

# 融合 Sentinel-2 卫星和地面验证点数据研发山东禹城冬小麦冠层叶绿素数据集的方法与结果

王正兴\*, 李 芳

中国科学院地理科学与资源研究所, 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101

**摘 要:** 融合哨兵 2 号卫星 (Sentinel-2) 冠层叶绿素含量与地面验证点数据研发山东禹城冬小麦冠层叶绿素数据集并得到结果数据集。结果数据集由两部分组成: (1) 冠层叶绿素地面验证样地数据 ( $CCC_{\text{Field}}$ ), 包括 LAI 和 SPAD。2020 年 5 月 9–16 日在山东禹城冬小麦观测, 共计 107 个样地; (2) 哨兵 2 号卫星叶绿素反演数据 ( $CCC_{\text{Sentinel}}$ ), 空间分辨率为 10 m。对  $CCC_{\text{Field}}$  和  $CCC_{\text{Sentinel}}$  序列进行 5 种相关分析显示, 决定系数 ( $R^2$ ) 可以达到 0.889,9–0.928,0,  $RMSE=29.267$ , 表明在该地区 4 月末至 5 月初期间, 哨兵 2 号卫星  $CCC_{\text{Sentinel}}$  至少能解释地面样地观测  $CCC_{\text{Field}}$  变化的 88.99%。本数据集存储为.tif、.shp、.kmz 和.xlsx 数据格式, 由 18 个数据文件组成, 数据量为 215 MB (压缩为 3 个文件 160 MB)。

**关键词:** 叶绿素含量; 哨兵 2 号卫星; Sentinel-2; 地面验证; 冬小麦; 山东禹城

**DOI:** <https://doi.org/10.3974/geodp.2021.02.01>

**CSTR:** <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2021.02.01>

**数据可用性声明:**

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志 (中英文)》出版, 可获取: <https://doi.org/10.3974/geodb.2020.09.14.V1> 或 <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2020.09.14.V1>。

## 1 前言

叶绿素是光合作用的物质基础<sup>[1]</sup>。由于叶绿素与氮水平关系密切, 且更容易测量, 所以通过测量叶绿素诊断叶片氮素水平的方法被广泛使用<sup>[2–4]</sup>。叶绿素密度可以为叶片叶绿素 (Leaf Chlorophyll Content, LCC) 或冠层叶绿素 (Canopy Chlorophyll Content, CCC), 叶绿素测量方法可分为地面测量与遥感反演。叶绿素地面测量包括实验室分析法、地面光谱测量、叶片色卡等<sup>[5,6]</sup>。地面测量适用范围小, 而且测量单位主要采用“重量法”, 无法用于遥感验证<sup>[7,8]</sup>。学者呼吁未来的叶绿素测量增加面积表示法<sup>[2,9,10]</sup>。

遥感反演叶绿素在原理上可分为统计法和机理法<sup>[11]</sup>。统计法中的参数既包括常见的植

收稿日期: 2020-10-10; 修订日期: 2021-03-31; 出版日期: 2021-06-25

基金项目: 中华人民共和国科学技术部 (2016YFA0600201)

\*通讯作者: 王正兴 L-5255-2016, 中国科学院地理科学与资源研究所, wangzx@igsrr.ac.cn

数据引用式: [1] 王正兴, 李芳. 融合 Sentinel-2 卫星和地面验证点数据研发山东禹城冬小麦冠层叶绿素数据集的方法与结果[J]. 全球变化数据学报, 2021, 5(2): 111–119. <https://doi.org/10.3974/geodp.2021.02.01>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2021.02.01>.  
[2] 王正兴, 李芳. 山东禹城冬小麦哨兵 2 号卫星(Sentinel-2)冠层叶绿素与地面验证点数据集[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2020. <https://doi.org/10.3974/geodb.2020.09.14.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2020.09.14.V1>.

被指数，也包括通过特定光谱区间得到的参数，如红边区位置、基于综合的参数、基于导数的参数、基于连续统去除的参数<sup>[12-18]</sup>。机理方法假设遥感数据与叶绿素之间存在因果关系，可用物理关系构建辐射传递模型（RTM），并利用“查找表法（look-up table, LUT）”等反演叶绿素<sup>[19,20]</sup>。理论上讲机理方法比统计方法有较高的“可移植性”，但其表现依然需要验证。研究显示，机理方法与统计方法一样受季节性<sup>[20]</sup>和植被类型<sup>[21-23]</sup>的影响。

目前，在全球尺度上的遥感反演植被叶绿素产品：（1）由加拿大多伦多大学开发的 MERIS-LCC 产品，300m-Weekly，2002-2012 年<sup>[24]</sup>。（2）中国学者开发的 MODIS-LCC 产品，500m-8d，目前算法已经完成<sup>[25]</sup>。（3）由欧空局组织 Sentinel-2 L2ACCC 产品，10m-5d<sup>[26]</sup>。

由于 MERIS 和 MODIS 的 LCC 产品的空间分辨率为 300–500 m，获取可靠的地面验证数据比较困难，而 Sentinel-2 的 CCC 空间分辨率可达 10 m，较易获取可靠的地面验证数据。本数据集<sup>[27]</sup>包括 2020 年 5 月在山东禹城 107 个冬小麦样地观测的相对叶绿素指数（SPAD）和 LAI，以及由 SPAD 转换为 LCC 的模型，样地代表性对应 10 m 分辨率，经过尺度处理后用于较低空间分辨率的叶绿素产品验证。

2 数据集元数据简介

《山东禹城冬小麦哨兵 2 号卫星(Sentinel-2)冠层叶绿素与地面验证点数据集》<sup>[27]</sup>元数据列于表 1。

表 1 《山东禹城冬小麦哨兵 2 号卫星（Sentinel-2）冠层叶绿素与地面验证点数据集》元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	山东禹城冬小麦哨兵 2 号卫星（Sentinel-2）冠层叶绿素与地面验证点数据集
数据集短名	CCC_WinterWheat_Yucheng_2020
作者信息	王正兴 L-5255-2016，中国科学院地理科学与资源研究所，wangzx@igsnr.ac.cn 李 芳 L-3424-2018，中国科学院地理科学与资源研究所，lif@igsnr.ac.cn
地理区域	山东省禹城市，样地地理位置：116°31'17.11"E-116°35'45.48"E；36°44'59.71"N-36°49'59.81"N
数据年代	地面观测：2020 年 5 月 9–16 日；哨兵 2 号卫星数据：2020 年 4 月 29 日；2020 年 5 月 19 日
空间分辨率	10 m×10 m 数据格式 .shp, .kml, .xlsx, .tif 数据量 160 MB
数据集组成	3 个数据文件
基金项目	中华人民共和国科学技术部（2016YFA0600201）
数据计算环境	SNAP Biophysical Processor（欧空局）
出版与共享平台	全球变化科学研究数据出版系统 <a href="http://www.geodoi.ac.cn">http://www.geodoi.ac.cn</a>
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101，中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据（中英文）、通过《全球变化数据仓储电子杂志（中英文）》发表的实体数据集和通过《全球变化数据学报（中英文）》发表的数据论文。其共享政策如下：（1）“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放，用户免费浏览、免费下载；（2）最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源；（3）增值服务用户或以任何形式散发和传播（包括通过计算机服务器）“数据”的用户需要与《全球变化数据学报（中英文）》编辑部签署书面协议，获得许可；（4）摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10%引用原则，即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%，同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 <sup>[28]</sup>
数据和论文检索系统	DOI, CSTR, Crossref, DCI, CSCD, CNKI, SciEngine, WDS/ISC, GEOSS

### 3 验证数据开发方法

#### 3.1 研究地区

采样区位于山东省禹城市,属黄河下游冲积平原,海拔范围 17.5–26.1 m,起伏较小。年平均温度 13.3 °C,年平均降水量 555.5 mm,年平均蒸发量 1,884.8 mm,无霜期 202 天,年日照数 2,546.2 小时。冲积物是唯一的成土母质。土地利用主要是冬小麦-夏玉米轮作,其中冬小麦在前一年 10 月份播种,当年 6 月上旬收割。本次地面采样时间是 2020 年 5 月 9–16 日,冬小麦处于灌浆期。

#### 3.2 验证数据开发原理

采集本数据集的主要目的是验证哨兵 2 号卫星冠层叶绿素产品,其空间分辨率为 10 m,双星运行时,理论时间分辨率为 5 d。为此,野外采样与数据处理遵循以下原则:

空间分辨率:样地中心位置和采集范围精度满足 10 m×10 m 的要求。

时间分辨率:地面数据与卫星数据的时间应该在 1d 尺度上匹配。由于冬小麦在各个生长期变化较大,因此理想的验证应该是卫星过境时间与地面采样时间在同一天。但由于各种限制,这样的时间一致比较少见。本研究的处理原则:以地面观测时间为基准(逐个样地),利用时间最近的高质量卫星数据,并假设两次卫星过境期间 CCC 是线性变化,按照反时间距离权重原理,把卫星数据内插到地面观测时间对应的数据。这样形成了时间分辨率为 1 d 的哨兵 CCC 待验证数据。

待验证卫星数据产品:哨兵 2 号卫星冠层叶绿素密度  $CCC_{Sentinel}$  ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )。

冠层叶绿素是全部叶片叶绿素的总和,地面样地的冠层叶绿素可以定义为:

$$CCC_{Field} = LAI \times LCC \quad (1)$$

式中, LAI 为叶面积指数。LCC 为叶片叶绿素密度 ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ),由野外测量的相对叶绿素读数 SPAD 和实验室标定的关系式决定。本文采用 2019 年 4 月在河南洛阳诸葛镇冬小麦得到的关系式。

$$LCC = 0.0188 \times SPAD^{2.0033}, R^2 = 0.768 \quad (2)$$

另外,在没有 LCC 的情况下,地面测量的 LAI 和 SPAD 以及卫星观测反演的 ( $CCC_{Sentinel}$ ) 都是纯光学观测的结果,因此本文使用一个无量纲方式进行验证,作为参考。定义为:

$$CCC_{Field} = LAI \times SPAD \quad (3)$$

#### 3.3 验证数据采集技术路线

样地观测包括 LAI 和 SPAD 两项,具体包括制定抽样方案、样地定位、样地处理、样地观测。

##### 3.3.1 制定抽样方案(室内)

在野外工作之前,需预先对采样的时间、地点、可能的样地进行研究。为了获得广泛代表性的样地,需要包括不同级别 CCC 的样地。这可以参考前一年同一时期哨兵卫星 CCC 产品分级数据,也可以参考当年最近时间卫星 CCC 产品分级数据。尽管 CCC 数据是待验证数据,但是其分级数据可以代表不同生长环境下的冠层叶绿素特征。同时,卫星数据还可以提供地块大小、相邻关系、交通条件等信息。综合这些条件,可以初步选择样地,制

成.kml 文件，导入手机 GPS Tools，作为野外用导航用图。同时，也可以打印 CCC 分级图和初步的样地分布图，供野外使用。

3.3.2 样地中心精确定位（实地）

以上抽样方案得到的初步样地位置，需要根据现场信息进行调整。“地块”是农田的基本单元，每个地块属于一个农户，经营管理水平差异，导致地块之间差异大。在研究地区，地块通常南北长，东西狭。例如，一个较大的 4 亩（2,220 m<sup>2</sup>）地块，相当于 100 m × 22.2 m，或者 80 m × 27.75 m。换言之，地块较窄的一边一般只有 20–30 m 宽，而待验证的哨兵 2 号卫星的主要分辨率是 10 m。考虑到卫星与地面的空间匹配，野外观测时，应该尽量选择相邻地块 CCC 差别较小样地。以手机 GPS Tool 工具对样地中心定位，以红色书包等作为标记。由于手机 GPS Tool 以高分辨率卫星影像为背景，参照田间道路或田垄位置，可知其定位误差在 1 m 以内。

3.3.3 测量前样地与样品处理

3.3.3.1 测量 LAI 前样地处理

利用 LAI-2200 仪测量 LAI 时，要求测量 A 值和 B 值的时间间隔尽量短。因此在测量前需要做好准备，避免测量开始后意外事件干扰，延误最佳测量时机。

（1）确定有效测量范围：LAI-2200 仪的测量需要注意两个角度，一个是要避免太阳直射和测量员阴影，另外一个防止仪器感应超出样地范围。前者可以使用镜头遮盖（例如 180°），后者需要根据作物高度推算。LAI-2200 仪最开阔的天顶角 68°，对应地面视角 22°， $\tan(22) = 0.404$ 。本案中冬小麦高 80 cm，对应水平距离大约 200 cm。换言之，如果在样地边缘 200 cm 区内，LAI-2200 传感器的感应范围可能超出样地。所以最稳妥测量区域应在样地中心 6 m × 6m 范围内（图 1）。

（2）清理底层衰老叶片：冬小麦上层郁闭后，下层开始衰退，但是依然茂密，需要清理近地表衰老的叶片，尤其是镜头附近，保证 LAI 镜头视野内无干扰。

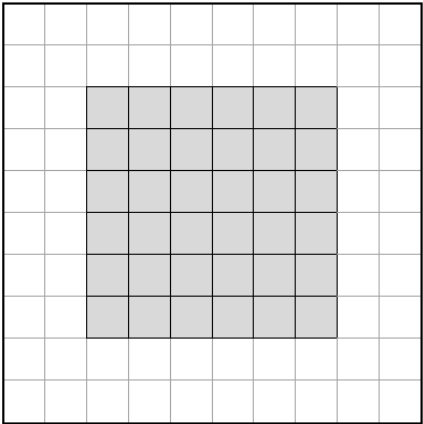


图 1 样地有效区域：在 10 m × 10 m 样地中，对高度为 80 cm 的冬小麦，在使用 180 度遮盖帽测量 LAI 时，其中心 6 m × 6 m 的区域（阴影部分）为有效测量区，理论上可以朝任何方向测量

（3）清除冠层露水：早晨日出前后是 LAI 测量最佳时间，但是往往伴随露水，因此需要用竹竿轻轻去除冠层露水。

3.3.3.2 测量 SPAD 前叶片处理

很多原因（叶面施肥、农药、尘土、昆虫排泄物、水汽）会玷污小麦叶片，如果不预先清理，可能污染 SPAD 镜头，造成系统误差。可使用自来水和牙刷清洗，然后用吸水纸去除水汽。

3.3.4 样地 LAI 与 SPAD 测量

（1）LAI 测量：使用 LAI-2200 叶面积仪，晴天时在日出日落前后（早上 6–10 点，下午 16–18 点），阴天时在整个白天都可以测量。使用 180°遮盖帽，遮挡太阳直射和观测

者身影。每个样地至少 3 个测量线路，每个线路至少 3 个测量，全部平均代表该样地 LAI。

(2) SPAD 测量：与 LAI 对应，每个样地至少 3 个测点，每个测点包括最上层 2 个代表性叶片。利用 SPAD-502 仪器，对清理干净的叶片，每个叶片沿着两侧测量 10 次。取均值代表该样地 SPAD 值。

3.4 待验证哨兵 2 号卫星冠层叶绿素反演与处理

3.4.1 哨兵 2 号卫星冠层叶绿素 (CCC) 产品开发

(1) Level 2A 数据下载：从哨兵数据网站<sup>1</sup>下载 L2A 数据，检查 L2A 的质量标记 (flags)，发现样地分布区距离地面观测时间最近的 2 次晴天卫星过境时间分别是 2020 年 4 月 29 日和 2020 年 5 月 19 日 (表 2)。

表 2 用于反演冠层叶绿素的哨兵 2 号卫星数据

哨兵卫星时间		L2A 文件名
2020年4月29日	S2A_MSIL2A_20200429T025551_N0214_R032_T50SMF_20200429T061414.SAFE	
2020年5月19日	S2A_MSIL2A_20200519T025551_N0214_R032_T50SMF_20200519T070151.SAFE	

(2) CCC 反演算法原理与 CCC 产品开发：欧空局基于哨兵 2 号卫星的冠层叶绿素产品采用混合算法，即利用 PROSail 模型生成模拟数据，然后把光谱数据输入到训练好的人工神经网络 (ANN) 进行反演。该算法被集成到 SNAP 软件的 BioPhysical Processor 模块，需要输入的哨兵数据为 L2A 的 8 个反射波段，和 4 个观测几何波段。输出为冠层叶绿素 CCC。8 个反射波段为：B3，B4，B5，B6，B7，B8a，B11，B12；4 个观测几何信息波段为：sun\_zenith, sun\_azimuth, view\_zenith\_mean, view\_azimuth\_mean。

3.4.2 地面观测与卫星观测时间归一化

(1) 地面观测与卫星观测时间不一致：地面观测时间为 2020 年 5 月 9–16 日，晴朗天气的哨兵 2 号卫星数据来自 2020 年 4 月 29 日和 5 月 19 日，表 3。

表 3 冬小麦冠层叶绿素地面观测与卫星观测时间

月份	4 月										5 月										
日期	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
卫星过境																					
地面观测																					

(2) 卫星观测数据与地面样地观测数据时间归一化：以地面样地时间为基础，根据时间序列反距离权重原理，把两个卫星 CCC 数据内插到对应样地时间的哨兵 2 号卫星 CCC。

$$CCC_{Field} = (1 - W) \times CCC_{0429} + W \times CCC_{0519}$$
 (4)

$$W = T / (T_2 - T_1)$$
 (5)

式中，(T<sub>2</sub>–T<sub>1</sub>) 为两个晴朗天气卫星过境时间间隔 (d)，这里是 (20200429) 和 (20200519) 间隔，(T<sub>2</sub>–T<sub>1</sub>) =20 d。T 为地面采样时间距离前一个卫星数据的时间间隔。

<sup>1</sup> 哨兵 2 号卫星数据下载网址：<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>。

3.4.3 数据质量与验证应用

开发本数据集的目的是为了验证哨兵 2 号卫星的冠层叶绿素产品，其质量主要由前述措施保障，理论上高于卫星产品精度，但地面观测难免存在不确定因素。通过验证应用，也可以反过来检查地面数据质量。本验证地面观测数据采用两个模式：一个模式为绝对值，来自式(1)，一个为相对值模式，来自式(3)。评价指标为决定系数 ( $R^2$ ) 和 RMSE。

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

本数据集由 3 个文件夹组成：

- (1) 地面观测数据集，包括 107 个样地的 LAI，SPAD， $CCC_{Field}$ （无量纲），以及各样地对应的、经过时间序列内插得到的哨兵 2 号卫星的冠层叶绿素  $CCC_{Sentinel}$  ( $\mu g/cm^2$ )。文件格式为.shp)。
- (2) 由 Shapefile 导出的 Excel 表格。
- (3) 两个时相哨兵 2 号卫星冠层叶绿素产品。

4.2 数据结果

经过式(2)把 SPAD 换算为 LCC 后，地面样地可以分别由相对冠层叶绿素 ( $CCC_{Field}$ ，Unitless) 和绝对冠层叶绿素 ( $CCC_{Field}$ ， $\mu g/cm^2$ ) 两种方式表达，与哨兵 2 号卫星反演的观测叶绿素相比，有如下特征：(1) LCC 比 SPAD 值域大。(2) 绝对冠层叶绿素 ( $CCC_{Field}$ ， $\mu g/cm^2$ ) 比相对冠层叶绿素 ( $CCC_{Field}$ ，无量纲) 均值大，值域也大。(3) 绝对冠层叶绿素 ( $CCC_{Field}$ ， $\mu g/cm^2$ ) 比卫星反演的叶绿素均值略大 (295.856)，但是标准差略小 (98.491)。

表 4 冬小麦冠层叶绿素：地面观测与哨兵 2 号反演基本信息

	LAI (无量纲)	SPAD (无量纲)	LCC ( $\mu g/cm^2$ )	$CCC_{Field}$ (无量纲)	$CCC_{Field}$ ( $\mu g/cm^2$ )	$CCC_{Sentinel}$ ( $\mu g/cm^2$ )
最小值	1.798	44.5	37.698	92.033	82.536	100.435
最大值	6.677	64.1	78.313	414.642	490.727	455.677
均值	4.398	58.8	66.076	260.967	295.856	292.667
标准差	1.219	3.6	7.622	79.360	98.491	101.742

4.3 数据验证应用

- (1) 绝对值模式：按照冠层叶绿素的定义，采样 5 种回归模型，地面观测与卫星冠层的决定系数 ( $R^2$ ) 都在 0.889,9 以上，平均 0.911,5。其中，线性模型的斜率为 0.989,5，没有明显的系统偏差（表 5，图 2）。
- (2) 相对值模式：按照式(3)计算相对叶绿素，采样 5 种回归模型，地面观测与卫星冠层的决定系数 ( $R^2$ ) 都在 0.913,3 以上，平均 0.927,1，明显高于绝对模式，这说明，在地面为纯光学情况下，与遥感的相关性更强。但是，由于单位不一致，线性模型的斜率为 0.752,5，明显偏离 1 : 1 对角线，不能直接解释二者定量关系（表 5）。

表 5    地面观测与哨兵 2 号反演的冬小麦冠层叶绿素回归分析：两种方式

拟合模型	表达式,	$R^2$	表达式,	$R^2$
	$x = \text{CCC}_{\text{Sentinel}} (\mu\text{g}/\text{cm}^2)$ $y = \text{CCC}_{\text{Field}} (\text{无量纲}), \text{相对值}$		$x = \text{CCC}_{\text{Sentinel}} (\mu\text{g}/\text{cm}^2)$ $y = \text{CCC}_{\text{Field}} (\mu\text{g}/\text{cm}^2), \text{绝对值}$	
线性	$y = 0.7525x + 40.721$	0.930,8	$y = 0.9895x - 0.087$	0.917,6
指数	$y = 92.648e^{0.0033x}$	0.915,2	$y = 81.103e^{0.0041x}$	0.9
对数	$y = 179.24\ln(x) - 743.05$	0.913,3	$y = 237.54\ln(x) - 1042.3$	0.889,9
幂	$y = 2.5266x^{0.8179}$	0.945,2	$y = 0.9342x^{1.0089}$	0.928
多项式	$y = 0.0001x^2 + 0.6982x + 46.862$	0.930,9	$y = -0.0006x^2 + 1.3493x - 43.702$	0.922,1
平均		0.927,1		0.911,5

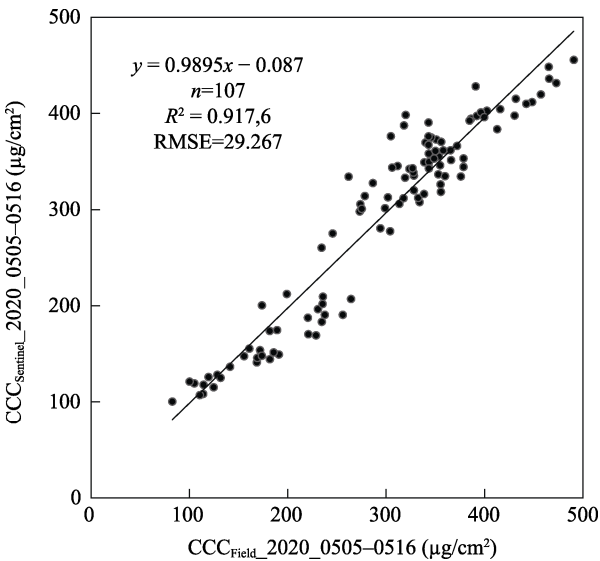


图 2    线性拟合的回归关系

5    讨论与结论

（1）如何保障地面验证数据的精确性：获取高精度的地面数据，除了可靠的仪器设备外，也需要精确规划野外观测。本研究在空间、时间、样地处理等环节上尽量排除了不确定性：在空间上，针对实验区小地块为主的特点，以样地中心为基础，划定了有效测量范围；在时间上，考虑到常态下卫星数据与地面数据可能不一致，因此明确提出把卫星数据按照反时间距离权重逐个内插到对应样地时间，使二者在 1 d 尺度上一一对应。

（2）可能的不足：首先，SPAD-LCC 转换模型不是来自同一地区，而是来自 2018 年 4 月份的河南省洛阳市。第二，直接使用了 LAI，没有继续后期处理（直射），没有考虑集聚指数效应（Clumping Index, CI）。第三，没有对小麦品种、不同管理方式分类研究。

（3）总体来说：对卫星反演数据的验证结果显示，线性回归的决定系数  $R^2=0.917,6$ ，斜率逼近 1 : 1 对角线，RMSE = 29.267。作为比较，Xie 等（2019）<sup>[23]</sup>在北京顺义对冬小麦进行地面验证，同样为哨兵 2 号卫星反演算法，时间同样为 2018 年 4-5 月， $R^2=0.72$ ，

RMSE = 108.30。Parry 等 (2014) [5] 研究认为, 品种和管理对 SPAD-LCC 转换模型影响不大, 这部分解释了本文使用了来自河南洛阳的 SPAD-LCC 模型, 但是依然能够很好地解释哨兵 2 号卫星的冠层叶绿素变化。表 4 显示, 地面观测的冠层叶绿素值域为 82.536–490.727  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ , 在这样宽的值域中, 卫星观测依然可以很好地解释地面观测数值变化, 说明本验证数据对中高覆盖的冬小麦有较好的适用性。

**作者分工:** 王正兴设计了数据集开发, 完成数据论文写作。李芳参与了数据采集与分析。

**致谢:** 河南科技大学曾占奎、王征宏帮助完成了小麦叶片叶绿素 LCC 的测量; 中国科学院禹城试验站王吉顺、韩延生、蔡晓光、乔云峰对 LAI 野外测量提供了仪器和后勤支持; 西南科技大学杨斌协助利用 SNAP Biophysical Processor 模块和哨兵 2 号卫星 L2A 数据计算冠层叶绿素 CCC 的工作; 作者对他们的支持表示衷心的感谢。

**利益冲突声明:** 本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

## 参考文献

- [1] Croft, H., Chen, J. M., Luo, X., *et al.* Leaf chlorophyll content as a proxy for leaf photosynthetic capacity [J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(9): 3513–3524.
- [2] Berger, K., Verrelst, J., Féret, J. B., *et al.* Retrieval of aboveground crop nitrogen content with a hybrid machine learning method [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, 92: 102174.
- [3] 薛香, 吴玉娥. 小麦叶片叶绿素含量测定及其与 SPAD 值的关系[J]. 湖北农业科学, 2010, 11: 2701–2702.
- [4] Watt, M. S., Pearce, G. D., Dash, J. P., *et al.* Application of remote sensing technologies to identify impacts of nutritional deficiencies on forests [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, 149: 226–241.
- [5] Parry, C., Blonquist, J. M., Jr., Bugbee B. *In situ* measurement of leaf chlorophyll concentration: analysis of the optical/absolute relationship [J]. *Plant Cell Environment*, 2014, 37(11): 2508–2520.
- [6] Friedman, J. M., Hunt, E. R., Muters, R. G. Assessment of leaf color chart observations for estimating maize chlorophyll content by analysis of digital photographs [J]. *Agronomy Journal*, 2016, 108(2): 822–829.
- [7] 王正兴, 李芳. 伏牛山栓皮栎叶绿素含量野外测量与实验室分析数据集 (2018 年 9 月) [J]. 全球变化数据学报, 2018, 2(4): 442–447. <https://doi.org/10.3974/geodp.2018.04.11>.
- [8] 王正兴, 李芳. 浙江毛竹叶绿素野外测量与实验室分析数据集(2018) [J]. 全球变化数据学报, 2019, 3(2): 194–199. <https://doi.org/10.3974/geodp.2019.02.11>.
- [9] 许大全. 叶绿素含量的测定及其应用中的几个问题[J]. 植物生理学通讯, 2009, 45(9): 896–898.
- [10] Kattenborn, T., Schiefer, F., Zarco-Tejada, P., *et al.* Advantages of retrieving pigment content [ $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ] versus concentration [%] from canopy reflectance [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 230: 111195.
- [11] Verrelst, J., Camps-Valls, G., Muñoz-Marí, J., *et al.* Optical remote sensing and the retrieval of terrestrial vegetation bio-geophysical properties—a review [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 108: 273–290.
- [12] Clevers, J. G. P. W., Gitelson, A. A. Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on Sentinel-2 and -3 [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and*



- Geoinformation*, 2013, 23: 344–351.
- [13] Schlemmer, M., Gitelson, A., Schepers, J., *et al.* Remote estimation of nitrogen and chlorophyll contents in maize at leaf and canopy levels [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 25: 47–54.
- [14] Croft, H., Chen, J. M., Zhang, Y. The applicability of empirical vegetation indices for determining leaf chlorophyll content over different leaf and canopy structures [J]. *Ecological Complexity*, 2014, 17: 119–130.
- [15] Inoue, Y., Guerif, M., Baret, F., *et al.* Simple and robust methods for remote sensing of canopy chlorophyll content: a comparative analysis of hyperspectral data for different types of vegetation [J]. *Plant Cell Environment*, 2016, 39(12): 2609–2623.
- [16] Tong, A., He, Y. Estimating and mapping chlorophyll content for a heterogeneous grassland: comparing prediction power of a suite of vegetation indices across scales between years [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 126: 146–167.
- [17] Delloye, C., Weiss, M., Defourny, P. Retrieval of the canopy chlorophyll content from Sentinel-2 spectral bands to estimate nitrogen uptake in intensive winter wheat cropping systems [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 216: 245–261.
- [18] Zarco-Tejada, P. J., Hornero, A., Hernandez-Clemente, R., *et al.* Understanding the temporal dimension of the red-edge spectral region for forest decline detection using high-resolution hyperspectral and Sentinel-2a imagery [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, 137: 134–148.
- [19] Féret, J. B., Gitelson, A. A., Noble, S. D., *et al.* PROSPECT-D: towards modeling leaf optical properties through a complete lifecycle [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 193: 204–215.
- [20] Schiefer, F., Schmidtlein, S., Kattenborn, T. The retrieval of plant functional traits from canopy spectra through RTM-inversions and statistical models are both critically affected by plant phenology [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 121: 107062.
- [21] Atzberger, C., Darvishzadeh, R., Immitzer, M., *et al.* Comparative analysis of different retrieval methods for mapping grassland leaf area index using airborne imaging spectroscopy [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 43: 19–31.
- [22] Ali, A. M., Darvishzadeh, R., Skidmore, A., *et al.* Comparing methods for mapping canopy chlorophyll content in a mixed mountain forest using Sentinel-2 data [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, 87: 102037.
- [23] Xie, Q., Dash, J., Huete, A., *et al.* Retrieval of crop biophysical parameters from Sentinel-2 remote sensing imagery [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, 80: 187–195.
- [24] Croft, H., Chen, J. M., Wang, R., *et al.* The global distribution of leaf chlorophyll content [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 236: 111479.
- [25] Xu, M., Liu, R., Chen, J. M., *et al.* Retrieving leaf chlorophyll content using a matrix-based vegetation index combination approach [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 224: 60–73.
- [26] Weiss, M., Baret, F. S2ToolBox Level 2 products algorithms: LAI, FAPAR, FCOVER, Version 1.1 [R]. ESA, France, 2016.
- [27] 王正兴, 李芳. 山东禹城冬小麦哨兵 2 号卫星(Sentinel-2)冠层叶绿素与地面验证点数据集[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2020. <https://doi.org/10.3974/geodb.2020.09.14.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2020.09.14.V1>.
- [28] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策[OL]. <https://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05> (2017 年更新).