



请通过网上投稿系统投稿 网址:http://www.aes.org.cn

不同作物农田的土壤呼吸与高光谱的关系

姚雪雯,陈书涛,王君,邓熙茗,张婷婷,胡正华

引用本文:

姚雪雯,陈书涛,王君,等.不同作物农田的土壤呼吸与高光谱的关系[J].农业环境科学学报,2020,39(5):1140-1149.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1097

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

深松秸秆还田措施对东北黑土土壤呼吸及有机碳平衡的影响

刘平奇,张梦璇,王立刚,王迎春 农业环境科学学报.2020,39(5):1150-1160 https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1387

模拟增温对华北农田土壤碳排放的影响

杜锟,李发东,涂纯,李兆 农业环境科学学报.2020,39(4):691-699 https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1336

北方农牧交错区不同土地利用方式下土壤呼吸动态特征

杨新明,韩磊,庄涛 农业环境科学学报.2018,37(8):1733-1740 https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1559

艾比湖湿地典型植物群落入冬期土壤呼吸日变化特征

赵明亮,李艳红,李发东 农业环境科学学报.2015(12):2432-2438 https://doi.org/10.11654/jaes.2015.12.025

不同有机物料的Cd2+吸附特性及其对Cd污染土壤的修复效果研究

刘媛媛, 刘超, 陈卓君, 徐智, 汤利 农业环境科学学报. 2018, 37(4): 705-710 https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1479



关注微信公众号,获得更多资讯信息

姚雪雯, 陈书涛, 王 君, 等. 不同作物农田的土壤呼吸与高光谱的关系[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 1140-1149. YAO Xue-wen, CHEN Shu-tao, WANG Jun, et al. Relationships between soil respiration and hyperspectrum in different croplands[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(5): 1140-1149.



不同作物农田的土壤呼吸与高光谱的关系

姚雪雯^{1,2},陈书涛^{1,2*},王 君^{1,2},邓熙茗^{1,2},张婷婷^{1,2},胡正华²

(1.南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室,南京 210044; 2.南京信息工程大学应用气象学院,南京 210044)

摘 要:为研究种植不同作物的农田土壤呼吸与高光谱植被指数的关系,选取3种典型夏熟作物冬小麦、油菜籽、蚕豆,于2018年10月至2019年5月进行田间随机区组试验,观测土壤呼吸、土壤温度、土壤湿度的季节动态,并观测NDVI(归一化植被指数)、DVI (差值植被指数)、RVI(比值植被指数)、EVI(增强植被指数)、PRI(光化学植被指数)5种高光谱植被指数和叶绿素SPAD值。结果表明:冬小麦、油菜籽、蚕豆田土壤呼吸季节平均值分别为1.78±0.15、1.35±0.27、1.61±0.22 µmol·m⁻²·s⁻¹,冬小麦田土壤呼吸显著高于油菜籽田(P<0.05),冬小麦与蚕豆田以及油菜籽与蚕豆田土壤呼吸无显著差异(P>0.05)。冬小麦田土壤呼吸残差(基于温度指数方程的模拟值与实测值的差值)与NDVI、RVI、EVI、PRI、SPAD值均存在显著(P<0.05)或极显著(P<0.01)的相关关系,蚕豆田土壤呼吸残差与L述植被指数均不存在显著的相关关系,这可能与油菜籽3—4月份花期叶片退化有关。在冬小麦和蚕豆田,可分别建立基于土壤温度、NDVI、RVI、RVI、PRI、SPAD值以及土壤温度和SPAD值有关。 关键词:农田;土壤呼吸;土壤温度;高光谱;植被指数

中图分类号:S154.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)05-1140-10 doi:10.11654/jaes.2019-1097

Relationships between soil respiration and hyperspectrum in different croplands

YAO Xue-wen^{1,2}, CHEN Shu-tao^{1,2}*, WANG Jun^{1,2}, DENG Xi-ming^{1,2}, ZHANG Ting-ting^{1,2}, HU Zheng-hua²

(1.Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;
 2.School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In order to investigate the relationship between soil respiration and hyperspectrum, a field randomized block experiment with three crops of winter wheat, rapeseed, and broad bean was performed from October 2018 to May 2019. The changes in soil respiration, soil temperature, and soil moisture dynamics were measured. The normalized difference vegetation index (NDVI), difference vegetation index (DVI), ratio vegetation index (RVI), enhanced vegetation index (EVI), and photochemical reflectance index (PRI) obtained from the hyperspectral method and the SPAD value of chlorophyll were also determined. The results indicated that the seasonal mean soil respiration values were 1.78 ± 0.15 , $1.35\pm0.27 \ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, and $1.61\pm0.22 \ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ for winter wheat, rapeseed, and broad bean croplands, respectively. Soil respiration was significantly (P<0.05) higher in the winter wheat plots than in the rapeseed plots. There was no significant (P>0.05) difference in soil respiration between the plots of winter wheat and broad bean and between those of rapeseed and broad bean. Residual soil respiration computed as the difference between the modeled soil respiration using the soil temperature and exponential function and the observed soil respiration was significantly (P<0.05) or extremely significantly (P<0.01) correlated with the NDVI, RVI, EVI, PRI, and SPAD values in winter wheat cropland. Residual soil respiration was extremely significantly (P<0.01) correlated with the NDVI, DVI, RVI, EVI, and PRI in broad bean cropland. There was no such correlation between the residual soil respiration and vegetation indexes

收稿日期:2019-10-07 录用日期:2019-12-18

作者简介:姚雪雯(1996—),女,江苏溧阳人,硕士研究生,从事生态系统碳循环与气候变化研究。E-mail:yxw2019@126.com

^{*}通信作者:陈书涛 E-mail:chenstyf@aliyun.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41775151,41775152);江苏省"六大人才高峰"项目(2015-NY-012)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (41775151, 41775152); The Six Talent Peaks Project in Jiangsu Province (2015–NY-012)

in the rapeseed cropland owing to the flowering from March to April. A model based on the soil temperature, NDVI, RVI, PRI, and SPAD values and one based on soil temperature and RVI values were established to simulate soil respiration in winter wheat and broad bean croplands, respectively. The seasonal changes in soil respiration were only controlled by the soil temperature, moisture, and SPAD value in rapeseed cropland.

Keywords: cropland; soil respiration; soil temperature; hyperspectrum; vegetation indexes

温室效应导致的全球变暖引起了人们的广泛关注。CO₂是最主要的温室气体,大气中CO₂浓度升高与陆地生态系统碳循环有关^[1]。土壤呼吸是陆地生态系统、你重要的碳排放过程^[2],在气候变暖条件下,土壤呼吸有可能会产生正反馈效应^[3],研究土壤呼吸的影响因素对于模拟土壤呼吸的时空变异具有重要意义。

由于种植作物类型和农业管理措施不同,农田生 态系统的植被、养分、水热条件与自然生态系统具有 较大差异,农田土壤呼吸作用也与其他生态系统存在 不同^[4]。农田土壤呼吸的季节变化除了与温度的季 节变化有关外,还随种植作物类型的不同而存在差 异15-71。土壤呼吸中异养组分的季节变化主要与水热 因子有关[8-9],而其根呼吸则与光合作用驱动的植物 生理生长节律存在密切联系[10-12]。有研究表明,种植 大豆条件下的季节平均土壤呼吸速率是种植棉花条 件下的2.34倍,同时,植物生长改变了土壤呼吸速率 与温度的关系[13]。利用高光谱技术测得的作物植被 指数可反映作物的某些生理生长特征(如:绿度、叶绿 素含量)14,作为地下过程的土壤呼吸与地上植被的 联系可通过高光谱植被指数来研究[15]。然而,以往关 于这方面的研究还相对较少,土壤呼吸与植被指数是 否存在相似的季节变异规律?种植不同作物条件下 土壤呼吸的差异是否与植被指数的差异有关? 这些 问题还需要田间观测试验证实,阐明这些问题不仅有 助于利用遥感方法研究农田土壤呼吸与作物生长指 标的关系,而且对于利用遥感资料估算区域农田土壤 呼吸具有参考价值。

本研究选取华东地区种植的3种典型夏熟作物 冬小麦、油菜籽、蚕豆,观测土壤呼吸、土壤温度、土壤 湿度、植被指数、叶绿素指标,研究土壤呼吸与这些潜 在影响因子之间的关系,以期为探讨土壤呼吸的影响 因素和利用遥感方法估算农田土壤呼吸提供基础数 据和理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点

在南京信息工程大学农业气象试验站(32.21°N,

118.70°E)进行田间试验。试验地多年平均气温和多 年平均降水量分别为15.6 ℃和1100 mm,供试土壤为 黄棕壤(灰马肝土属),年日照时数1902.5 h,无霜期 237 d。0~20 cm耕层土壤质地为壤质黏土,黏粒含量 26.1%,田间持水量25.6%,pH(H₂O)为6.3,有机碳和 全氮含量分别为8.91 g·kg⁻¹和0.81 g·kg⁻¹,容重1.54 g·cm⁻³。

1.2 试验设计

于 2018年10月至2019年5月进行田间试验,选择当地常规种植的3种越冬夏熟作物冬小麦(Triticum aestivum L.)、油菜籽(Brassica napus L.)、蚕豆(Vicia faba L.)作为供试作物。设置随机区组试验,分为 3个区组,每个区组种植冬小麦、油菜籽、蚕豆3种作物,每个小区面积2.5 m×3.0 m。冬小麦、油菜籽、蚕 豆品种分别为宁麦13、沣油737、南通青皮。于2018 年10月28日施用基肥(复合肥51.3 g·m⁻²),复合肥N: P₂O₅:K₂O为15%:15%:15%,于2019年1月13日施用 越冬肥(尿素51.3 g·m⁻²),尿素氮含量为46.4%。于 2018年10月29日播种3种作物,冬小麦、油菜籽、蚕 豆生育期见表1,3种作物均于2019年5月15日收获。

1.3 数据采集

于作物播种前在各个小区中埋入高10 cm、直径 20 cm的PVC底座,底座埋入土壤中3 cm,采用便携 式土壤碳通量仪(Li-8100A,LI-COR公司,美国)测 定土壤呼吸。定期去除底座内生长出的植物,以保证 测定的呼吸作用不包含植物呼吸。除越冬期外每周 观测1次土壤呼吸、土壤温度、土壤湿度、植被指数 (作物出苗后开始观测)、叶绿素 SPAD 值。选择晴朗 天气,采用便携式地物光谱仪(Fieldspec 4 Standardard-Res, ASD公司, 美国)采集各种作物冠层反射率, 波段范围为350~2500 nm,其中350~1000 nm 波段的 光谱分辨率为3 nm,光谱采样间隔为1.4 nm;1001~ 2500 nm 波段的光谱分辨率为 10 nm, 采样间隔为 2 nm,探头视场角为25°。选择晴朗无风无云或者少风 少云的天气,采用便携式地物光谱仪于11:00-14:00 采集各种作物冠层反射率,测量时保持光谱仪探头垂 直向下,据作物冠层上方垂直约20~30 cm。每个小

农业环境科学学报 第39卷第5期

Table 1 The growing stages of crops 冬小麦 Winter wheat 油菜籽 Rapeseed 蚕豆 Broad bean 生育期 Growing stages 日期 Date 生育期 Growing stages 日期Date 生育期 Growing stages 日期Date 出苗 Emergence 2018.11.08 出苗Emergence 2018.11.11 出苗Emergence 2018.11.11 拔节 Jointing 2019.03.07 蕾薹Bud 2019.03.06 幼苗生长 Seedling growth 2018.11.20 现蕾期 Squaring 孕穗 Booting 2019.04.01 开花 Anthesis 2019.03.20 2019.03.12 抽穗Heading 2019.04.06 成熟 Maturity 2019.05.09 2019.04.22 开花结荚 Anthesis and pod bearing 开花 Anthesis 2019.04.15 成熟 Maturity 2019.05.08 灌浆 Beginning grain filling 2019.04.27 成熟 Maturity 2019.05.13

表1 作物生育期

区选择2个点测定,每个点测量获得5条光谱曲线,每 个小区共测得10条反射率曲线。为保证试验的准确 性,每次数据采集前使用40 cm×40 cm 高光谱标准白 板进行校正(标准白板反射率视为1,所测得的反射 率为相对反射率),白板前后校准时间间隔不超过5 min。采用ViewSepcPro光谱处理软件对原始光谱曲 线进行预处理。通过测得的作物冠层反射率计算 NDVI(归一化植被指数)、DVI(差值植被指数)、RVI (比值植被指数)、EVI(增强植被指数)、PRI(光化学 植被指数)5种植被指数,各植被指数的计算公式见 表2。本研究中,绝大部分的土壤呼吸测定日与植被 指数观测日相同,若遇不利于观测植被指数的天气, 土壤呼吸的测定则与之有观测日的偏差。在测定土 壤呼吸时,采用土壤碳通量仪配套的土壤温度探头和 湿度探头(TDR)测定5 cm 土壤温度和湿度。以便携 式叶绿素仪(SPAD-502PLUS, Konica Minolta公司,日 本)测定3种作物茎顶叶的叶绿素SPAD值,每个小区 随机测定5片叶片。

以往的研究表明,每周1次的频率能较好地观测 到土壤呼吸、土壤温湿度的最小值和最大值范 围^[20-21],本研究中每周1次的植被指数观测频率高于

	表2	植被指数的计算公式
--	----	-----------

Table 2 Functions to compute vegetation indexes

公式Functions	参考文献References			
NDVI= $(R_{800}-R_{670})/(R_{800}+R_{670})$	[16]			
$DVI=R_{800}-R_{670}$	[17-18]			
$RVI=R_{800}/R_{670}$	[17-18]			
$EVI=2.5(R_{800}-R_{670})/(1+R_{800}+6R_{670}-7R_{479})$	[19]			
$PRI=(R_{531}-R_{570})/(R_{531}+R_{570})$	[17-18]			

注: R₈₀₀、R₆₇₀、R₄₇₉、R₅₃₁、R₅₇₀分别为波长 800、670、479、531、570 nm 处的作物冠层反射率。

Note: R_{800} , R_{670} , R_{479} , R_{531} , R_{570} represent the crop canopy reflectance at the wavelengths of 800, 670, 479, 531, 570 nm, respectively.

以往研究的频率^[18,22-23],并且考虑了苗期到越冬期的 植被指数变异,比以往仅观测越冬夏熟作物旺盛生长 阶段植被指数的研究更为全面^[18],这有利于研究作物 全生育期内植被指数的变异及其与土壤呼吸的关系。 1.4 数据分析

以配对t检验分析不同3种农田季节土壤温度、 湿度的差异,以重复测量的方差分析检验不同农田土 壤呼吸的差异。以往的研究表明,土壤呼吸随温度的 升高呈指数形式增加[24],该关系由 Van't Hoff^[25]提出 的与温度有关的化学反应速率方程衍生而来,本研究 中也以指数方程描述土壤呼吸与土壤温度之间的关 系,将指数方程模拟的土壤呼吸值与实测土壤呼吸值 相减可得到土壤呼吸残差,将土壤呼吸残差与土壤湿 度进行二次方程拟合以研究在消除土壤温度的基础 上土壤呼吸与湿度的关系,将土壤呼吸残差与各植被 指数进行相关分析以研究在消除土壤温度的基础上 土壤呼吸与各植被指数的关系。在相关分析的基础 上,以多元线性回归初步检验各潜在影响因素对土壤 呼吸的影响以及各因素的共线性,以方差膨胀因子 (VIF)来判断其共线性,当某因素 VIF<10时,可作为 进一步的多元非线性回归的自变量,进而建立基于不 具共线性的自变量(土壤温湿度、植被指数或 SPAD 值)的土壤呼吸模型。

2 结果与分析

2.1 土壤温湿度与土壤呼吸

3种农田土壤温度均表现出明显的季节变化规 律,冬小麦、油菜籽、蚕豆田土壤温度季节变化范围分 别为3.6~31.4、3.5~31.6、3.6~31.9℃,3种农田土壤温 度无显著差异(P>0.05)(图1a)。3种农田冬季土壤 湿度相对较高,从冬季到收获期土壤湿度呈现出降低 趋势,冬小麦、油菜籽、蚕豆田土壤湿度季节变化范围 分别为2.3%~39.4%、3.9%~39.8%、4.7%~34.9%(图1b),冬小麦与油菜籽田土壤湿度无显著差异(P>0.05),但两者土壤湿度均显著(P<0.05)高于蚕豆田。

3种农田土壤呼吸与土壤温度的季节变异趋势 基本一致,冬季土壤呼吸相对较低,在作物旺盛生长 的季节土壤呼吸相对较高。冬小麦、油菜籽、蚕豆田 土壤呼吸季节变化范围分别为0.59~3.53、0.43~3.35、 0.26~3.77 µmol·m⁻²·s⁻¹,其季节平均值分别为1.78± 0.15、1.35±0.27、1.61±0.22 µmol·m⁻²·s⁻¹,在整个生长 季尺度上冬小麦田土壤呼吸显著高于油菜籽田(P< 0.05),冬小麦与蚕豆田以及油菜籽与蚕豆田土壤呼 吸无显著差异(P>0.05)。在作物旺盛生长的3—5月 份3种农田土壤呼吸存在显著差异(P<0.05)(图1c)。 2.2 植被指数

从出苗后到作物收获,3种农田的NDVI、DVI、 RVI、EVI、PRI均表现出先增加后减少的趋势(图2a~ 图 2e)。3—4月份,冬小麦和蚕豆田 NDVI 和 PRI 达 到整个生长季节中最大的阶段,且变化不大,3—5月 份,油菜籽田 NDVI 和 PRI 呈现出下降趋势。3种农田 的 DVI、RVI、EVI 均呈现出先增大,后减小的总体趋 势。这表明不同的植被指数反映的作物生长状况存 在差异,且不同作物的植被指数也存在差异。叶片叶 绿素 SPAD 值也存在季节变异性(图 3)。冬小麦 SPAD 值呈现出先下降后上升趋势,在生育末期又降 至最低;油菜籽 SPAD 值总体呈逐渐上升趋势,在生育 末期又迅速降低;蚕豆 SPAD 值季节变异性相对较小, 在生育末期也降至最低。冬小麦、油菜籽、蚕豆的 SPAD 季节平均值分别为44.51±0.96、37.42±1.09、 45.41±1.08。

2.3 土壤呼吸与土壤温度的关系

3种农田土壤呼吸与土壤温度均存在指数回归 关系,土壤温度可解释冬小麦、油菜籽、蚕豆田土壤呼



Figure 1 Seasonal changes in soil temperature, soil moisture, and soil respiration



吸 37.2%、40.9%、36.7% 的季节变异(图 4)。对于油 菜籽田而言,虽然基于土壤温度的幂函数可解释土壤 呼吸约 50% 的变异,但指数方程在机制上具有更普 遍的意义。生长季尺度上冬小麦、油菜籽、蚕豆田土 壤呼吸的温度敏感系数(Q₁₀)分别为 1.66、1.61、2.07。

2.4 土壤呼吸与土壤湿度的关系

冬小麦和蚕豆田土壤呼吸残差与土壤湿度无显 著的回归关系(P>0.05)(图5a、图5c),这表明冬小麦 和蚕豆田土壤湿度对土壤呼吸无显著影响。油菜籽 田土壤呼吸残差与土壤湿度的关系可用二次方程拟 合(P=0.018)(图5b),该方程表明,在不考虑土壤温度 的基础上土壤湿度可解释油菜籽田土壤呼吸27.3% 的季节变异。

2.5 土壤呼吸与植被指数及温湿度的关系

相关分析表明,冬小麦田土壤呼吸残差与NDVI、 RVI、EVI、PRI、SPAD值均存在显著(P<0.05)或极显 著(P<0.01)相关关系(表3),蚕豆田土壤呼吸残差与 NDVI、DVI、RVI、EVI、PRI均存在极显著(P<0.01)相



图 3 叶绿素 SPAD 值的季节变化

Figure 3 Seasonal changes in SPAD value of chlorophyll





Figure 4 Relationship between soil respiration and soil temperature in different croplands





Figure 5 Relationship between residual soil respiration and soil moisture in different croplands

关关系,而油菜籽田土壤呼吸残差与上述植被指数均 不存在显著相关关系,但与 SPAD 值存在显著(P< 0.05)相关关系。这表明土壤呼吸与植被指数的关系 因作物类型的不同而存在差异,油菜籽田土壤呼吸与 植被指数无相关性的原因可能与3—4月份花期叶片 退化有关,此时利用高光谱测定的反射率反映了油菜 花的生理特征,这与其他2种叶片持续生长的作物形 成了对比。

基于土壤温湿度和植被指数建立的土壤呼吸模型比仅包含温度的模型明显提高了模拟效果(图4、表4)。基于土壤温度、NDVI、RVI的模型可解释冬小麦田75.4%的土壤呼吸的季节变异,基于土壤温度和

RVI的模型可解释蚕豆田91.1%的土壤呼吸的季节 变异,基于土壤温湿度和SPAD值的模型也比仅包括 土壤温度的指数模型提高了油菜籽田模拟效果。

3 讨论

3.1 作物类型对农田土壤呼吸的影响

江国福等¹⁶¹收集的全国不同农田观测地点样本的结果表明,在生长季尺度上各作物类型的土壤呼吸大小顺序为:棉花>玉米>大豆>水稻>小麦。Tufekcio-glu等¹²⁶¹报道,大豆和玉米田的土壤呼吸无显著差异。 熊瑛等¹²⁷¹的研究表明,夏熟作物蚕豆的季节平均土壤 呼吸速率与秋熟作物甘薯无显著差异,但显著低于秋

表3	土壤呼吸残差	与植被指数、SPAD	值的相关关系
100	工業「次次生		国日バロハハル

Table 3 Correlation between residual soil respiration and variables of vegetation indexes and SPAD value

作物 Crops		$R_{ m s_res}$	NDVI	DVI	RVI	EVI	PRI
冬小麦 Winter wheat	NDVI	0.701**					
	DVI	0.407	0.521*				
	RVI	0.738**	0.832***	0.568*			
	EVI	0.486*	0.671**	0.979***	0.653**		
	PRI	0.755***	0.847***	0.446	0.643**	0.574*	
	SPAD	0.452*	0.421	0.313	0.210	0.368	0.427
油菜籽 Rapeseed	NDVI	0.068					
	DVI	0.064	0.656**				
	RVI	0.221	0.871***	0.553*			
	EVI	0.084	0.891***	0.869***	0.742***		
	PRI	0.271	0.280	0.055	0.463	0.177	
	SPAD	0.486*	0.481	0.607**	0.550*	0.508*	0.371
蚕豆 Broad bean	NDVI	0.798***					
	DVI	0.802***	0.838***				
	RVI	0.842***	0.959***	0.903***			
	EVI	0.830***	0.872***	0.996***	0.927***		
	PRI	0.718**	0.605**	0.788***	0.741***	0.804***	
	SPAD	0.321	-0.116	-0.201	-0.005	-0.189	0.063

注:R_res为土壤呼吸残差,表中数值为相关系数,*、**、***分别代表在0.05、0.01、0.001水平上显著。

Note: R_s-res represents residual soil respiration. The values in the table are correlation coefficients. *, **, and *** mean the correlation is significant at the 0.05, 0.01, and 0.001 levels, respectively.

表4 基于土壤温湿度、植被指数、SPAD值的土壤呼吸模型

Table 4 Soil respiration models on the basis of soil temperature, moisture, vegetation indexes, and SPAD value

作物 Crops	模型 Models	R^2	Р	n
冬小麦 Winter wheat	R_{s} =2.030e ^(0.062T-2.571NDVI+0.033RVI+8.887PRI+0.013SPAD)	0.754	< 0.001	17
油菜籽 Rapeseed	$R_{\rm s} = 0.901 {\rm e}^{(0.0447 + 0.025SPAD)} (-16.421 M^2 + 7.205 M + 0.160)$	0.645	< 0.001	17
蚕豆 Broad bean	$R_{\rm s}$ =0.183e ^(0.0457+0.134RVI)	0.911	< 0.001	17

注:R、、T、M分别为土壤呼吸、土壤温度、土壤湿度;NDVI、PRI分别为相应的植被指数变量;SPAD为叶绿素特征值。

Note: R_s, T, and M are soil respiration, soil temperature, and soil moisture; NDVI, RVI, PRI are corresponding vegetation index variables; SPAD is the characteristic value of chlorophyll.

熟作物玉米的数值。以往的研究表明,玉米田土壤呼 吸显著高于大豆田,其差异主要体现在高温阶段[28]。 种植不同作物的农田土壤呼吸的不同既与作物种植 季节有关,也与作物本身的特性有关[29],例如,种植固 氮作物大豆比种植棉花条件下的土壤呼吸高,这主要 是因为共生固氮过程需要消耗能量,而固氮所需能量 来自于植物光合产物的分解释放^[30]。本研究中,3种 农田土壤呼吸的大小顺序为:冬小麦>蚕豆>油菜籽, 在作物旺盛生长的3-5月份3种农田土壤呼吸存在 显著差异(P<0.05)(图1c)。不同作物的光合效率不 同,导致输入到根系的含碳物质存在差异,从而影响 根呼吸和根际碳沉积[31-32]。试验所用3种作物都是越 冬夏熟作物,在返青前个体都比较小,高光谱所测各 类植被指数值也比较小,作物土壤呼吸无显著差异; 3-5月作物旺盛生长,个体、群体及植被指数差异明 显。此外,作物冠层覆被度和冠层高度的不同造成的 土壤水热因子和地被物的差异也是造成土壤呼吸差 异的潜在影响因素。

3.2 土壤呼吸与温湿度及植被指数的关系

土壤呼吸与土壤温度的指数关系已被大量的研究 证实,本研究中测得的生长季尺度上冬小麦、油菜籽、大 豆田土壤呼吸的温度敏感系数(Q₁₀)分别为1.66、1.61、 2.07,这与以往研究基本一致^[6,24]。冬小麦田和蚕豆田 土壤呼吸除了与土壤温度具有相关性之外,还与高光 谱植被指数有密切联系,冬小麦田土壤呼吸残差与ND-VI、RVI、EVI、PRI存在显著(P<0.05)或极显著(P<0.01) 相关性,蚕豆田土壤呼吸残差与NDVI、DVI、RVI、EVI、 PRI均存在显著(P<0.05)或极显著(P<0.01)相关性,而 油菜籽田则无类似关系。3—4月份为油菜籽的花期, 其叶片退化,这可能会对利用高光谱测得的反射率产 生影响,这种现象与冬小麦和蚕豆存在明显差异。由 此表明,土壤呼吸与上述植被指数的关系不仅与作物 类型有关,而且与植被指数的类型有关^[22]。

本研究中对苗期到越冬期土壤呼吸残差与植被 指数的相关分析表明两者间无显著相关性(P<0.05), 这说明土壤呼吸季节变异与植被指数季节变异的内 在联系主要体现在作物旺盛生长的阶段,而非苗期到 越冬期。然而,与以往主要关注旺盛生长季节植被指 数观测的研究相比^[18,33],本研究中对苗期到越冬期的 植被指数观测仍非常必要,有助于更全面地了解作物 生长初期的植被指数,例如冬小麦此阶段的NDVI、 RVI、EVI、PRI均达到了比较高的数值,油菜籽和蚕豆 田的 PRI 也相对较高(图2),此阶段的这些基础数据 在作物旺盛生长的 3—5 月份,冬小麦的 NDVI、 RVI高于蚕豆,也高于油菜籽(图 2a、图 2b、图 2e),这 2个指标的差异与土壤呼吸的差异基本一致(图 1c)。 有研究表明,NDVI可反映作物的长势和营养信息,与 植物生产力、叶面积指数等具有一定联系^[34]。种植不 同作物条件下土壤呼吸的差异与植被指数所反映的 作物生长状况的差异有关,叶绿素是吸收光能的主要 物质,影响作物光合作用效率^[35],土壤呼吸、植被指 数、叶绿素 SPAD 值之间的相关性可反映出土壤呼吸 与作物生长指标之间的联系,可通过土壤呼吸与植被 指数的关系体现。

以往有学者建立了基于植被指数的土壤呼吸模 型。武江星[23]基于高光谱观测的植被指数建立的模 型可模拟高粱地不同处理下土壤呼吸90% 左右的季 节变异,Huang等^[18]利用EVI和红边叶绿素指数建立 的模型可模拟玉米和冬小麦田土壤呼吸60%~85%的 季节变异。本研究中,仅基于植被指数的模型对土壤 呼吸季节变异的解释性明显低于温度与植被指数的 复合模型。基于土壤温度和植被指数的模型可有效 模拟冬小麦和蚕豆田土壤呼吸的季节动态,特别是蚕 豆田仅土壤温度和RVI即可解释土壤呼吸91.1%的 季节变异,比仅包含土壤温度的指数方程(R²=0.367) (图4c)明显提高了模拟效果。由于油菜籽花期叶片 生长的特殊性,土壤呼吸与植被指数无关,然而,此时 植株中下部仍存在一定数量的叶片,虽然这些叶片对 于植被指数的贡献小于油菜花,但具有可观的光合作 用,因而油菜籽田土壤呼吸可通过SPAD值和其他水 热因子模拟,这在类似作物的观测中也应予以考虑。 基于温度和植被指数的模拟结果,为利用遥感观测的 植被指数和地面观测的温度模拟土壤呼吸的时空变 化和区域估算提供了理论依据¹⁹⁰,有研究表明基于 Landsat 遥感观测的 EVI、气候因子、地形因子建立的 模型模拟了地面土壤呼吸45.0%的季节变异^[37]。今 后有必要开展更多种作物的观测,这将有助于在大尺 度上对农田土壤呼吸进行估算。

4 结论

(1)不同作物农田的土壤呼吸存在显著差异,差 异最明显的时段为作物旺盛生长的3—5月份。

(2)冬小麦和蚕豆田土壤呼吸与土壤温度和植被

指数有关,在这2种农田可分别建立基于土壤温度、 植被指数、SPAD值以及土壤温度、植被指数的土壤呼 吸模型。

(3)由于花期叶片退化,油菜籽田土壤呼吸与植 被指数无关,其季节变化仅与土壤温湿度和SPAD值 有关。

参考文献:

- [1] Canadell J G, Corinne Le Quéré, Raupach M R, et al. Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks[J]. *Proceedings of the National Acadamy of Sciences of the USA*, 2007, 104(47):18866–18870.
- [2] Bond-Lamberty B, Bailey V L, Chen M, et al. Globally rising soil heterotrophic respiration over recent decades[J]. *Nature*, 2018, 560 (7716):80-83.
- [3] Xu M, Shang H. Contribution of soil respiration to the global carbon equation[J]. Journal of Plant Physiology, 2016, 203(7631):16–18.
- [4] Dong W, Hu C, Chen S, et al. Tillage and residue management effects on soil carbon and CO₂ emission in a wheat-corn double-cropping system[J]. Nutrient Cycling in Agroecosysems, 2009, 83(1):27–37.
- [5] Lohila A, Aurela M, Regina K, et al. Soil and total ecosystem respiration in agricultural fields: Effect of soil and crop type[J]. *Plant and Soil*, 2003, 251(2):303-317.
- [6] 江国福,刘 畅,李金全,等.中国农田土壤呼吸速率及驱动因子
 [J].中国科学:生命科学,2014,44(7):725-735.
 JIANG Guo-fu, LIU Chang, LI Jin-quan, et al. Soil respiration and driving factors of farmland ecosystems in China[J]. Scientia Sinica Vitae:Life Sciences, 2014, 44(7):725-735.
- [7]周 泉,邢 毅,马淑敏,等.西南旱地不同种植模式下土壤呼吸及 水热因子对极端低温的响应[J]. 草业学报, 2017, 26(6):37-44. ZHOU Quan, XING Yi, MA Shu-min, et al. Responses of soil respiration to extreme low temperature and hydro-thermal factors in dryland region with different cropping patterns in southwest China[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(6):37-44.
- [8] Akinremi O O, McGinn S M, McLean H D J. Effects of soil temperature and moisture on soil respiration in barley and fallow plots[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1999, 79(1):5–13.
- [9] Hursh A, Ballantyne A, Cooper L, et al. The sensitivity of soil respiration to soil temperature, moisture, and carbon supply at the global scale
 [J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(5):2090–2103.
- [10] Badrt D V, Vivanco J M. Regulation and function of root exudates[J]. Plant Cell, and Environment, 2009, 32:666–681.
- [11] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, et al. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1):115–146.
- [12] Subke J A, Inglima I, Cotrufo M F. Trends and methodological impacts in soil CO₂ efflux partitioning: A meta-analytical review[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(6):921-943.
- [13] 闫静静, 杨兰芳, 庞 静. 大豆和棉花生长对土壤呼吸的影响[J]. 作物学报, 2010, 36(9):1559-1567.

YAN Jing-jing, YANG Lan-fang, PANG Jing. Effects of soybean and cotton growth on soil respiration[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36 (9):1559–1567.

- [14] Wu C Y, Niu Z, Tang Q, et al. Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: Modeling and validation[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(8/9):1230–1241.
- [15] Huang N, Gu L H, Niu Z. Estimating soil respiration using spatial data products: A case study in a deciduous broadleaf forest in the Midwest USA[J]. Journal of Geophysical Research: Atmosphere, 2014, 119 (11):6393-6408.
- [16] Gamon J A, Field C B, Goulden M L, et al. Relationship between ND-VI, canopy structure and photosynthesis in three Californian vegetation types[J]. *Ecological Applications*, 1995, 5(1):28-41.
- [17] Sims D A, Gamon J A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81 (2):337–354.
- [18] Huang N, Niu Z, Zhan Y, et al. Relationships between soil respiration and photosynthesis-related spectral vegetation indices in two cropland ecosystems[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2012, 160: 80-89.
- [19] 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.
- [20] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent of confounded factors controlling soil respiration in a temperature mixed hardwood forest[J]. *Global Change Biology*, 1998, 4:217–227.
- [21] Chen S T, Zhang Y, Chen H S, et al. Effects of elevated O₃ on soil respiration in a winter wheat-soybean rotation cropland[J]. *Soil Research*, 2012, 50(6):500-506.
- [22] Cicuéndez V, Rodríguez-Rastrero M, Huesca M, et al. Assessment of soil respiration patterns in an irrigated corn field based on spectral information acquired by field spectroscopy[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2015, 212:158-167.
- [23] 武江星. 生物炭和覆膜对高粱高光谱特征及其土壤呼吸的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.

WU Jiang-xing. The effect of biochar and film mulching on high spectral characteristics of sorghum and its soil respiration[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016.

- [24] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration [J]. Functional Ecology, 1994, 8:315–323.
- [25] Van't Hoff J H. Lectures on theoretical and physical chemistry. Part 1:Chemical dynamics[M]. London: Edward Arnold, 1898:224-229.
- [26] Tufekcioglu A, Raich J W, Isenhart T M, et al. Soil respiration within riparian buffers and adjacent crop fields[J]. *Plant and Soil*, 2001, 229 (1):117-124.
- [27] 熊 瑛, 王龙昌, 赵琳璐, 等. 保护性耕作下蚕豆/玉米/甘薯三熟制农田土壤呼吸、碳平衡及经济-环境效益特征[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(11):1653-1662.

XIONG Ying, WANG Long-chang, ZHAO Lin-lu, et al. Soil respira-

2020年5月 姚雪雯,等:不同作物农田的土壤呼吸与高光谱的关系

tion, carbon balance, and economic and environmental benefits of triple intercropping system of fava bean, maize and sweet potato under conservation tillage[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26 (11):1653-1662.

[28] 陈书涛,朱大威,牛传坡,等.管理措施对农田生态系统土壤呼吸的影响[J].环境科学,2009,30(10):2858-2865.
CHEN Shu-tao, ZHU Da-wei, NIU Chuan-po, et al. Effects of management regime on soil respiration from agroecosystems[J]. Environ-

mental Science, 2009, 30(10): 2858-2865.

- [29] 杨新明, 韩 磊, 庄 涛. 北方农牧交错区不同土地利用方式下土 壤呼吸动态特征[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(8):1733-1740. YANG Xin-ming, HAN Lei, ZHUANG Tao. Dynamics of soil respiration under different land uses from an agro-pastoral ecotone of Northern China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(8): 1733-1740.
- [30] Warembourg F R, Roumet C. Why and how to estimate the cost of symbiotic N₂ fixation? A progressive approach based on the use of ¹⁴C and ¹⁵N isotopes[J]. *Plant and Soil*, 1989, 115:167–177.
- [31] Högberg P, Nordgren A, Buchmann N, et al. Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration[J]. *Nature*, 2001, 411(6839):789-792.
- [32] Kuzyakov Y, Cheng W. Photosynthesis controls of rhizosphere respiration and organic matter decomposition[J]. Soil Biology and Biochemis-

try, 2001, 33(14):1915-1925.

- [33] Drerup P, Brueck H, Scherer H W. Evapotranspiration of winter wheat estimated with the FAO 56 approach and NDVI measurements in a temperate humid climate of NW Europe[J]. Agricultural Water Management, 2017, 192:180-188.
- [34] Gitelson A A, Vina A, Verma S B, et al. Relationship between gross primary production and chlorophyll content in crops: Implications for the synoptic monitoring of vegetation productivity[J]. Journal of Geophysical Research-Atmosphere, 2006, 111: D08S11, doi: 10. 1029/ 2005JD006017.
- [35] Li Y B, Song H, Zhou L, et al. Vertical distributions of chlorophyll and nitrogen and their associations with photosynthesis under drought and rewatering regimes in a maize field[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 272/273:40-54.
- [36] Wu C Y, Gaumont-Guay D, Black T A, et al. Soil respiration mapped by exclusively use of MODIS data for forest landscapes of Saskatchewan, Canada[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, 94:80-90.
- [37] Berryman E M, Vanderhoof M K, Bradford J B, et al. Estimating soil respiration in a subalpine landscape using point, terrain, climate, and greenness data[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2018, 123:3231-3249.