

# 生物炭和地膜覆盖下高粱高光谱特征及其与土壤呼吸的关系

崔慧瑾<sup>1</sup>, 刘菊<sup>2</sup>, 杜自强<sup>3</sup>, 严俊霞<sup>3</sup>, 焦晓燕<sup>4</sup>

(1.山西大学 环境与资源学院, 太原 030006; 2.山西省林业科学研究院, 太原 030012;

3.山西大学 黄土高原研究所, 太原 030006; 4.山西省农业科学院农业环境与资源研究所, 太原 030031)

**摘要:**准确估算不同生态系统的土壤呼吸速率对全球碳循环研究具有重要意义。以高粱为研究对象,对生物炭添加和地膜覆盖处理下不同时期高粱的高光谱特征以及土壤呼吸速率进行了定期测定,基于高光谱和土壤呼吸数据建立了他们之间的定量关系,目的是为间接估算土壤呼吸提供方法。田间试验设对照(CK)、生物炭添加(B)、地膜覆盖(P)、生物炭添加+地膜覆盖(B+P)4个处理。结果表明:(1)与对照相比,地膜覆盖使土壤呼吸( $R_s$ )显著增加( $p < 0.05$ ),添加生物炭后 $R_s$ 没有明显变化,生长季 $R_s$ 的平均值大小依次为:9.43  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  (B+P) > 8.88  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  (P) > 7.35  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  (B) > 6.68  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  (CK)。(2)不同生育期冠层近红外波段反射率表现为,拔节期B+P和P处理显著高于CK和B,但是抽穗期CK和B处理显著高于P和B+P,灌浆期和收获期4个处理之间无明显差异。(3)高粱冠层光谱反射率、一阶微分、光谱特征参数及已有的植被指数均与 $R_s$ 呈显著相关,最大的相关系数可达0.80以上。(4)综合考虑模型的模拟精度和验证精度,估算高粱土壤呼吸的最佳模型为: $R_s = 1\,666.3R'_{747} + 1.332$  [ $R^2 = 0.69$ ,  $p < 0.01$ , RMSE = 2.56  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ],其验证模型的 $R^2$ , RMSE, Slope 分别为0.75, 2.28  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 0.715 8。研究结果可为进一步开展区域农田土壤 $\text{CO}_2$ 排放通量的无损监测提供借鉴。

**关键词:**生物炭添加; 地膜覆盖; 土壤呼吸; 高光谱估算; 高粱

中图分类号:S514

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)03-0015-08

## Hyperspectral Characteristics of the Sorghum Field and Their Relations with Soil Respiration Under the Conditions of Plastic Film Mulching and Biochar Application

CUI Huijin<sup>1</sup>, LIU Ju<sup>2</sup>, DU Ziqiang<sup>3</sup>, YAN Junxia<sup>3</sup>, JIAO Xiaoyan<sup>4</sup>

(1.College of Environmental and Resource Sciences, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2.Shanxi Academy of

Forestry Sciences, Taiyuan 030012, China; 3.Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

4.Institute of Agricultural Environment and Resources, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030031, China)

**Abstract:** Accurate estimate of soil respiration ( $R_s$ ) in different ecosystems has great significance for the global carbon cycle research. Taking sorghum field as the research sample, we carried out the periodical measurement of both soil respiration and canopy hyperspectral characteristics under the conditions of bio-charcoal addition and plastic film mulching, and established the relationship between the  $R_s$  and the canopy hyperspectral indices to provide an approach for indirectly estimate total soil emission based on those dataset. Four different field treatments in the experiment were control (CK), biochar (B), plastic film mulching (P), and biochar + plastic film mulching (B+P). The results are showed as follows. (1) Compared with CK treatment, the P treatment significantly promoted  $R_s$  ( $p < 0.05$ ), and there was no significant change in  $R_s$  for B treatment. The average value of the  $R_s$  in the growing season was 9.43  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 8.88  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 7.35  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  and 6.68  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  in B+P, P, B and CK treatments, respectively. (2) The reflectance of the near-infrared band of the canopy in different growth stages was different. The reflectance values

收稿日期:2019-08-07

修回日期:2018-08-28

资助项目:高等学校服务产业创新学科建设项目“土壤污染生态修复学科群”;国家现代农业高粱产业技术体系建设专项(CARS-06-02-03)

第一作者:崔慧瑾(1995—),女,山西晋中人,硕士研究生,研究方向为:生态系统碳循环。E-mail:chj205093@163.com

通信作者:严俊霞(1976—),女,山西太原人,副教授,研究方向为:生态系统碳循环。E-mail:yjx422@sxu.edu.cn

in the B+P and P treatments were significantly higher than those in the CK and B treatments at jointing stage, but the values in CK and B treatments were significantly higher than those in the P and B+P treatments at heading stage, and no significant difference was found among the four treatments during grain filling and harvesting stages. (3) The spectral reflectance, first derivative spectrum, spectral characteristic parameters, and existing vegetation index of the sorghum canopy were significantly correlated with  $R_s$  and the highest correlation coefficient was more than 0.80. (4) Comprehensive consideration for the simulation accuracy and verification precision of the model, the best one for the  $R_s$  estimation in the sorghum field could be described as  $R_s = 1666.3R'_{747} + 1.332$  [ $R^2 = 0.69$ ,  $p < 0.01$ , RMSE =  $2.56 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ], and with respect to the verification model,  $R^2$ , RMSE and slope were 0.75,  $2.28 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  and 0.715 8, respectively. The results of the study can provide the technical support for making non-destructive monitor for  $R_s$  emission from agricultural ecosystems at large scale.

**Keywords:** biochar; plastic film mulching; soil respiration; hyperspectral estimation; sorghum field

土壤是陆地生态系统最大的碳库,其含碳量是大气的 2 倍<sup>[1]</sup>,每年从土壤中释放的碳是年化石燃料燃烧碳排放量的 10 倍以上,在全球碳循环研究中起着关键作用<sup>[2]</sup>,其微小变化会显著影响大气中的 CO<sub>2</sub> 浓度,从而影响全球气候变化<sup>[3]</sup>。因此,精确地估算土壤呼吸量不仅可以为全球碳平衡估算和评估全球变化的潜在效应提供最基本的数据,而且能够为政府决策和行业发展提供决策依据。气室法由于方便、灵活,在土壤呼吸测定中得到了广泛应用,但该方法测定过程中对植被生长有一定的干扰性,且费时费力。如何快速准确测定土壤呼吸成为研究者们普遍关注的问题之一。

研究表明,在其他自然因素,如土壤温度、水分、质地等相同的情况下,生物因子就成为影响土壤呼吸变化的主要因素,如植被类型、光合作用、根系生物量、叶面积指数等因素<sup>[4]</sup>。光合作用将光合产物分配给根系从而影响土壤呼吸<sup>[5]</sup>,然而,光合作用和生物量大范围的观测是很难实现的。卫星遥感能瞬时获取大区域和连续分布的地表各种参数,如植被指数、叶面积指数、总初级生产力等,弥补了实地观测的不足。高光谱遥感具有波段多、波谱分辨率高且连续分布的优势,已经用于估算作物的地上生物量、叶绿素含量及叶面积指数等生理生化参数等研究<sup>[6-8]</sup>。利用高光谱指数进行土壤呼吸的研究已有报道,如 Liang

等<sup>[9]</sup>利用光谱植被指数对亚高山草甸的土壤呼吸进行了研究;Cicuendze 等<sup>[10]</sup>利用野外实测光谱信息对玉米地的土壤呼吸进行了研究;Huang 等<sup>[11]</sup>同样利用光谱植被指数对农作物生态系统的土壤呼吸进行了研究。这些研究所建立的关系模型都借用于实际测定的其他因素如土壤温度。而完全基于高光谱遥感数据模拟土壤呼吸的研究鲜有报道。本研究以高粱为研究对象,基于对 4 个处理[对照(CK)、生物炭(B)、地膜覆盖(P)、生物炭+地膜覆盖(B+P)],同步观测的土壤呼吸速率和冠层高光谱数据为数据源,首先探讨生物炭添加和地膜覆盖对土壤呼吸及冠层高光谱特征的影响,并基于高光谱数据对土壤呼吸进行定量模拟,以建立一种利用高光谱特征指数估算土壤呼吸的方法。

# 1 材料与方法

## 1.1 研究区概况

试验在山西省农业科学院东阳试验基地进行。该试验地位于山西省晋中市东阳镇(北纬 37°32′,东经 112°40′),海拔 804.6 m,所在区域为暖温带半干旱大陆季风气候,年均气温 9.7 ℃,年均降水量 440.7 mm,年日照数不低于 253.5 h。试验样地土壤理化性质见表 1。

表 1 样地土壤理化性质

土壤类型	土壤质地	pH	电导率/ (mS · cm <sup>-1</sup> )	有机质含量/ (g · kg <sup>-1</sup> )	全 N/ (g · kg <sup>-1</sup> )	有效 P/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	速效 K/ (mg · kg <sup>-1</sup> )
石灰性褐土	壤质砂土	8.47	0.28	6.4	0.84	6.53	143.67

## 1.2 试验设计

试验供试对象为高粱,品种为晋杂 34 号,于 2015 年 5 月 6 日播种、10 月 8 日收获。共设 4 个处理:对照(CK)、生物炭(B)、地膜覆盖(P)、生物炭+地膜覆盖(B+P)。4 个处理施肥量相同,N、P、K 的

纯养分施用量分别为 0.225,0.075,0.030 t/hm<sup>2</sup>,N 肥一半基施,一半在高粱拔节期追施,P、K 肥均作为底肥在播种前基施。生物炭施用量为 13.05 t/hm<sup>2</sup>,在高粱播种前翻耕时与其他肥料一起均匀施入土壤。所施生物炭由河南三力集团生产,原料为小麦秸秆,

含全 C 434.11 g/kg、全 N 6.8 g/kg、有效 P 0.29 g/kg、速效 K 22.73 g/kg,pH 10.00,电导率 7.9 mS/cm。地膜覆盖处理从播种到收获一直覆盖,覆盖时行间预留 10 cm 宽空间用于放置土壤呼吸测定环。试验小区面积为 30(5×6) m<sup>2</sup>,随机分区排列,每个处理设 3 个重复,共 12 个小区。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤呼吸速率 土壤呼吸速率( $R_s$ )用便携式光合作用系统 LI-COR6400 连接土壤呼吸气室 6400-09 测定,从 2015 年 6 月开始,至 10 月底结束,间隔 10~15 d 测定一次。第一次观测前一天在每个小区随机选择 3 个样点放置 PVC 环,每个处理样地放置 9 个 PVC 环,每个环测定 3 个循环,取平均值作为该环的土壤呼吸速率,最终取 9 个样点的平均值作为该处理样地的  $R_s$  值,用于土壤呼吸与其他因子的关系分析。

1.3.2 光谱测定 冠层光谱采用美国 ASD 公司生产的手持式地物光谱仪 FieldSpecHandHeld2 测定,其光谱范围为 325~1 075 nm,视场角为 25°。测定选择晴朗无云的天气进行,测定时间为 10:00—14:00,与  $R_s$  测定日期相同。测定时保持传感器探头垂直向下,距冠层垂直高度约 1 m。每个小区选择 3 个点测定,每个点获得 10 条光谱曲线,取平均值作为该处理的光谱反射值,每个小区测定前、后都立即进行白板校准。用 ViewSpec Pro 软件对原始光谱曲线进行预处理和一阶微分计算。本文所用的光谱特征参数主要有:原始光谱反射率、一阶导数光谱、从原始光谱和一阶微分光谱提取的基于高光谱位置、高光谱面积、高光谱植被指数的变量,详见表 2。选用的已经报道的植被指数见表 3。

1.4 模型构建、评价与验证

采用交叉验证法对数据建模,从所有的有效样本中,随机选取 2/3 的样本作为建模数据,分别以高光谱特征参数、植被指数为自变量,土壤呼吸为因变量,选取直线模型、指数模型、对数模型、抛物线模型及乘

幂模型建立估测模型,用决定系数  $R^2$  和均方根误差 RMSE 作为精度评价标准。用剩余 1/3 的样本作为验证数据,对模型进行精度检验,用验证模型的  $R^2$ ,RMSE 和斜率(Slope)作为精度评价标准。 $R^2$  越高, RMSE 越低, Slope 越接近于 1,模型的精度就越高。RMSE 的计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\sum (y_m - y_c)^2 / n}$$

式中: $y_m$  是土壤呼吸速率的实测值; $y_c$  是模型的估测值; $n$  为样本的数量。

2 结果与分析

2.1 生物炭和地膜覆盖对高粱地土壤呼吸的影响

4 个处理高粱地的  $R_s$  季节变化趋势一致,最高值出现在 7 月 21 日,之后持续下降(图 1)。方差分析表明,各生育期之间总体差异显著,CK 和 B 处理抽穗期均值最高分别为 10.01,9.92  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , P 和 B+P 处理拔节期最高分别为 13.08,13.61  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,4 个处理均值最低值均出现在收获期。 $R_s$  的季节变化幅度(最大值与最小值之差除以平均值)B 处理最高为 246%,其余 3 个处理差异不大,分别为 183%(CK),179%(B+P),175%(P)。方差分析表明,全生育期 4 个处理  $R_s$  的总体差异显著( $p < 0.05$ ),P 和 B+P 处理显著高于 B 和 CK,从大到小依次为:B+P [ $9.43 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ] > P [ $8.88 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ] > B [ $7.35 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ] > CK [ $6.68 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]。从单个生育期来看,除拔节期 B 处理的  $R_s$  [ $9.20 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ] 显著高于 CK [ $7.34 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ] 外,在其余 3 个生育期(抽穗期、灌浆期、成熟期)与 CK 均差异不显著;P 和 B+P 处理在拔节期、抽穗期、收获期均显著高于 CK 和 B 处理,灌浆期 B+P 处理显著高于 CK 和 B 处理,而 P 与 CK 和 B 处理差异不显著;B+P 在 4 个生育期与 P 均无显著差异。单个生育期与全生育期的规律相一致,表明地膜覆盖可以使土壤呼吸明显提高,而生物炭的添加对土壤呼吸的影响不显著。

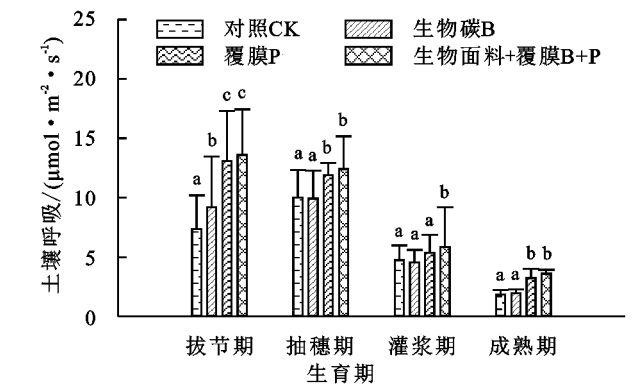
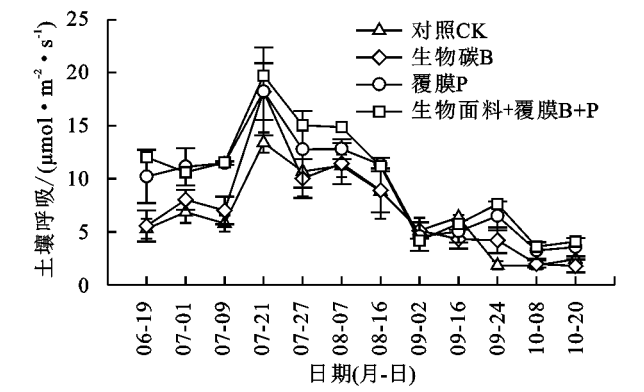


图 1 生物炭和覆膜对土壤呼吸的影响

2.2 生物炭和地膜覆盖对高粱冠层高光谱的影响

从图 2 可以看出,不同生育期 4 个处理的高粱冠层光谱变化趋势基本一致,可见光范围 550 nm 处有明显的绿峰、680 nm 处出现低谷、680~760 nm 光谱反射率随波长增加快速增加,近红外波段有一个较高的平台。同一生育期不同处理在近红外平台的反射率有所差异,拔节期至抽穗期,CK 和 B 处理的近红外反射率显著上升,从 0.30~0.50 左右,之后逐渐下

降,至灌浆期后期和收获期下降到 0.27 左右;P 和 B+P 处理近红外平台在拔节期最高,此后逐步减低,灌浆期和成熟期降至 0.30 以下。总体而言,拔节期近红外平台反射率大小表现为 B+P>P>CK>B,差值达到 0.14;抽穗期相差 0.12,从高到底依次为 CK>B>P>B+P,灌浆期和收获期 4 个处理差异不大,平均差值在 0.02 左右。

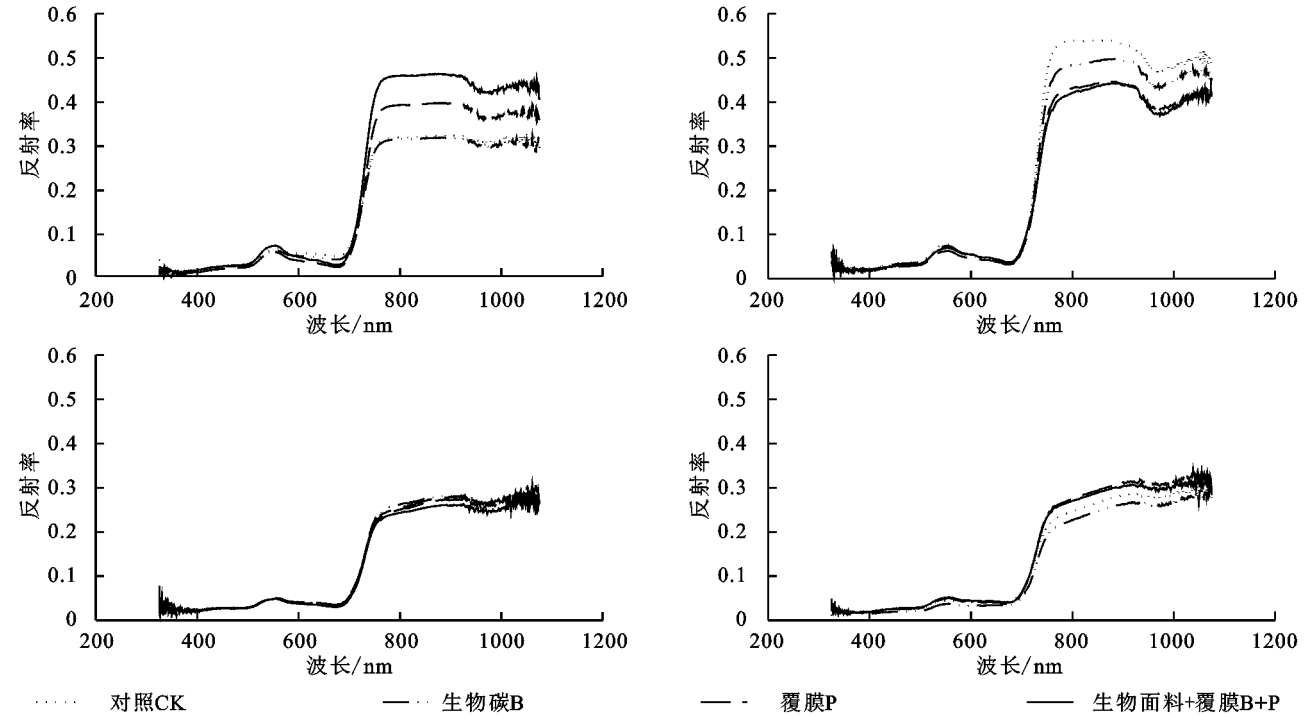


图 2 生物炭和地膜覆盖下高粱不同生育期冠层光谱反射率

2.3 土壤呼吸与高光谱变量的相关性分析

2.3.1 土壤呼吸与高光谱反射率及其一阶导的相关性分析 用 4 个处理所有测定的数据分析表明,高粱地  $R_s$  与光谱反射率的相关系数在 325~721 nm 呈负相关,其中 328~329,332~337,339~340,343~349,354~361,363~364,368,372,376,381~382,384~387,389~393,395~514,577~610,706~711 nm 达到显著水平 ( $p<0.05$ ),338,341~342,350~353,362,365~367,369~371,373~375,377~380,383,388,394,611~705 nm 达到了极显著水平 ( $p<0.01$ ),相关系数绝对值最高为 0.453,对应波段为 681~686 nm。在波段 722~1075 nm 范围内为正相关,其中 729,730 nm 处为显著正相关 ( $p<0.05$ ),730~1 075 nm 为极显著正相关 ( $p<0.01$ ),波段 779~782 nm 的相关系数最高均为 0.737(图 3)。

在 325~503 nm 范围内  $R_s$  与光谱一阶微分导数的相关性弱,仅有个别波段达到显著或极显著水平;在 503~534 nm 相关性较好相关系数从 0.334~0.552,之后相关系数由正值变为负值,在 550~680

nm 相关系数在 -0.383~-0.704,其中 625,651 nm 处相关系数绝对值都大于 0.70;683~691 nm 范围内相关系数由负变正,均未达到显著水平 ( $p<0.05$ ),693~779 nm 范围内相关性较好,在 731~754 nm 范围内相关系数都高于 0.80;在 780~961 nm 波段范围内,除 785,786~787,795~798,806~813,818~819,824~827,856~862,867~894,899~912,917~929,935~941,947~954,960~961 nm 相关性达到显著或极显著外,其余波段处相关性都不显著,962~1 075 nm 整体相关性较弱。

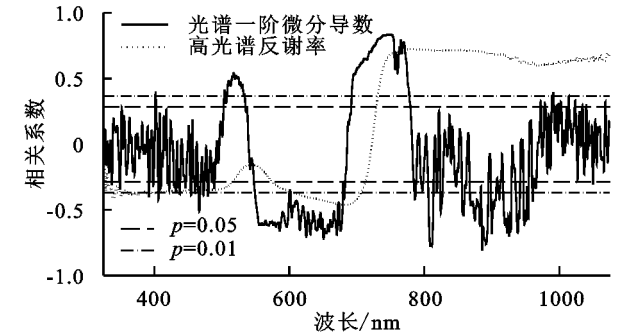


图 3 高粱地土壤呼吸与冠层高光谱反射率及其一阶导的相关系数



2.3.2 土壤呼吸与高光谱特征变量的相关性分析

从表 2 可以看出,  $R_s$  与  $D_b, D_r, \lambda_r, \lambda_o, SD_b, SD_r, R_g/R_r, (R_g - R_r)/(R_g + R_r), SD_r/SD_b, (SD_r - SD_b)/(SD_r + SD_b), (SD_r - SD_y)/(SD_r + SD_y)$  呈极显著正相关, 与  $\lambda_y$  呈显著正相关, 与  $D_y, \lambda_g, R_r, SD_y, SD_o$  呈

极显著负相关, 由表 2 还可以看出:  $R_s$  与  $\lambda_b, R_g, SD_r/SD_y$  相关性不显著。其中,  $R_s$  与  $R_g/R_r, (R_g - R_r)/(R_g + R_r), D_r, SD_r$  的相关系数大于 0.80, 表明采用这些光谱特征变量对高粱地土壤呼吸速率进行估算具有较高的可行性。

表 2 土壤呼吸与高粱冠层光谱特征变量的相关系数

特征光谱参量	定义	相关系数( $r$ )
$D_b$	蓝边幅值	0.51**
$\lambda_b$	蓝边位置	0.24
$D_y$	黄边幅值	-0.52**
$\lambda_y$	黄边位置	0.30*
$D_r$	红边幅值	0.81**
$\lambda_r$	红边位置	0.46**
$R_g$	绿峰反射率	-0.17
$\lambda_g$	绿峰位置	-0.71**
$R_r$	红谷反射率	-0.45**
$\lambda_o$	红谷位置	0.49**
$SD_b$	蓝边面积	0.46**
$SD_y$	黄边面积	-0.64**
$SD_r$	红边面积	0.80**
$SD_o$	红谷面积	-0.71**
$R_g/R_r$	绿峰反射率 $R_g$ 与红谷反射率 $R_r$ 的比值	0.83**
$(R_g - R_r)/(R_g + R_r)$	绿峰反射率 $R_g$ 与红谷反射率 $R_r$ 的归一化值	0.82**
$SD_r/SD_b$	红边面积 $SD_r$ 与蓝边面积 $SD_b$ 的比值	0.52**
$(SD_r - SD_b)/(SD_r + SD_b)$	红边面积 $SD_r$ 与蓝边面积 $SD_b$ 的归一化值	0.41**
$SD_r/SD_y$	红边面积 $SD_r$ 与黄边面积 $SD_y$ 的比值	-0.17
$(SD_r - SD_y)/(SD_r + SD_y)$	红边面积 $SD_r$ 与黄边面积 $SD_y$ 的归一化值	0.44**

注: \* 表示  $p < 0.05$ ; \*\* 表示  $p < 0.01$ 。

2.3.3 土壤呼吸与光谱植被指数的相关性分析 本文采用的已报到的植被指数见表 3。相关分析表明, 高粱地的  $R_s$  与 9 种高光谱植被指数之间的相关性均达到 0.01 极显著水平, 相关系数大于 0.70 的植被指数有 DVI, RVI, EVI, VOG1, PRI, 相关系数分别为 0.763, 0.775, 0.770, 0.755, 0.760 (图 4)。

表 3 本文采用的高光谱植被指数

植被指数	计算公式	数据来源
NDVI	$(R_{800} - R_{680}) / (R_{800} + R_{680})$	参考文献[12]
NDVI <sub>705</sub>	$(R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705})$	参考文献[13]
DVI	$R_{800} - R_{680}$	参考文献[14]
RVI	$R_{800} / R_{680}$	参考文献[15]
EVI	$2.5(R_{800} - R_{680}) / (R_{800} + 6R_{680} - 7.5R_{450} + 1)$	参考文献[16]
VOG1	$R_{740} / R_{720}$	参考文献[17]
VOG2	$(R_{734} - R_{747}) / (R_{715} + R_{726})$	参考文献[17]
VOG3	$(R_{734} - R_{747}) / (R_{715} + R_{720})$	参考文献[17]
PRI	$(R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570})$	参考文献[18]

2.4 土壤呼吸的高光谱估算模型构建与验证

根据上述的分析结果, 选取与土壤呼吸相关系数最高的波段原始光谱反射率和导数光谱一阶微分(图 3)、相关系数大于 0.80 的高光谱特征变量(表 2)、相关系数大于 0.70 的植被指数(图 4)作为自变量, 土壤呼吸作为因变量, 利用建模数据集采用线性、指数、二次多项式、对数、幂函数模型进行回归分析, 选取  $R^2$  最高、RMSE 最低的模型作为最优模型, 结果见表 4。从表 4 中可以看出, 除  $R_{779}$  外其他光谱特征变量对高粱土壤呼吸季节变化的解释能力都超过了 60%, 建模精度最高的 4 个变量依次为  $(R_g - R_r)/(R_g + R_r), R_g/R_r, PRI, R'_{747}$ , 分别能解释土壤呼吸季节变化的 77%, 75%, 70%, 69%, RMSE 分别为 2.27, 2.28, 2.52, 2.56  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

为了验证模型的适用性和稳健性, 利用验证数据集对模型预测能力进行验证。采用  $R^2$ , RMSE, Slope 为精度评价指标, 结果见表 4。对土壤呼吸验证精度最高的 4 个光谱参数依次为  $R'_{747}, D_r, SD_r,$

PRI。综合比较模型的建模精度与预测精度可知,  $R_g/R_r$ 、 $(R_g - R_r)/(R_g + R_r)$ 、DVI, RVI, EVI, VOG1, PRI 的验证精度低于建模精度, 表明这些参数用于模拟土壤呼吸时模型的稳定性不强, 而  $R_{779}$ ,  $R'_{747}$ ,  $D_r$ ,  $SD_r$  的建模精度高于验证精度。整体上看, 以  $R'_{747}$  为自变量建立的线性估算模型效果最佳, 它是所有光谱特征参数中唯一的建模精度和预测精度都排在前 4 名的参数, 其估算模型为  $y = 1\,666.3R'_{747} + 1.332$  ( $R^2 = 0.69$ ,  $p < 0.01$ ,  $RMSE = 2.56\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,  $n = 16$ ), 其验证模型的  $R^2$ ,  $RMSE$ ,  $Slope$  分别为  $0.75$ ,  $2.28\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,  $0.715\ 8$ 。

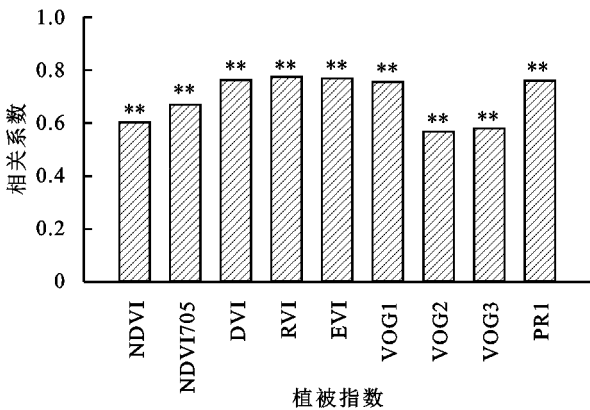


图 4 高粱地土壤呼吸与植被指数的相关系数

表 4 土壤呼吸与高光谱变量的线性与非线性拟合模型参数

变量	模型	a	b	c	建模		验证		
					$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	Slope
$R_{779}$	抛物线	-95.8010	104.7000	-15.755	0.55	3.00	0.62	2.81	0.6525
$R'_{747}$	线性	1666.3000	1.3320		0.69	2.56	0.75	2.28	0.7158
$D_r$	指数	2.0240	182.1700		0.69	3.18	0.73	2.37	0.719
$SD_r$	指数	1.9057	4.5543		0.68	3.08	0.73	2.38	0.7137
$R_g/R_r$	线性	6.9043	-3.8395		0.75	2.28	0.58	2.94	0.6052
$(R_g - R_r)/(R_g + R_r)$	指数	2.9970	3.4667		0.77	2.27	0.56	3.04	0.6001
DVI	指数	1.8986	4.2432		0.64	3.23	0.52	3.24	0.6525
RVI	抛物线	-0.0091	0.8406	0.9673	0.65	2.70	0.52	3.15	0.5346
EVI	指数	1.6666	2.6162		0.68	2.95	0.59	2.91	0.6391
VOG1	抛物线	5.3588	-9.2921	6.0856	0.65	2.69	0.55	3.07	0.5352
PRI	抛物线	1375.0000	208.9800	10.8690	0.70	2.52	0.63	2.87	0.5795

3 讨论

大量研究表明,生物炭施用可以有效减低土壤容重、增加土壤有机质含量、持留土壤养分,为土壤微生物的生长和繁殖提供良好的环境,从而改良土壤,提高土壤肥力,促进作物增产和品质提升,进而影响土壤呼吸速率<sup>[19-21]</sup>。试验规模、生物炭施用量、生物炭制备的热解温度等因素会影响生物炭输入对土壤呼吸的影响效应。研究表明,盆栽试验中生物炭输入对土壤呼吸具有显著的促进作用,但是田间试验却没有显著性的影响<sup>[22]</sup>。随着生物质炭添加量的增加,生物质炭对土壤呼吸的影响程度加深。Stewart 等<sup>[23]</sup>报道了当施用 100 t/hm<sup>2</sup> 生物炭时土壤呼吸增加 35%,而施用 25 t/hm<sup>2</sup> 时土壤呼吸仅增加 8%。施用量较小的研究一般对土壤呼吸没有显著影响(20, 40 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[24]</sup>。高温制备的生物炭一般比低温制备的生物炭稳定<sup>[25]</sup>。Sagrilo 等<sup>[26]</sup>指出当制备温度低于 350 ℃ 时,生物炭使土壤呼吸显著增加,而当制备温度高于 350 ℃ 时,则没有显著影响。本研究中生物炭的施用并没有显著改变高粱地的土壤呼吸速率,可能是因为我们的研究中生物炭施用量较低,每年施用量为 13.05 t/hm<sup>2</sup>。

植被冠层近红外波段光谱反射率能够反映植被长

势状况,当植被生长旺盛、覆盖度高时近红外波段反射率较高,但植被受到环境胁迫(如病虫害)或植被衰老时,近红外波段反射率则较低。本研究中,高粱拔节期冠层近红外波段反射率 B+P 和 P 处理显著高于 CK 和 B,抽穗期 CK 和 B 处理显著高于 P 和 B+P,灌浆期和收获期 4 个处理差异不大,表明地膜覆盖改变了作物的生育节律,在生育期前期促进了高粱植株的生长,中后期则有一定的抑制作用,使成熟期提前,提早进入衰老,与王颖等<sup>[27]</sup>研究结果相一致。本研究中,与 CK 相比,P 处理和 B+P 处理拔节期、抽穗期、灌浆期、成熟期近红外波段反射率的平均差值分别为 0.06, -0.11, 0.00, 0.03 (P-CK) 和 0.13, -0.12, -0.02, 0.03 (B+P-CK),呈减小趋势,即在高粱生长前期(拔节期),地膜覆盖促进高粱生长,而从抽穗期后,地膜覆盖则抑制高粱生长;B 处理的平均值差值分别为 -0.01, -0.06, 0.00, -0.02 (B-CK),没有明显变化,表明生物炭对高粱的生长没有明显的作用。

农田土壤呼吸速率的大小受作物生长的影响,作物冠层光谱特征是其生长及生理过程的反映。植被指数是表征植物光合能力的重要指标,已被成功地运用于农田生态系统、森林生态系统、亚高山草甸土壤呼吸的模拟<sup>[28-29]</sup>。本研究中,高粱地的土壤呼吸速率

与冠层原始光谱反射率、一阶导数、高光谱特征变量和已经报道的植被指数的相关性都较好,其中 $(R_g - R_r)/(R_g + R_r)$ 、 $R_g/R_r$ 、PRI、 $R'_{747}$ 的建模精度位于前四,解释能力较高, RMSE 较低。当用验证数据进行验证时,发现 $(R_g - R_r)/(R_g + R_r)$ 、 $R_g/R_r$ 、PRI的验证精度低于建模精度,而 $R'_{747}$ 的建模精度高于验证精度,虽然 $R_{779}$ 的建模精度也高于验证精度,但其建模精度最低,表明采用一阶光谱导数模拟土壤呼吸的稳定性较强,适用于土壤呼吸模拟。这可能是由于一阶导数光谱消除了基线漂移或背景干扰的缘故。

## 4 结论

地膜覆盖促进了 $R_s$ 的增加,而添加生物炭则影响不显著,4种处理从大到小依次为: $B+P>P>B>CK$ 。地膜覆盖和生物炭施用在生育期前后对高粱冠层高光谱的影响不同,拔节期近红外波段反射率 $B+P$ 和 $P$ 处理显著高于 $CK$ 和 $B$ ,抽穗期 $CK$ 和 $B$ 处理显著高于 $P$ 和 $B+P$ ,灌浆期和收获期4个处理差异不大。高粱冠层光谱反射率、一阶微分、光谱特征参数及已有的植被指数均与 $R_s$ 呈显著相关,相关系数最高大于0.80。综合考虑模型的模拟精度和验证精度,估算高粱土壤呼吸的最佳模型为: $y = 1\ 666.3 R'_{747} + 1.332 (R^2 = 0.69, p < 0.01, RMSE = 2.56 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}), n = 16)$ ,其验证模型的 $R^2$ , RMSE, Slope 分别为0.75,  $2.28 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 0.715 8。结果表明,利用冠层高光谱数据监测高粱地 $R_s$ 排放是可行的,为进一步开展区域农田土壤 $\text{CO}_2$ 排放通量的无损监测提供了理论依据。

### 参考文献:

- [1] Schimel D S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle[J]. *Global Change Biology*, 1995, 1(1): 77-91.
- [2] Raich J W, Potter C S, Bhagawati D. Interannual variability in global soil respiration, 1980—1994[J]. *Global Change Biology*, 2002, 8(8): 800-812.
- [3] Schlesinger W H, Anderws J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 7-20.
- [4] 张东秋, 石培礼, 张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(7): 778-785.
- [5] Kuzyakov Y, Larionova A. A. Root and rhizomicrobial respiration: a review of approaches to estimate respiration by autotrophic and heterotrophic organisms in soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2005, 168(4): 503-520.
- [6] 张春兰, 杨贵军, 李贺丽, 等. 基于随机森林算法的冬小麦叶面积指数遥感反演研究[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(5): 855-867.
- [7] 房贤一, 朱西存, 王凌, 等. 基于高光谱的苹果盛果期冠层叶绿素含量监测研究[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(16): 3504-3513.
- [8] 张卓, 龙慧灵, 王崇倡, 等. 冬小麦叶片光合特征高光谱遥感估算模型的比较研究[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(4): 43-55.
- [9] Liang Y, Cai Y, Yan J, et al. Estimation of soil respiration by its driving factors based on multi-source data in a sub-alpine meadow in North China[J]. *Sustainability*, 2019, 11(12): 1-17.
- [10] Cicuendez 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 & Environment*, 2015, 212: 158-167.
- [11] 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.
- [12] Gamon J A, Field C B. Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in three Californian vegetation types[J]. *Ecological Applications*, 1995, 5(1): 28-41.
- [13] Gitelson A A, Gritz Y, Merzlyak M N. Relationships Between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2003, 160(3): 271-282.
- [14] Richardson A J, Wiegand C L. Distinguishing vegetation from soil background information[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1977, 43(12): 1541-1552.
- [15] Hellawell A. The crystal chemistry and physics of metals and alloys[J]. *International Metallurgical Reviews*, 1973, 18(1): 39-39.
- [16] 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): 195-213.
- [17] Vogelmann J E, Rock B N, Moss D M. Red edge spectral measurements from sugar maple leaves[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(8): 1563-1575.
- [18] Gamon J A, Penuelas J, Field C B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 41(1): 35-44.
- [19] Atkinson C J, Fitzgerald J D, Hipps N A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review[J]. *Plant and Soil*, 2010, 337(1/2): 1-18.
- [20] Biederman L A, Harpole W S. Biochar and its effects

- on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2013, 5(2): 202-214.
- [21] Han G, Lan J, Chen Q, et al. Response of soil microbial community to application of biochar in cotton soils with different continuous cropping years[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 10184.
- [22] 吴伟祥, 孙雪, 董达, 等. 生物质炭土壤环境效应[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [23] Stewart C E, Zhang J Y, Botte J, et al. Co-generated fast pyrolysis biochar mitigates green-house gas emissions and increases carbon sequestration in temperate soils[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2013, 5(2): 153-164.
- [24] Liu Y, Liu S, Wan S, et al. Differential responses of soil respiration to soil warming and experimental throughfall reduction in a transitional oak forest in central China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 226: 186-198.
- [25] Al-Wabel M I, Al-Omran A, El-Naggar A H, et al. Pyrolysis temperature induced changes in characteristics and chemical composition of biochar produced from conocarpus wastes[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 131: 374-379.
- [26] Sagrilo E, Jeffery S, Hoffland E, et al. Emission of CO<sub>2</sub> from biochar-amended soils and implications for soil organic carbon[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2015, 7(6): 1294-1304.
- [27] 王颖, 娄运生, 石一凡, 等. 夜间增温对稻田甲烷排放的影响及其高光谱估算[J]. *生态学报*, 2018, 38(14): 5099-5108.
- [28] Wu C, 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.
- [29] Huang N, He J S, Niu Z. Estimating the spatial pattern of soil respiration in Tibetan alpine grasslands using Landsat TM images and MODIS data[J]. *Ecological Indicators*, 2013, 26: 117-125.

(上接第 7 页)

- [33] 王志杰. 延河流域植被与侵蚀产沙特征研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [34] 赵春红. 坡面侵蚀性降雨径流水动力学特性及其对输沙的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- [35] 许炯心. 无定河流域侵蚀产沙过程对水土保持措施响应[J]. *地理学报*, 2004, 59(6): 972-981.
- [36] 张君茹. 基于尺度转换的黄土洼流域侵蚀产沙研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2018.
- [37] 王万中, 张宪奎. 中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布(D)[J]. *水土保持学报*, 1995, 9(4): 7-18.
- [38] Foster G R, Lombardi F, Moldenhauer W C. Evaluation of rainfall-runoff erosivity factors for individual storms[J]. *Transactions of the Asae*, 1982, 25(1): 124-129.
- [39] Bagarello V, D'Asaro F. Estimating single storm erosion index[J]. *Transactions of the Asae*, 1994, 37(3): 785-791.
- [40] 李静, 刘志红, 李锐. 黄土高原不同地貌类型区降雨侵蚀力时空特征研究[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(3): 124-127.

(上接第 15 页)

- [20] 赵亚丽, 郭海斌, 薛志伟, 等. 耕作方式与秸秆还田对土壤微生物数量、酶活性及作物产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(6): 1785-1792.
- [21] 朱永官, 沈仁芳, 贺纪正, 等. 中国土壤微生物组: 进展与展望[J]. *中国科学院院刊*, 2017, 32(6): 554-565.
- [22] 韩剑, 张静文, 徐文修, 等. 新疆连作, 轮作棉田可培养的土壤微生物区系及活性分析[J]. *棉花学报*, 2015, 23(1): 69-74.
- [23] 邹锋, 李金前, 韩丽丽, 等. 鄱阳湖湿地土壤微生物活性对年际水文变化的响应[J]. *湖泊科学*, 2019, 31(2): 551-559.
- [24] 张杰, 胡维, 刘以珍, 等. 鄱阳湖湿地不同土地利用方式下土壤微生物群落功能多样性[J]. *生态学报*, 2015, 35(4): 729-734.
- [25] 王娜, 高婕, 魏静, 等. 三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响[J]. *环境科学*, 2019, 2(5): 321-329.
- [26] 刘亚军, 蔡润发, 李赟璟, 等. 湿地土壤微生物碳源代谢活性对不同水分条件的动态响应: 以鄱阳湖为例[J]. *土壤*, 2018, 50(4): 8-13.
- [27] 青烨, 孙飞达, 李勇, 等. 若尔盖高寒退化湿地土壤碳氮磷比及相关性分析[J]. *草业学报*, 2015, 24(3): 38-45.
- [28] 肖烨, 黄志刚, 武海涛, 等. 三江平原典型湿地类型土壤微生物特征与土壤养分的研究[J]. *环境科学*, 2015, 36(5): 1842-1848.