前一周开始观测，直收获共收集 13 期数据。

1.3 作物系数的确定

FAO 56 指南^[2]详尽地给出了单作物系数法中 K_c 、双作物系数法中 K_{cb} 和 K_e ($K_c=K_{cb}+K_e$) 的计算程序, 针对某一具体作物, 大致可分为 3 个步骤来确定其作物系数: 1) 划分作物生长阶段 (生长初期、快速生长期、生长中期、生长衰退期和生长末期); 2) 查找 FAO 56 表 12 和 17 中该作物类型在标准状况下 (无任何胁迫、田间管理优良、最小相对湿度 $\approx 45\%$, 2 m 高度风速 ≈ 2 m/s) 生长初期、生长中期、生长末期的 K_c 、 K_{cb} 值, 得到标况下 K_c 、 K_{cb} 逐日曲线; 3) 根据当地气候条件、作物生长状态 (作物高度、LAI 或冠层覆盖度等)、土壤水分条件、田间农艺管理措施等信息, 并结合 FAO 56 标况下的 K_c 、 K_{cb} 数值, 最终确定作物实际生长状况下的逐日 K_c 、 K_{cb} 、 K_e 值。主要计算公式如下:

$$K_{ma} = K_{tab} + [0.04 \cdot (u_2 - 2) - 0.004 \cdot (RH_{\min} - 45)] \cdot \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (3)$$

$$K_{cb,a} = K_{c \min} + (K_{cb \max} - K_{c \min}) \cdot (1 - \exp[-0.7 \cdot LAI]) \quad (4)$$

$$K_{cb} = K_s \cdot K_{cb,a} \quad (5)$$

$$K_s = \frac{TAW - D_r}{TAW - RAW} \quad (6)$$

$$K_c = K_{cb} + K_e = K_s \cdot K_{cb,a} + K_e \quad (7)$$

$$K_e = K_r \cdot (K_{c \max} - K_{cb}) \leq f_{ew} \cdot K_{c \max} \quad (8)$$

$$K_{c \max} = \max\left(\{1.2 + [0.04 \cdot (u_2 - 2) - 0.004 \cdot (RH_{\min} - 45)] \cdot \left(\frac{h_{\max}}{3}\right)^{0.3}\}, \{K_{cb} + 0.05\}\right) \quad (9)$$

式中, K_{ma} 表示不同生长时期经过气象因子校正后的 K_c 或 K_{cb} ; K_{tab} 表示标准状况下不同生长时期的 K_c 或 K_{cb} 值; u_2 表示不同生长时期地面 2 m 高度日平均风速, m/s; RH_{\min} 表示不同生长时期日平均最小相对湿度, %; h 表示不同生长时期的株高, m; 当 $K_{tab} < 0.45$ 时, 不需要进行式 (3) 的气象校正。 $K_{cb,a}$ 表示根据实际冠层覆盖度校正后的 K_{cb} , $K_{c \min}$ 表示最小 K_c 值 (裸土情况下, 0.15 ~ 0.20), $K_{cb \max}$ 表示经过气象因子校正过的 K_{cb} , LAI 为实测的冠层叶面积指数; 式 (4) 用于校正生长中期和末期的 K_{cb} , 且当 $LAI > 3$ (即地面覆盖完全时), 校正后

K_{cb} 变化不大。 K_s 为水分胁迫系数 (水分不受限时, $K_s=1$), TAW 为根区 (本文取 0.6 m 土层厚度) 可存储的供作物利用的土壤水量, RAW 为根区可存储的易于作物吸取的土壤水量, D_r 为根区土壤水消退量, K_e 为土壤蒸发系数, K_r 为上层土壤 (本文取 0.1 m 土层厚度) 蒸发衰减系数, f_{ew} 为裸露潮湿土壤的比例; 其中, TAW 和 RAW 由土壤水分特性 (如土壤田间持水率、土壤凋萎含水率等) 决定, 鉴于本研究各试验小区的土壤质地、类型相同, 因此不同施氮水平下 TAW 、 RAW 参数值一致; 而 D_r 和 K_r 则由实测的土壤实际含水率决定, 鉴于土壤实际含水率不断变化, D_r 、 K_r 以及 K_s 和 K_e 存在逐日动态变化。 $K_{c \max}$ 表示 K_c 值的上界值, h_{\max} 表示不同生长时期的平均最大株高, m。其他具体详细的计算程序详见 FAO 56 指南^[2]。

目前, 国内外研究人员^[1,5,18-22]在世界不同地区针对不同作物类型, 利用蒸渗仪数据、涡度相关数据或土壤水量平衡法 (以获得 ET_{crop}) 和站点气象数据 (以获得 ET_0), 已对上述方法进行了大量检验和验证, 结果证实其具有很好的精度和普适性, 尤其是双作物系数法精度更好。部分研究^[5, 19-20]利用上述 FAO 56 方法确定的作物系数在作物生长中期和后期出现误差稍大的情况, 可能是由于仅根据当地气候条件和作物高度对 FAO 56 标况下的 K_c 、 K_{cb} 数值进行了校正, 而未全面考虑其他因素的缘故。

基于上述, 本文最终选取 FAO 56 双作物系数计算程序来确定各试验小区冬小麦的逐日 K_{cb} 、 K_e 和 K_c 值 ($K_c=K_{cb}+K_e$)。依据冬小麦物候发展与田间观测, 2008—2009 和 2009—2010 生长季作物生长初期、快速生长期、生长中期、生长衰退期和生长末期的划分见表 1。不同施氮水平下冬小麦物候发展基本一致, 2 个生长季之间物候存在差异, 主要是由于 2010 年春季低温持续时间较长, 致使 2009—2010 季冬小麦返青延后了 8 d。FAO 56 标况下冬小麦生长初期、生长中期和生长末期的 K_{cb} 分别取为 0.15、1.10、0.30。根据站点气候条件、作物生长状况 (作物高度、LAI 等)、土壤水分条件、田间管理措施等信息对 FAO 56 标况下 K_{cb} 曲线实施修正以及逐日 K_e 、 K_c 的确定过程均按照 FAO 56 指南^[2]给出的算法程序进行。

表 1 2008—2009 和 2009—2010 冬小麦季生长初期、快速生长期、生长中期、生长衰退期和生长末期的划分
Table 1 Initial, development, middle, falling and end stages of winter wheat in 2008-2009 and 2009-2010 seasons

生长季	生长初期	快速生长期	生长中期	生长衰退期	生长末期
2008—2009	2008-10-25—2009-02-28	2009-03-01—2009-03-27	2009-03-28—2009-05-08	2009-05-09—2009-06-08	2009-06-09
2009—2010	2009-10-26—2010-03-09	2010-03-10—2010-04-07	2010-04-08—2010-05-15	2010-05-16—2010-06-11	2010-06-12
冬小麦发育期	出苗—返青前	返青—拔节前	拔节—开花	灌浆—腊熟	完熟

1.4 冠层光谱植被指数的提取

本文基于冠层光谱反射数据提取了归一化差值植被指数 (NDVI)、差值植被指数 (DVI)、比值植被指数 (RVI)、土壤调整植被指数 (SAVI)、绿波段叶绿素指数 (CI_{green})、增强型植被指数 (EVI)、修正型土壤调整植被指数 (MSAVI)、重

归一化植被指数 (RDVI) 等 8 种常用植被指数 (表 2) 进行分析。具体计算时, 参考 MODIS 传感器 (moderate-resolution imaging spectroradiometer) 波段, 分别选取 841~876、620~670、545~565、459~479 nm 波段范围的平均反射率作为近红外 (NIR)、红光 (R)、绿光 (G)、蓝光 (B) 波段的反射率值。

表 2 本研究提取的植被指数一览表
Table 2 Vegetation indices used in this study

植被指数 Vegetation indices	计算公式 Formulas	引用文献 References
归一化差值植被指数 Normalized difference vegetation index, NDVI	$(NIR - R) / (NIR + R)$	Bannari 等, 1995 ^[23]
差值植被指数 Difference vegetation index, DVI	$NIR - R$	Bannari 等, 1995 ^[23]
比值植被指数 Ratio vegetation index, RVI	NIR / R	Bannari 等, 1995 ^[23]
土壤调整植被指数 Soil adjusted vegetation index, SAVI	$(NIR - R) / (NIR + R + L) \cdot (1 + L)$, 其中 $L = 0.5$	Huete, 1988 ^[24]
绿波段叶绿素指数 Green chlorophyll index, CI_{green}	$(NIR / G) - 1$	Wu 等, 2010 ^[25]
增强型植被指数 Enhanced vegetation index, EVI	$2.5(NIR - R) / (NIR + 6.0 \cdot R - 7.5 \cdot B + 1)$	Huete 等, 2002 ^[26]
修正型土壤调整植被指数 Modified soil adjusted vegetation index, MSAVI	$(2 \cdot NIR + 1 - \sqrt{(2 \cdot NIR + 1)^2 - 8 \cdot (NIR - R)}) / 2$	Qi 等, 1994 ^[27]
重归一化植被指数 Renormalized difference vegetation index, RDVI	$(NIR - R) / \sqrt{(NIR + R)}$	Roujean 和 Breon, 1995 ^[28]

注: NIR、R、G、B 分别为 841~876、620~670、545~565、459~479 nm 波段范围的平均反射率; L 为土壤调整因子。

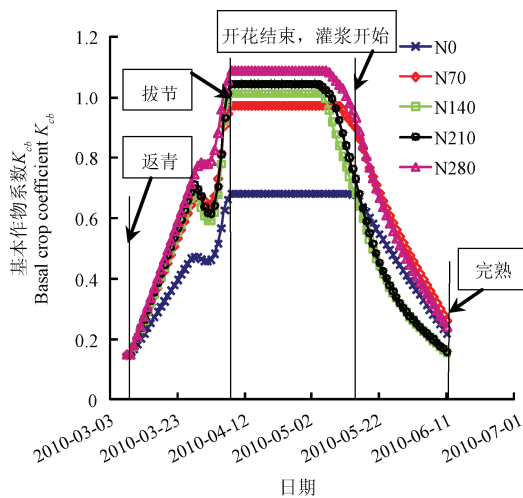
Notes: NIR, R, G and B indicate the mean reflectance of 841~876, 620~670, 545~565 and 459~479 nm respectively. L is a soil adjustment factor.

2 结果分析

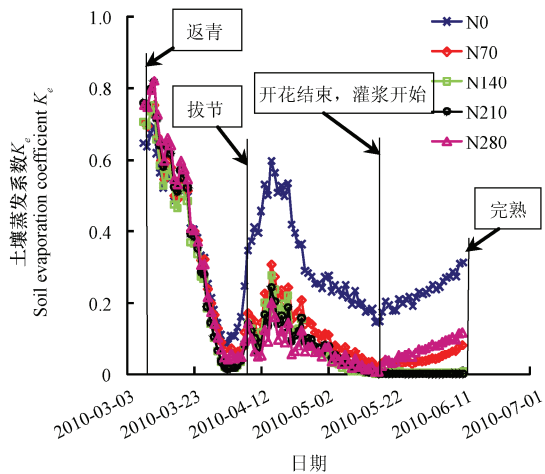
2.1 不同处理下冬小麦 K_{cb} 、 K_e 、 K_c 分析

2009—2010 生长季, 不同施氮水平下冬小麦返青前至收获期间 (2010-03-08—2010-06-11) 基本作物系数 K_{cb} 、土壤蒸发系数 K_e 和作物系数 K_c 的逐日变化曲线如图 1。每种处理的 K_{cb} 、 K_e 、 K_c 数值取其 3 个重复小区的平均值。其中, 反映作物蒸腾因素的 K_{cb} 系数 (图 1a) 在作物生长发育和有利气象条件 (如气温逐渐升高等) 的驱动下, 由生长初期的较小值在快速发育期内大幅度增至生长中期的最大值, 随后在作物衰落期内又逐渐降低。氮肥亏缺对作物长势产生不利影响的最明显表征就是降低冠层 LAI 或植被覆

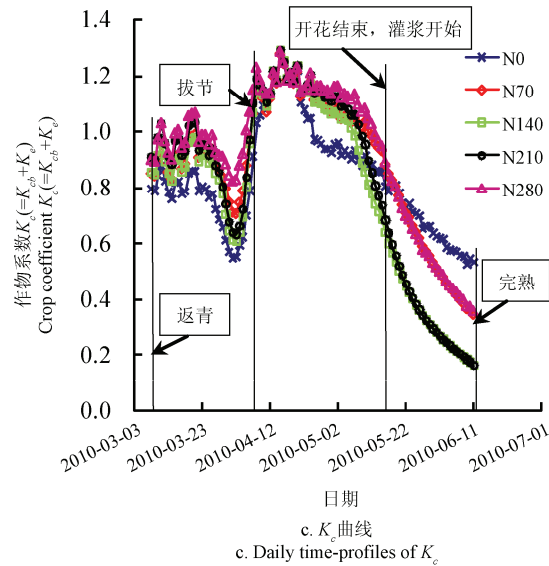
盖度 (图 2a), 致使作物蒸腾受到限制, K_{cb} 减小 (图 1a)。土壤水分胁迫是限制作物蒸腾的另一个重要因素, 图 1a 中, 冬小麦快速生长期 (所有处理) 和衰退期内 (除 N0 外的所有处理) 出现的 K_{cb} 波动就是受水分胁迫影响所致 (图 2b)。另外, 用以反映土壤蒸发因素的 K_e 系数在研究时段内不同氮肥处理下的变化情况见图 1b。冬小麦快速生长期, 冠层覆盖度的增加与土壤水分的逐渐消耗使土壤蒸发受限, K_e 降低; 冬小麦生长中期, 经过水分补给, K_e 先期增加并随着土壤水分逐渐消耗再次降低, 同时 K_e 随施氮量的减少呈增加趋势, 主要原因在于低氮水平下冠层覆盖度较小; 冬小麦生长后期 K_e 变化亦是土壤水分条件、作物长势状况等综合作用的结果。



a. K_{cb} 曲线
a. Daily time-profiles of K_{cb}



b. K_e 曲线
b. Daily time-profiles of K_e



注: N0、N70、N140、N210、N280 分别代表 0、70、140、210、280 kg/hm² 的氮肥处理, 下同。
Notes: N0, N70, N140, N210, N280 indicated the nitrogen application levels of 0, 70, 140, 210 and 280 kg/hm² respectively. The same as below.

图 1 不同氮肥处理下冬小麦返青前至收获期间 K_{cb} 、 K_e 、 K_c 变化分析 (2009-2010 冬小麦季数据)

Fig.1 Daily time-profiles of K_{cb} , K_e and K_c during period of winter wheat before reviving to harvest under different N levels. Data given here were from 2009-2010 seasons.

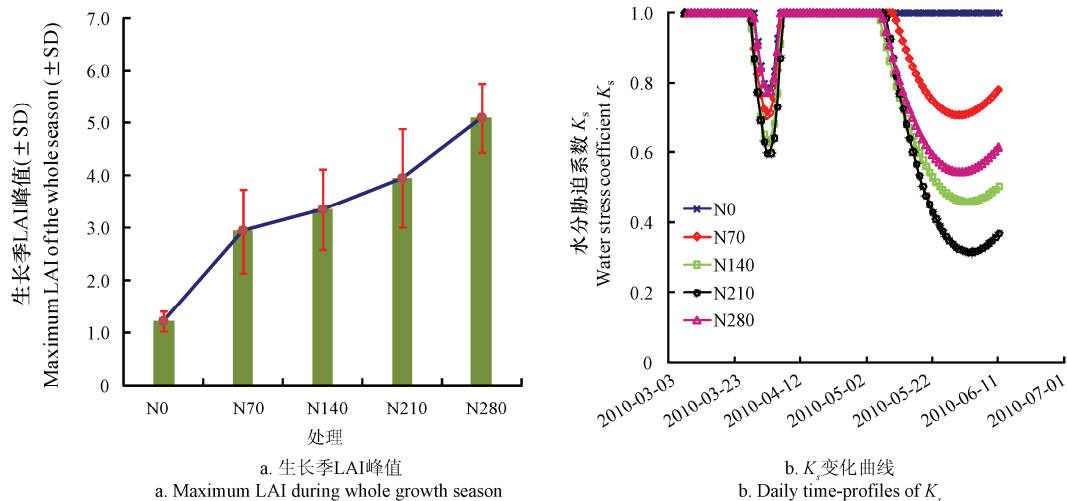


图 2 冬小麦生长季不同氮肥处理的冠层 LAI 峰值及返青前至收获期间的 K_s 曲线 (2009-2010 冬小麦季数据)

Fig.2 Peak LAI during whole growth season and daily K_s during the period of winter wheat before reviving to harvest under different N levels. Data given here were from 2009-2010 seasons

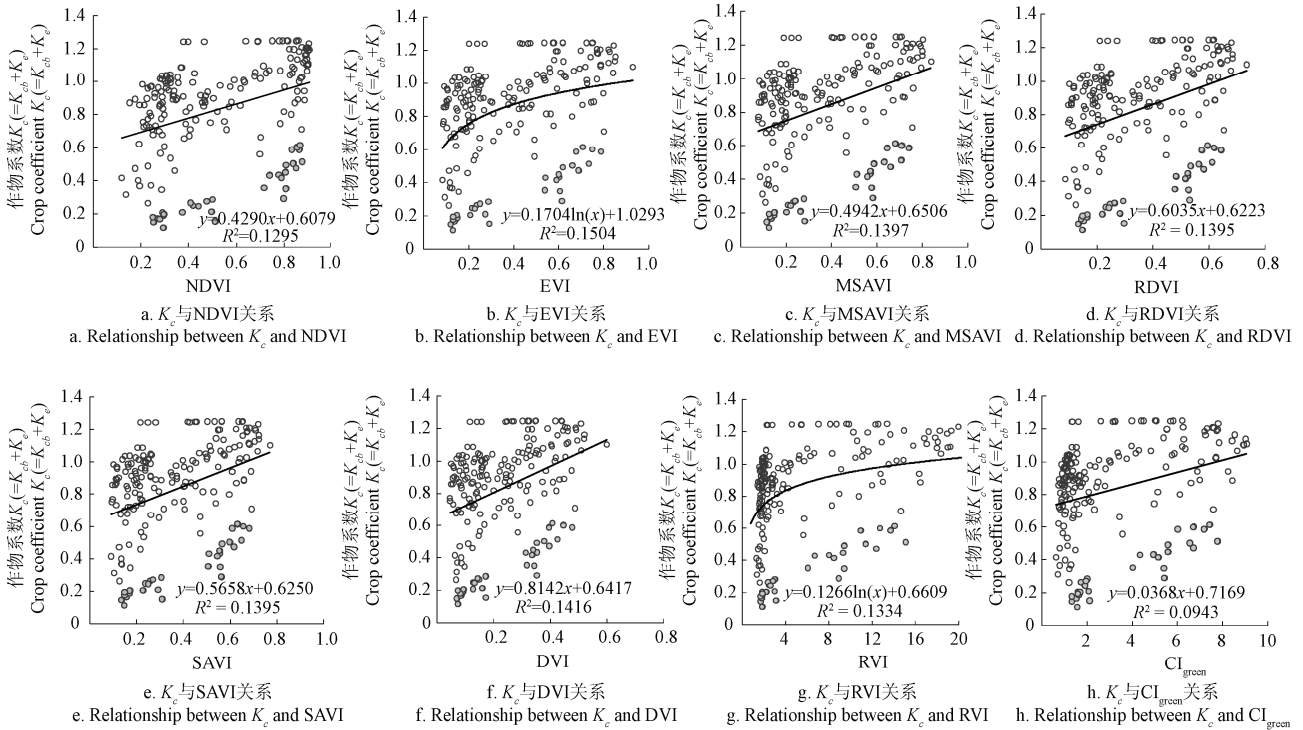
冬小麦 K_c 系数, 作为 K_{cb} 与 K_e 之和, 包括了作物蒸腾与土壤蒸发两类因素的综合影响。图 1c 给出了不同处理冬小麦返青前至收获期间的 K_c 变化曲线。可以看出, 不同氮肥处理之间冬小麦 K_c 无明显规律性差异, 主要是由于不同施氮水平下 K_{cb} 与 K_e 存在着互补关系, 即高氮水平下 K_{cb} 较大而 K_e 较小, 低氮水平下 K_{cb} 较小而 K_e 较大 (见上述)。作物 K_c 曲线能够反映作物实际蒸散量在当地气象、作物生长发育、土壤水分等多因素综合作用下的时变过程和趋势。

2.2 冬小麦 K_c 、 K_{cb} 与冠层光谱植被指数的关系

本文基于实测的 2009-2010 季不同施氮水平下冬小麦冠层光谱植被指数及其对应观测日的作物 K_c 、 K_{cb} 数据系列, 对二者的相关关系进行了分析。图 3 示出了冬小麦 K_c 与多种植被指数 (VIs) 的关系。可以看出, 二者相关性较弱 (决定系数 $R^2=0.094\sim 0.150$, $p<0.01$, $n=195$), 主要原因在于 K_c 系数除表征作物蒸腾因素外也包含了土壤蒸发因素的影响。短期内土壤水分在作物蒸腾和土壤蒸发等耗水过程以及灌溉和降水等补水过程的影响

下变动较大，从而引起 K_e 和 K_c 大幅度变化，而短期内植被指数的变化相对平缓，致使二者关系比较分散。尤其在发生较大程度的土壤水分亏缺 ($K_e=0$ ，即上层土壤已无可供蒸发的水分)而作物冠层尚未表现出明显水分胁迫特征的情况下(图 3 中采用实

心圆突出显示的数据点，主要发生在 N140、N210、N280 处理的冬小麦衰退期内)， K_c-VIs 关系进一步减弱。此外，土壤背景光谱反射特性的变化差异也是 K_c-VIs 关系存在不确定性的一个重要因素。



注：采用实心圆突出显示了水分胁迫较大的数据点。NDVI, EVI, MSAVI, RDVI, SAVI, DVI, RVI, CI_{green} 的含义见表 2，下同。
Notes: Solid circles indicated the data points with relatively large water-stress. The definitions of NDVI, EVI, MSAVI, RDVI, SAVI, DVI, RVI and CI_{green} refer to Table 2 (same as below).

图 3 基于 2009 - 2010 冬小麦季数据分析作物系数 $K_c (=K_{cb}+K_e)$ 与冠层光谱植被指数的关系
Fig.3 Relationships between $K_c (=K_{cb}+K_e)$ and canopy spectral vegetation indices of winter wheat based on data analysis of 2009 - 2010 seasons

鉴于基本作物系数 K_{cb} 仅表征了作物蒸腾因素的影响，与 K_c 相比，其与冠层光谱植被指数的关系有了很大的改善(图 4)。可以看出， K_{cb} 与 8 种常用植被指数均具有显著的相关关系 ($R^2=0.511 \sim 0.685$, $p<0.01$, $n=195$)，其中与 EVI 相关性最强。不过，当作物遭受较大的水分胁迫 ($K_e=0$ ，水分胁迫系数 $K_s<0.7$) 但尚未表现出明显的受限特征时，冠层植被指数变化不明显，但由于作物蒸腾对水分胁迫的响应比较敏感， K_{cb} 显著降低，致使 $K_{cb}-VIs$ 数据点发生较大偏离(图 3 中采用实心圆突出显示的数据点，主要发生在 N140、N210、N280 处理的冬小麦衰退期内)。本文通过去除上述存在较大水分胁迫的数据点，进一步给出了土壤水分较好条件下冬小麦 K_{cb} 与冠层光谱植被指数的关系，见表 3。可以看出，当土壤水分供给较为充分时， K_{cb} 与 8 种常用植被指数的相关性显著增强 ($R^2=0.734 \sim 0.876$, $p<0.01$, $n=164$)。结果表明，相比 K_c ，作

物 K_{cb} 与冠层植被指数具有很强的相关性，在氮素胁迫条件下亦是如此；但当发生较大的水分胁迫时， $K_{cb}-VIs$ 关系的不确定性将会增加。

2.3 利用冠层光谱植被指数估算冬小麦 K_{cb} 的可行性分析与精度验证

在上述分析的基础上，本文利用实测的 2008 - 2009 季不同施氮水平下冬小麦冠层光谱植被指数及其对应观测日的作物 K_{cb} 数据系列，对基于冠层光谱植被指数估算 K_{cb} 的可行性和精度进行了验证分析。2008 - 2009 冬小麦生长期，各试验小区内氮肥施用水平不同，但土壤水分条件较好，基本满足作物需求。基于 8 种常用植被指数估算的 K_{cb} 值与 FAO 56 确定的 K_{cb} 值均具有很好的线性回归关系(图 5, $R^2=0.765 \sim 0.864$, $n=150$)，其中以 EVI 的估算精度最好。结果表明，基于冠层光谱植被指数可以很好地估算冬小麦实际生长条件下的 K_{cb} 系数，且在氮素胁迫条件下亦具有很好的精度。

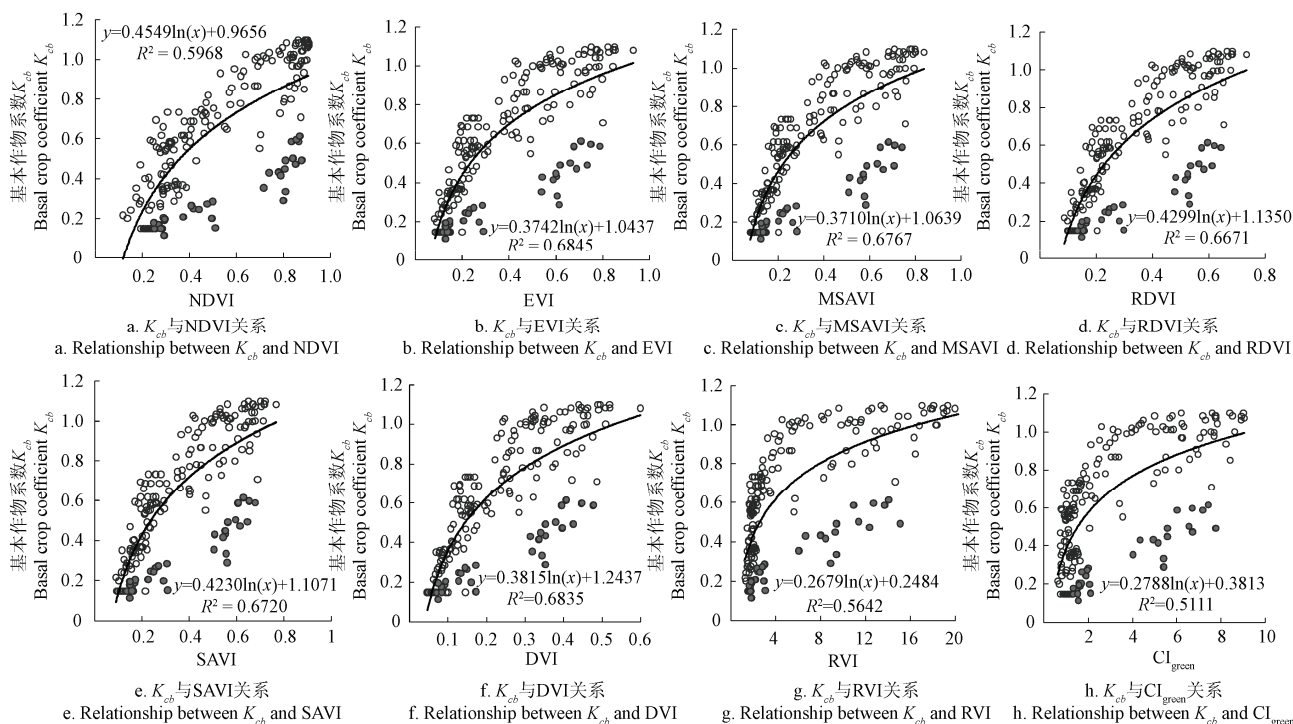


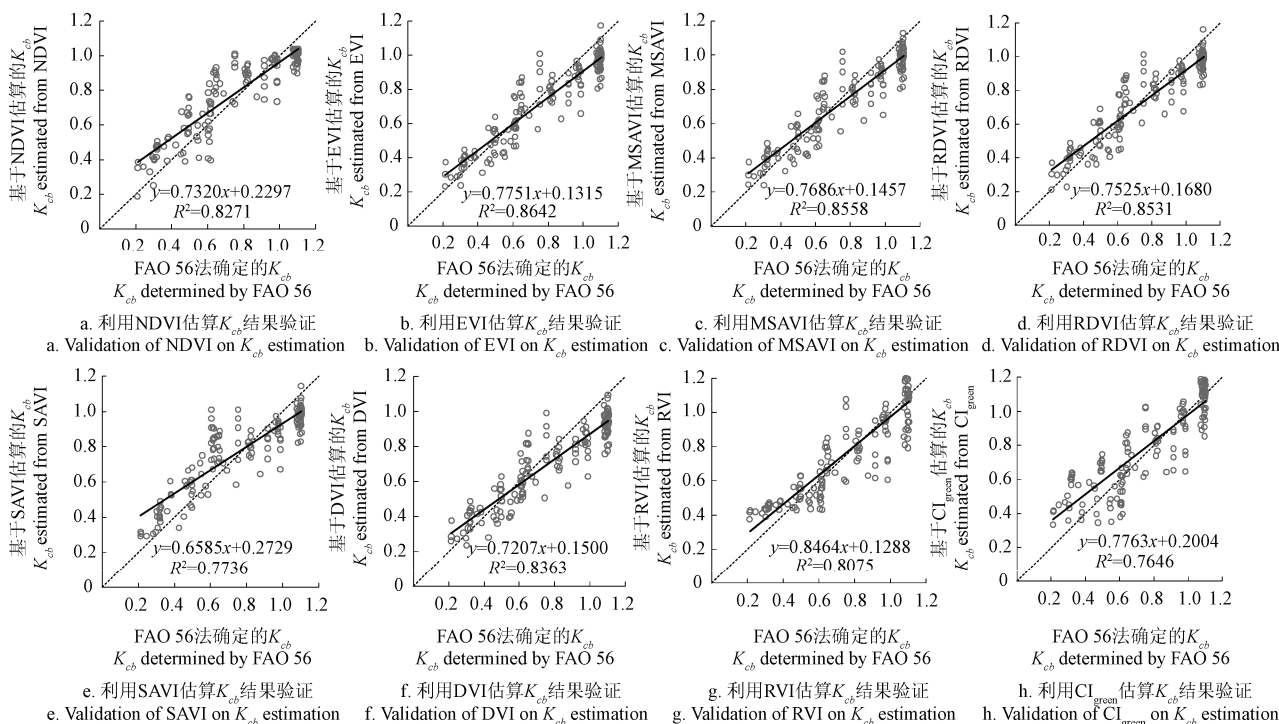
图4 基于2009-2010冬小麦季数据分析基本作物系数 K_{cb} 与冠层光谱植被指数的关系
 Fig.4 Relationships between K_{cb} and canopy spectral vegetation indices of winter wheat based on data analysis of 2009-2010 seasons

表3 土壤水充分条件下冬小麦 K_{cb} 与冠层光谱植被指数的关系 (2009-2010冬小麦季数据去除水分胁迫点)
 Table 3 Relationships between of K_{cb} and canopy vegetation indices of winter wheat under well-watered conditions

因变量 Y Dependent variable	自变量 x Independent variables	拟合关系式 $Y=f(x)$ Regression equations	决定系数 (R^2) Coefficients of determination
K_{cb}	NDVI	$Y=0.5148\ln(x) + 1.0787$	0.8206
	DVI	$Y=0.4172\ln(x) + 1.3587$	0.8581
	RVI	$Y=0.2974\ln(x) + 0.2704$	0.7382
	SAVI	$Y=0.4699\ln(x) + 1.2226$	0.8763
	CI_{green}	$Y=0.3218\ln(x) + 0.4164$	0.7344
	EVI	$Y=0.4137\ln(x) + 1.1470$	0.8751
	MSAVI	$Y=0.4118\ln(x) + 1.1731$	0.8762
	RDVI	$Y=0.4779\ln(x) + 1.2543$	0.8724

不过, 当发生能够引发 K_{cb} 显著降低但又不至使冠层光谱特性产生明显表征的水分胁迫时, K_{cb} -VIs 相关关系减弱 (见前述)。此种条件下, 利用冠层光谱植被指数估算作物 K_{cb} 将存在较大的不确定性, 具体应用时还需要协同其他途径获取的水分胁迫信息来确定。目前常用的大面积作物水分胁迫监测诊断手段包括光学遥感^[29-30]、红外线热成像^[31]、地面无线传感器观测网络^[32-34]等。其中, 地面无线传感观测网络可快速实时地

连续获取覆盖区域内的作物水分亏缺程度、土壤含水率动态变化等信息。当发生上述不足以使冠层光谱特性产生明显表征的水分胁迫时, 利用光学遥感监测水分胁迫或将受到限制, 这种情况下可采用空间连续的红外热成像数据和时间连续的地面无线传感观测网络来获取作物水分胁迫或土壤水分变化信息, 协同该信息可为此条件下作物 K_{cb} 的准确确定提供可能, 其实际效用还需要今后收集相关数据实施验证。



注：虚线为 1:1 关系线，实线为回归线。
Notes: The dotted line was 1:1 relationship line and the solid line was the regression line.

图 5 基于 2008—2009 冬小麦季数据验证利用冠层光谱植被指数估算作物 K_{cb} 的有效性。

Fig.5 Performances of canopy vegetation indices on K_{cb} estimation of winter wheat (Data used here were from 2008—2009 season).

3 结论

本文基于 2008—2009 和 2009—2010 年度 2 个冬小麦生长季的大田试验数据，研究了作物系数 K_c 、基本作物系数 K_{cb} 与 8 种常用冠层光谱植被指数的相关关系以及水分和氮素胁迫对其的影响，分析了利用冠层植被指数估算冬小麦 K_c 、 K_{cb} 的可行性，并利用独立数据系列对其估算精度进行了验证。主要得出以下结论：

1) 不同氮肥处理冬小麦 K_c 无明显规律性差异，主要是由于不同施氮水平下 K_{cb} 与 K_e 存在着互补关系，即高氮水平下 K_{cb} 较大而 K_e 较小，低氮水平下 K_{cb} 较小而 K_e 较大。作物 K_c 、 K_{cb} 与 K_e 曲线分别反映了作物实际蒸散量、作物实际蒸腾量和土壤实际蒸发量在当地气象条件、作物生长发育、土壤水分等因素综合作用下的时变过程和趋势。

2) 冬小麦 K_c 与冠层光谱植被指数 (VIs) 的相关性较弱 (决定系数 $R^2=0.094\sim0.150$, $p<0.01$, $n=195$)，主要原因在于 K_c 除表征作物蒸腾因素外也反映了土壤蒸发因素的影响。此外，土壤背景的变化差异也是影响 K_c —VIs 关系一个重要因素。因此，基于冠层光谱植被指数估算作物 K_c 可能会产生较大的误差。

3) 冬小麦 K_{cb} 与冠层光谱植被指数具有很强的

相关性，在氮素胁迫条件下亦是如此 ($R^2=0.734\sim0.876$, $p<0.01$, $n=164$)。不过，当发生可引起 K_{cb} 显著降低而又不致使冠层光谱特性出现明显受限特征的水分胁迫时， K_{cb} —VIs 相关关系减弱 ($R^2=0.511\sim0.685$, $p<0.01$, $n=195$)。

4) 基于冠层光谱植被指数可以很好地估算冬小麦实际生长条件下的 K_{cb} ，其中以增强型植被指数 (EVI) 的估算精度最好 ($R^2=0.765\sim0.864$, $n=150$)。该法适用于作物遭受氮素胁迫的情况。但在不足以使冠层出现明显表征的水分胁迫条件下，利用该法估算 K_{cb} 可能会存在较大的不确定性，此种情况下还需要协同其他途径获取的水分胁迫信息来确定。

[参考文献]

[1] Fandiño M, Cancela J J, Rey B J, et al. Using the dual-Kc approach to model evapotranspiration of Albariño vineyards (*Vitis vinifera* L. cv. Albariño) with consideration of active ground cover[J]. Agricultural Water Management, 2012, 112: 75—87.
 [2] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage paper No. 56 [M]. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, 1998, 15, 87—205.
 [3] Ray S S, Dadhwal V K. Estimation of crop evapotranspiration of irrigation command area using remote sensing and GIS[J]. Agricultural Water Management,

- 2001, 49(3): 239—249.
- [4] 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.
- [5] 彭世彰, 丁加丽, 茆智, 等. 用 FAO-56 作物系数法推求控制灌溉条件下晚稻作物系数及验证[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(7): 30—34.
Peng Shizhang, Ding Jiali, Mao Zhi, et al. Estimation and verification of crop coefficient for water saving irrigation of late rice using the FAO-56 method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2007, 23(7): 30—34. (in Chinese with English abstract)
- [6] DeJonge K C, Ascough II J C, Andales A A, et al. Improving evapotranspiration simulations in the CERES-Maize model under limited irrigation[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 115: 92—103.
- [7] Parent A C, Anctil F. Quantifying evapotranspiration of a rainfed potato crop in Southeastern Canada using eddy covariance techniques[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 113: 45—56.
- [8] López-Urrea R, Montoro A, Mañas F, et al. Evapotranspiration and crop coefficients from lysimeter measurements of mature ‘Tempranillo’ wine grapes[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 112: 13—20.
- [9] Zhang X Y, Chen S Y, Sun H Y, et al. Changes in evapotranspiration over irrigated winter wheat and maize in North China Plain over three decades [J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(6): 1097—1104.
- [10] 杨晓光, Bouman B A M, 张秋平, 等. 华北平原旱稻作物系数试验研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(2): 37—41.
Yang Xiaoguang, Bouman B A M, Zhang Qiuping, et al. Crop coefficient of aerobic rice in North China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2006, 22(2): 37—41. (in Chinese with English abstract)
- [11] 李玉霖, 崔建垣, 张铜会. 奈曼地区灌溉麦田蒸散量及作物系数的确定[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(6): 930—934.
Li Yulin, Cui Jianyuan, Zhao Tonghui. Measurement of evapotranspiration and crop coefficient of irrigated spring wheat in Naiman sandy cropland[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(6): 930—934. (in Chinese with English abstract)
- [12] 张振华, 蔡焕杰, 杨润亚, 等. 沙漠绿洲灌区膜下滴灌作物需水量及作物系数研究[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(5): 97—100.
Zhang Zhenhua, Cai Huanjie, Yang Runya, et al. Water requirements and crop coefficients of drip-irrigated crop under mulch in Minqin County Oasis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2004, 20(5): 97—100. (in Chinese with English abstract)
- [13] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2006, 22(10): 52—56. (in Chinese with English abstract)
- [14] Choudhury B J, Ahmed N U, Idso S B, et al. Relations between evaporation coefficient and vegetation indices studied by Model Simulations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 50(1): 1—17.
- [15] Guerschman J P, Van Dijk A I J M, Mattersdorf G, et al. Scaling of potential evapotranspiration with MODIS data reproduces flux observations and catchment water balance observations across Australia[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 369(1/2): 107—119.
- [16] Yebra M, Van Dijk A, Leuning R, et al. Evaluation of optical remote sensing to estimate actual evapotranspiration and canopy conductance[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 129: 250—261.
- [17] Mutiibwa D, Irmak S. AVHRR-NDVI-based crop coefficients for analyzing long-term trends in evapotranspiration in relation to changing climate in the USA High Plains[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(1): 231—244.
- [18] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2000, 16(5): 26—30. (in Chinese with English abstract)
- [19] 樊引琴, 蔡焕杰. 单作物系数法和双作物系数法计算作物需水量的比较研究[J]. *水利学报*, 2002, 3: 50—54.
Fan Yinqin, Cai Huanjie. Comparison of crop water requirements computed by single crop coefficient approach and dual crop coefficient approach [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, 3: 50—54. (in Chinese with English abstract)
- [20] 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.
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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2005, 21(8): 25—29. (in Chinese with English abstract)
- [21] 陈凤, 蔡焕杰, 王健, 等. 杨凌地区冬小麦和夏玉米蒸发蒸腾和作物系数的确定[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(5): 191—193.
Chen Feng, Cai Huanjie, Wang Jian, et al. Estimation of evapotranspiration and crop coefficients of winter wheat and summer maize in Yang ling Zone[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2006, 22(5): 191—193. (in Chinese with English abstract)
- [22] Zhang K F, Hilton H W, Greenwood D J, et al. A rigorous approach of determining FAO56 dual crop coefficient using soil sensor measurements and inverse modeling techniques[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(6): 1081—1090.
- [23] Bannari A, Morin D, Bonn F, et al. A review of vegetation indices[J]. *Remote Sensing Reviews*, 1995, 13(1/2): 95—120.
- [24] Huete A R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI)[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 25(3): 295—309.
- [25] Wu C Y, Han X Z, Ni J S, et al. Estimation of gross primary production in wheat from in situ measurements[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2010, 12(3): 183—189.

- [26] Huete A, Didan K, Miura T, et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1/2): 195–213.
- [27] Qi J, Chehbouni A, Huete A R, et al. A modified soil adjusted vegetation index[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 48(2): 119–126.
- [28] Roujean J L, Breon F M. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51(3): 375–384.
- [29] Thenot F, Méthy M, Winkel T. The Photochemical Reflectance Index (PRI) as a water-stress index[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(23): 5135–5139.
- [30] Chávez R O, Clevers J G P W, Herold M, et al. Modelling the spectral response of the desert tree *Prosopis tamarugo* to water stress[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 21: 53–65.
- [31] Agam N, Cohen Y, Berni J A J, et al. An insight to the performance of crop water stress index for olive trees[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 118: 79–86.
- [32] 高峰, 俞立, 张文安, 等. 基于作物水分胁迫声发射技术的无线传感器网络精量灌溉系统的初步研究[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(1): 60–63.
- Gao Feng, Yu Li, Zhang Wen'an, et al. Preliminary study on precision irrigation system based on wireless sensor networks of acoustic emission technique for crop water stress[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2008, 24(1): 60–63. (in Chinese with English abstract)
- [33] 高峰, 俞立, 张文安, 等. 基于无线传感器网络的作物水分状况监测系统研究与设计[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(2): 107–112.
- Gao Feng, Yu Li, Zhang Wen'an, et al. Research and design of crop water status monitoring system based on wireless sensor networks[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2009, 25(2): 107–112. (in Chinese with English abstract)
- [34] 李震, Wang Ning, 洪添胜, 等. 农田土壤含水率监测的无线传感器网络系统设计[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(2): 212–217.
- Li Zhen, Ning Wang, Hong Tiansheng, et al. Design of wireless sensor network system based on in-field soil water content monitoring[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(2): 212–217. (in Chinese with English abstract)

Estimating crop coefficients of winter wheat based on canopy spectral vegetation indices

Li Heli^{1,2,3}, Luo Yi^{2*}, Zhao Chunjiang¹, Yang Guijun¹

(1. Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 2. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: At present, many studies have been carried out on crop coefficients and its variation over years under local climate conditions, but little attention has been given to its estimation method for a regional scale, which plays a key role in the regional application of the FAO 56 crop coefficient approach in crop evapotranspiration and transpiration estimation. In this work, experiments including five nitrogen (N) treatments were conducted in the 2008-2009 and 2009-2010 seasons to investigate the relationships between the crop coefficient (K_c), basal crop coefficient (K_{cb}) and eight common canopy vegetation indices (VIs) of winter wheat, as well as the effects of N and water stress on them. In addition, the feasibility and the performances of VIs on K_c and K_{cb} estimation of winter wheat were analyzed. Results demonstrated that high levels of N were associated with high K_{cb} and low K_e , and vice versa, which resulted in no obvious regular differences in K_c among different N treatments. Crop K_c was weakly correlated with VIs (the coefficient of determination $R^2 = 0.094 \sim 0.150$, $p < 0.01$, $n=195$) due to the variations in soil evaporation and soil background, while K_{cb} had strong correlations with VIs ($R^2 = 0.511 \sim 0.685$, $p < 0.01$, $n=195$). In addition, the water stress before resulting in an obvious sign on crop canopy spectral characteristics can introduce considerable scatter in the relations between K_{cb} and VIs, while N stress had no effects on them. Validation results showed that VIs performed well in crop K_{cb} estimation, and the enhanced vegetation index (EVI) gave the best accuracy ($R^2 = 0.765 \sim 0.864$, $n=150$). The proposed method would be more favorable for regional application, since VIs can be easily collected by means of remote sensing. However, it should be pointed out that the method may have some limitations under the conditions with water stress but is not severe according to the above analysis, and as in this case, additional water stress information collected from other sources like thermal images and ground-based wireless sensor network observation would be needed.

Key words: estimation, experiments, nitrogen, crop coefficients, winter wheat, vegetation indices

(责任编辑: 秦学敏)