ICS
CCS 点击此处添加 CCS 号

DB 15

内 蒙 古 自 治 区 地 方 标 准

DB XX/T XXXX—XXXX

草地碳汇遥感监测技术指南

Technical Guidelines for Remote Sensing Monitoring of Grassland Carbon Sinks

（征求意见稿）

XXXX－XX－XX 发布 XXXX－XX－XX 实施

内蒙古自治区市场监督管理局 发 布

目 次

前言.....II
1 范围.....1
2 规范性引用文件.....1
3 术语和定义.....1
4 遵循的原则.....4
4.1 完整性.....4
4.2 一致性.....4
4.3 可操作性.....4
4.4 适用性.....4
5 草原生态系统碳汇遥感监测.....5
5.1 基于遥感数据和模型反演的草原生态系统固碳现状和速率长时序监测.....5
5.2 结合地面调查和遥感模型反演的区域尺度草原生态系统固碳现状和速率监测.....5
5.3 基于无人机的精细尺度草原生态系统固碳现状监测现状和速率监测.....7
6 模型验证和精度评价.....7
6.1 直接验证.....8
6.2 间接验证.....8
6.3 模型精度评价.....8
7 成果及归档.....8
附录A（资料性） 常用植被指数.....9
附录B（资料性） 固碳增汇的遥感产品.....10
附录C（资料性） 草原生态系统碳汇遥感监测预测变量集.....12
参考文献.....14

前　言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则　第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由内蒙古自治区林业和草原局提出并归口。

本文件起草单位：中国科学院植物研究所、内蒙古自治区林业和草原监测规划院。

本文件主要起草人：赵玉金、白永飞、刘爱军、杨勇、王扬、常书娟、苏纪帅。

草地碳汇遥感监测技术指南

1 范围

本文件规定草原生态系统碳汇遥感监测技术的范围、规范性引用文件、术语和定义、及总体技术流程。

本文件适用于内蒙古自治区草原生态系统碳汇监测和报告。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 15968 遥感影像平面图制作规范

GB/T 30115-2013 卫星遥感影像植被指数产品规范

GB/T 34514 陆地观测卫星遥感数据分发与用户服务要求

GB/T 41280-2022 卫星遥感影像植被覆盖度产品规范

GB/T 42419－2023 地表碳核查技术规程

GJB 2700-1996 卫星遥感器术语

HJ 1340-2023 生物多样性（陆域生态系统）遥感调查技术指南

DD 2013—12 多光谱遥感数据处理技术规程

ISO/TS 19101-2:2008 地理信息 参考模型 第2部分：影像

3 术语和定义

GJB 2700、GB/T 17694、GB/T 41280、HJ 1320、DD 2013界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

植被碳储量 Vegetation Carbon Stock

草原生态系统中一定面积内的地上植物、凋落物和地下根系的总碳密度，常用单位为g C、kg C。

3.2

土壤碳储量 Soil Carbon Stock

草原生态系统中一定面积内的土壤碳密度，单位为kg C或t C。

3.3

生态系统碳储量 Ecosystem Carbon Density

草原生态系统中现存的植被、凋落物和土壤有机碳储量的总和，其单位为Pg C。

3.4

总初级生产力 Gross Primary Productivity, GPP

绿色植物在单位时间、单位面积通过光合作用所固定的有机碳总量。

3.5

净初级生产力 Net Primary Productivity, NPP

绿色植物通过光合作用所固定的有机碳总量扣除植物本身呼吸消耗的部分。

3.6

土壤呼吸 Soil Respiration

一般指生物在土壤中呼吸作用产生CO_2或吸收O_2的强度，包含植物的根、根际、微生物和动物的呼吸。土壤呼吸可分为自养型呼吸(根呼吸和根际微生物呼吸)和异养型呼吸(微生物和动物呼吸)。自养型呼吸消耗的底物直接来源于植物光合作用产物向地下分配的部分，而异养型呼吸为利用土壤微生物分解有机物时所释放的CO_2。

3.7

净生态系统生产力 Net Ecosystem Productivity, NEP

净初级生产力中减去异养生物呼吸消耗（土壤呼吸）光合产物之后的部分。

3.8

固碳速率 Carbon Fixation Rates

单位时间单位面积草原生态系统与大气界面CO_2的净交换量，包括生态系统总初级生产力和生态系统呼吸两个组分，其单位为$gC\ m^{-2}\ yr^{-1}$。

3.9

生物量 Biomass

生物量指某一时刻单位面积内实存植物地上、地下、活的和枯死的有机干物质总量。生物量包括地上生物量和地下生物量。

3.10

地上生物量 Aboveground Biomass

土壤层以上以干重表示的植被所有活体的生物量。

3.11

地下生物量 Belowground Biomass

所有活根生物量，通常不包括难以从土壤有机成分或枯落物中区分出来的细根（直径≤2.0 mm）。

3.12

遥感 Remote Sensing

遥感是指非接触的、远距离的探测技术。一般指运用传感器/遥感器对物体的电磁波的辐射、反射特性的探测。

3.13

影像 Imagery

通过电和光学技术将现象表现为影像。

注：在本技术标准中，假定现象已经被一种或多种设备（如照相机和红外及多光谱或高光谱扫描仪）感知或探测到。

［来源：GB/T 17694-2009, B.243］

3.14

空间分辨率 Spatial Resolution

遥感系统能区分的两个邻近目标之间的最小角度间隔或线性间隔。

[来源：GJB 2700-1996,3.1.3.2]。

3.15

时间分辨率 Temporal Resolution

即重访周期，遥感器为测量目标随时间的变化而对同一景物重复观测的最小时间间隔。

[来源：GJB 2700-1996, 3.1.3.7]。

3.16

遥感技术 Remote Sensing Technology

利用卫星、飞机、无人机等搭载光学、微波、激光雷达等传感器远距离获取大范围的地表植被信息，结合模型推算，评估生态系统的碳储量和碳变化趋势。

3.17

模型模拟 Model Simulation

基于已有的监测数据和环境参数，运用数学模型对碳循环过程进行模拟和预测，以估算碳汇能力和预测未来的碳动态。

3.18

多光谱遥感 Multispectral Remote Sensing

从近紫外、可见光、近红外、短波红外到热红外波段，波长范围主要在350 nm～20000 nm光谱区间，光谱分辨率一般为10^{-1}λ数量级（λ表示工作波长），波段数在20个以内的遥感数据获取、处理、分析和应用技术。

[来源：DD 2013—12，3.1]

3.19

高光谱遥感 Hyperspectral Remote Sensing

在400 nm～2500 nm的波长范围内，光谱分辨率达到10^{-2}λ数量级（λ表示工作波长），光谱分辨率一般小于10 nm，波段数一般在100个以上的高光谱分辨率的遥感数据获取、处理、分析和应用技术。

3.20

叶面积指数 Leaf Area Index

单位地表面积上叶子表面积总和的一半，主要表征植被冠层垂直结构复杂性。

[来源：HJ1320—2023, 3.12]

3.21

植被覆盖度 Fractional Vegetation Cover

植被（包括叶、茎、枝）在地面的垂直投影面积占统计区总面积的百分比，主要表征植被水平结构状况。

[来源：HJ 1320—2023, 3.13]

3.22

光合有效辐射吸收比例 Fraction of absorbed photosynthetically active radiation

太阳入射光和有效辐射被植被冠层拦截并吸收的比例，是表征植被光合作用的关键参量之一。

3.23

功能性状 Functional Trait

在植物个体水平上通过影响植物生长、繁殖和存活能力从而间接地影响其适合度的形态、生理以及生活史特征。

3.24

影像纹理 Image Texture

影像灰度在空间上的变化和重复，或影像中反复出现的局部模式(纹理单元)和它们的排列规则。

3.25

植被指数 Vegetation Index

一系列利用遥感影像不同谱段数据的线性或非线性组合而形成的能反映绿色植物的生长状况和分布的特征指数。

[来源：GB/T 41280-2022, 3.7]

3.26

土地覆被 Land Cover

能直接或通过遥感手段观测到的自然和人工植被及建/构筑物等地表覆盖物。

[来源：GB/T 41280-2022, 3.1]

3.27

遥感产品 Remote Sensing Products

通过遥感方式获取并被生产出来以满足特定需求的产物，包括遥感传感器获取的参数数据、模型反演得到的参数结果，以及再经更高级层次处理满足行业应用需求的应用结果。本标准中遥感产品指卫星遥感产品。

[来源：HJ 1320—2023, 3.6]

3.28

地面验证 Ground-based Validation

利用地面观测获取的地表参数对陆地遥感产品真实性进行检验的过程。

[来源：HJ 1320—2023, 3.5]

3.29

地表反射率 Surface reflectance

地物表面反射能量与到达地物表面的人射能量的比值。

[来源：HJ 1320—2023, 3.7]

4 遵循的原则

4.1 完整性

覆盖地理边界内所有的草原面积，核算面积在空间上不重叠、不遗漏。

4.2 一致性

在计量的时间区间内，地理边界内的土地利用和生态系统类型的划分标准保持一致；碳储量及其变化、碳汇和碳源的评估方法与参数等也保持一致。

4.3 可操作性

根据实际需要和调查区域的具体情况，选取可操作性高的指标和计算方法。

4.4 适用性

根据评估区域内的生态系统类型分布，气候、土壤、地面以及遥感监测数据可行性、监测空间尺度、和时间范围，选择合适的测算方法。根据区域的空间范围大小，确定评估的空间分辨率：

a) 自治区草原碳汇评估使用 1 km～10 km；
b) 盟、市级单元草原碳汇评估使用 100 m～1 km；
c) 旗县或大型牧场单元草原碳汇评估使用 30 m～100 m；
d) 乡镇、嘎查或公园等更小区域草原碳汇评估使用 1 m～30 m。

5 草原生态系统碳汇遥感监测

草原生态系统碳汇遥感监测根据数据来源、模型方法和研究尺度分成基于遥感数据和模型反演的草原生态系统固碳现状和速率长时序监测，结合地面调查和遥感模型反演的区域尺度草原生态系统固碳现状和速率监测和基于无人机的精细尺度草原生态系统固碳现状和速率监测。

5.1 基于遥感数据和模型反演的草原生态系统固碳现状和速率长时序监测

5.1.1 大气 CO_2 反演模型

通过同化卫星遥感数据和地面大气CO2浓度、站点通量数据和遥感地表参数等数据，利用大气CO_2反演模型和大气CO_2摩尔分数测量，实现“自上而下”的草原碳源汇时空变化动态监测。常用的碳卫星如OCO-2、TanSat等，典型的大气CO_2反演模型如CT、CTE、CAMS和Jena等。大气XCO_2反演流程具体方法参考GB/T 42419－2023执行。

5.1.2 净初级生产力遥感监测-光能利用率模型

在适宜的温度、水分、养分等环境条件下，陆地生态系统以某一固定的比例（潜在光能利用率）将太阳能转化为化学能，光合作用的强弱由吸收太阳有效辐射的量决定。常见的模型如CASA模型，按公式1计算。

$$NPP\,(x,t) = APAR(x,t) \times \varepsilon(x,t) \quad \cdots\cdots (1)$$

式中：

NPP—净初级生产力；

APAR—植被所吸收的光合有效吸收辐射；

ε—光能利用率。

5.1.3 过程模型

从生态机理出发，通过模拟陆地生态系统生理生态过程和碳循环的过程和机制，提供网格化碳通量估计。生理过程模拟通常包括植物光合、呼吸和蒸腾等，常见模型如BEPS、BIOME-BGC等模型。过程模型中的输入参数（土地覆被分类、叶面积指数LAI、光温水条件等）可由遥感数据获取。

5.2 结合地面调查和遥感模型反演的区域尺度草原生态系统固碳现状和速率监测

5.2.1 地面实测

5.2.1.1 碳储量

通过地面样方调查，获取样方内（通常1 m×1 m）所有草本和小(半)灌木植物的总地上部活体生物量、凋落物生物量和半分解层生物量以及土壤碳含量。

通过地面收获法和内生长芯法（根袋法），于监测年份的生长季旺期，分别监测草原生态系统地上净初级生产力和地下净初级生产力等碳储量变化计算生态系统碳汇;有条件也可以直接采用自动箱式法和涡动相关法获取。

5.2.2 遥感变量获取与处理

5.2.2.1 卫星遥感数据与预处理

根据评估区域生态系统分布特征、空间范围、卫星发射时间和目的需求，选取合适空间分辨率和时间范围的卫星遥感数据。低空间分辨率卫星数据以AVHRR、MODIS等为主要数据源，分辨率为250 m～8000 m，时间范围为1981年—至今。中等空间分辨率卫星数据以Landsat、Sentinel等为主要数据源，分辨率为10 m～30 m，时间范围为1982年—至今。高空间分辨率卫星数据以Quickbird、GF等为主要数据源，分辨率优于10 m，甚至高达亚米级，时间范围为2001年—至今。具体数据获取及辐射校正、几何校正、大气校正等数据预处理流程可参考国家环境标准HJ 1340-2023和国家标准DD 2013—12。

5.2.2.2 植被指数

常用植被指数有归一化植被指数(NDVI, Normalized Vegetation Index)、比值植被指数(RVI, Ratio Vegetation Index)、差值植被指数(DVI, Difference Vegetation Index)、调整土壤亮度植被指数(SAVI, Soil-Adjusted Vegetation Index)、土壤调整植被指数(MSAVI, Modified Soil-Adjusted Vegetation Index)、增强植被指数(EVI，Enhanced Vegetation Index)以及功能性状指示指数，如归一化水分指数（NDWI, Normalized Difference Water Index）、叶绿素敏感指数（CSI, Chlorophyll Sensitive Index）等（附录A）。植被指数计算可参考国家标准GB/T 30115-2013。

5.2.2.3 纹理特征

利用ENVI软件纹理分析工具，通过影像波段或植被指数的灰度共生矩阵计算得到均值、方差、对比度、同质性、熵、相关性等纹理特征变量。

5.2.2.4 植被覆盖度 FVC

利用遥感估算植被覆盖度,常用的方法是在像元二分模型的基础上,用植被指数表征地物遥感信息，提取目标区域的植被覆盖度，按公式2计算。具体流程可参考“卫星遥感影像植被覆盖度产品规范”。也可根据实际需求直接选用合适的FVC公开产品（附录B）。

$$Fvc = (NDVI - NDVIsoil) / (NDVIveg - NDVIsoil) \quad (2)$$

式中：

F_{vc}—植被覆盖度

$NDVI_{soil}$—完全为裸土或无植被覆盖区域的NDVI值；

$NDVI_{veg}$—完全被植被所覆盖的纯植被像元的NDVI值。

5.2.2.5 叶面积指数 LAI

以光谱数据或植被指数作为自变量，通过统计模型法计算，常见具体形式如公式3。根据实际需求也可直接选用合适的LAI公开产品（附录B）。

$$\begin{cases} LAI = ax^3 + bx^2 + cx + d \\ LAI = a + bx^c \\ LAI = -1/2aln(1-x) \end{cases} \quad (3)$$

式中：

LAI—叶面积指数；

a、b、c—方程系数；

x—光谱反射率或植被指数。

5.2.2.6 光合有效辐射吸收比例 FPAR

类似于叶面积指数方法，也可以光谱数据或植被指数作为自变量，通过统计模型法计算，以线性关系为主，但也存在幂函数和指数函数。另外，FPAR也可以通过孔隙率方法获取（公式4）。也可直接根据实际需求选用合适的FPAR公开产品（附录B）。

$$FPAR = (1-\rho_1) - (1-\rho_2)e^{-G(\theta)\beta LAI_e/\cos(\theta_s)} \cdots\cdots 4)$$

式中：

FPAR —光合有效辐射吸收比例；

ρ_1—冠层双向反射率；

ρ_2—背景反射率；

$G(\theta)$—孔隙率；

LAI_e—有效叶面积指数；

θ_s—太阳天顶角。

5.2.3 非生物因子变量获取与处理

非生物因子包括气候、土壤和地形等参数。气候包括温度、降水、蒸散发多年均值及其季节性变异等；土壤属性包括容重、pH、厚度、总氮、总磷等；地形包括高程、坡度、坡向和地形粗糙度指数（TRI，Terrain Roughness Index）等 （附录C）。

5.2.4 碳储量/碳汇遥感反演

根据研究范围，选取合适空间分辨率的卫星影像，通过提取影像光谱信息、NDVI等植被指数及其衍生产品纹理特征、FVC、LAI、FPAR等，结合气候、土壤、地形等环境参量（附录C），以地面实测碳储量/碳汇量为因变量，在去除共线性基础上，综合利用随机森林等机器学习算法，依据不同草原类型，分别构建生态系统碳储量/碳汇的地面-遥感协同反演指标和技术体系，实现满足精度的区域尺度的长时间序列碳储量/碳汇遥感反演。

碳储量遥感反演后，进一步基于遥感估算的不同时间或时间段的生态系统碳库的变化，采用库差法（公式5）估算草原碳汇功能：

$$\Delta C = (C_{t2} - C_{t1})/(t_2 - t_1) \cdots\cdots (5)$$

式中：

ΔC—是碳库变化速率，也可以表征为碳汇功能；

Ct_1—时间t_1的碳库储量；

Ct_2—时间t_2的碳库储量。

5.3 基于无人机的精细尺度草原生态系统固碳现状监测现状和速率监测

通过无人机搭载多光谱、高光谱等传感器，获取生长季旺季或多时相的植被指数、盖度、生物量、功能性状、多样性、土壤有机质、地形等生态参量，结合地面调查，利用随机森林等机器学习算法，反演精细尺度草原生态系统固碳量和固碳速率。

6 模型验证和精度评价

采用直接检验法和间接检验法相结合，利用准确度评价指标和不确定度分析评价指标，对遥感监测结果的精度进行评估，具体参考GB/T 36296-2018。

6.1 直接验证

如果评估区域有静态箱、涡动相关等碳通量观测设备，则直接基于生态系统通量观测NEP数据对遥感模型预测的NEP进行验证。通量观测数据处理的流程和方法见《陆地生态系统通量观测的原理与方法》和《中国陆地生态系统碳通量观测技术及时空变化特征》。

6.2 间接验证

在无通量观测数据进行直接验证的区域，基于样方调查的生物量、植被和土壤碳密度或碳储量等数据对遥感模型预测的NPP、生物量、碳储量等进行间接地面验证。

6.3 模型精度评价

基于地面实测数据对遥感和模型预测结果进行交叉验证，模型精度评价参数如决定系数（R^2）、系统性均方差(MSE)、均方根误差（RMSE）等。

7 成果及归档

草原碳汇遥感监测工作成果包括：野外调查和遥感指标数据集、空间专题图集以及评估报告等。其中：

a) 野外调查和遥感指标数据集应包括各项指标采集的原始数据和规范化处理后的数据，遥感数据集的要求需符合 GB/T 34514；
b) 空间专题图的制作需符合 GB/T 13989 和 GB/T 15968 的规定；
c) 评估报告包括调查区域概况、数据来源与处理、指标筛选和模型构建、精度评估、固碳现状和速率评估、对策与建议、参考文献等部分。

附 录 A
（资料性）
常用植被指数

常用植被指数见表 A.1.

表 A.1 常用植被指数

植被指数	计算公式	指示功能性状	参考文献
TCARI	$3\times[(R_{699.19}-R_{668.98})-0.2\times(R_{699.19}-R_{550.67})(R_{699.19}/R_{668.98})]$	叶绿素	Kim et al. (1994)
OSAVI	$(1+0.16)(R_{750}-R_{705})/(R_{750}+R_{705}+0.16)$	叶绿素	Wu et al. (2008)
OSAVI2	$(1+0.16)(R_{800}-R_{670})/(R_{800}+R_{670}+0.16)$	叶绿素	Rondeaux et al. (1996)
D	R_{730}/R_{706}	叶绿素	Zarco-Tejada et al. (2003)
Datt	$(R_{850}-R_{710})/(R_{850}-R_{680})$	叶绿素	Datt (1999)
Datt2	R_{850}/R_{710}	叶绿素	Datt (1999)
GMI2	R_{750}/R_{700}	叶绿素	Gitelson et al. (2003)
CSI	$2.5\times[(R_{865}-R_{705})/(R_{865}-R_{705})]\times R_{490}/R_{705}$	叶绿素	Zhang et al. (2022)
SR2	R_{700}/R_{670}	叶绿素	McMurtrey et al. (1994)
$NDVI_{705}$	$(R_{750}-R_{705})/(R_{750}+R_{705})$	叶绿素	Sims & Gamon, 2002
TNDVI	$[(R_{842}-R_{665})/(R_{842}+R_{665})+0.5]$^0.5	叶绿素	Rozenstein et al. (2019)
NDI45	$(R_{705}-R_{665})/(R_{705}+R_{665})$	叶绿素	Delegido et al. (2011)
PSSRA	R_{783}/R_{665}	叶绿素	Rozenstein et al. (2019)
$mNDVI_{705}$	$(R_{750}-R_{705})/(R_{750}+R_{705}-2\times R_{445})$	叶绿素	Datt (1999)
mSR_{705}	$(R_{750}-R_{445})/(R_{705}+R_{445})$	叶绿素	Datt (1999)
CRI_{550}	$1/R_{510}-1/R_{550}$	叶绿素	Gitelson et al. (2002)
CRI_{700}	$1/R_{510}-1/R_{700}$	类胡萝卜素	Gitelson et al. (2002)
SIPI	$(R_{800}-R_{445})/(R_{800}-R_{680})$	类胡萝卜素/叶绿素	Penuelas et al. (1995)
PSRI	$(R_{678}-R_{500})/R_{750}$	类胡萝卜素/叶绿素	Merzlyak et al. (1999)
SR	R_{750}/R_{700}	LAI	Gitelson & Merzlyak, 1997
WDVI	$R_{842}-R_{665}\times 0.5$	LAI	Rozenstein et al. (2019)
NDWI	$(R_{865}-R_{1614})/(R_{865}-R_{1614})$	水分	Pan et al. (2019)
MSI	R_{1600}/R_{819}	水分	Hunt and Rock (1989)

附 录 B
（资料性）
固碳增汇相关的遥感产品

与固碳增汇相关的遥感产品见表 B.1.

表 B.1 固碳增汇相关遥感产品

产品名称	传感器	空间分辨率	时间范围	时间分辨率	算法	来源、数据获取地址
MODIS GPP (MOD17A2H v061)	MODIS	500m	2000-present	8 天	光能利用率模型	https://lpdaac.usgs.gov/products/mod17a2hv061/
GLASS GPP(v60)	MODIS	500m	2000-2020	8 天	涡度协方差-光能利用率模型	http://glass.umd.edu/GPP/MODIS/500m/GLASS_GPP_500M_V60/
MODIS NPP (MOD17A3HGF v061)	MODIS	500m	2000-present	逐年	光能利用率模型	https://lpdaac.usgs.gov/products/mod17a3hgfv061/
NPP	MODIS/AVHRR	1000m	1985-2023	逐月	CASA 模型	http://gis5g.com/data/zbsj/NPP?id=277
BEPS NPP	MODIS	0.072727°	1981-2019	逐日	基于过程的北方生态系统生产力模拟器模型	http://www.nesdc.org.cn/sdo/detail?id=612f42ee7e28172cbed3d80b
MODIS LAI (MCD15A3H v061)	MODIS	500m	2000-present	4 天	三维辐射传输模型	https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd15a3hv061/
GLASS LAI (v60)	MODIS	250m	2000-2021	8 天	双向长短期记忆模型	http://glass.umd.edu/LAI/MODIS/250m/2000/057/
HiQ-LAI	MODIS	5000m	2000-2022	8 天	时空信息合成算法	https://doi.org/10.5281/zenodo.8296768
MODIS FPAR (MCD15A3H v061)	MODIS	500m	2000-present	4 天	三维辐射传输模型	https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd15a3hv061/

表B.1 固碳增汇相关遥感产品（续）

产品名称	传感器	空间分辨率	时间范围	时间分辨率	算法	来源、数据获取地址
GLASS FPAR (v60)	MODIS	250m	2000-2021	8 天	GLASS LAI 产品配合其他辅助数据基于公式计算	http://www.glass.umd.edu/FAPAR/MODIS/250m/
MODIS FVC (MOD44B v061)	MODIS	250m	2000-2023	逐年	线性模型回归树算法	https://lpdaac.usgs.gov/products/mod44bv061/
GLASS FVC (v40)	MODIS	500m	2000-2021	8 天	多变量自适应回归样条模型	http://www.glass.umd.edu/FVC/MODIS/500m/
FVC	Landsat	30m	1986-2023	逐年	像元二分模型	http://www.gis5g.com/data/zbsj/FVC?id=20
全球陆地生态系统净生态系统生产力	MODIS	1000m	2000-2020	/	随机森林模型	https://data.caseearth.cn/sdo/detail/65388432819aec0f26f434a9
全球年土壤呼吸	MODIS	1000m	2000-2020	逐年	机器学习模型	http://www.geodata.cn/data/datadetails.html?dataguid=3103258

附 录 C
（资料性）
草原生态系统碳汇遥感监测预测变量集

草原生态系统碳汇遥感监测预测变量集见表 C.1.

表 C.1 草原生态系统碳汇遥感监测预测变量集

生态参量		分辨率	时间	方法或来源
地形	高程	30m	2000-2009	ASTER GDEM
	地形粗糙指数 TRI			
	坡度			
	坡向			
土壤 0-5cm，5-15 cm，15-30 cm，30-60 cm，60-100	PH	90m	2010-2018	国家地球系统科学数据中心
	厚度			
	容重			
	总钾			
	总氮			
	总磷			
气象 1-7 月，5-8 月，1-8 月，1-12 月	降水	1000m	2000-2020	国家地球系统科学数据中心
	降水季节性分配指数			
	温度			
	蒸散发			
净初级生产力 NPP 年最大、年平均、生长季平均、年际变异系数		10-1000m	2000-2020	CASA 模型
光合有效系数辐 FPAR 年最大、年平均、生长季平均、年际变异系数		10-1000m	2000-2020	神经网络模拟
叶面积指数 LAI 年最大、年平均、生长季平均、年际变异系数		10-1000m	2000-2020	MODIS MOD15 产品

归一化植被指数 NDVI 年最大、年平均、生长季平均、年际变异系数	10-1000m	2000-2020	MODIS MOD09 波段合成
纹理特征	10-1000m	2000-2020	基于 NDVI 或 EVI 的灰度共生矩阵计算
功能性状	10-1000m	2000-2020	相关植被指数代替或基于实测数据利用偏最小二乘法反演
草地类型	10-1000m	2000-2020	中国草地资源国土三调数据

参 考 文 献

[1]Datt, B. 1999. Visible/near infrared reflectance and chlorophyll content in Eucalyptus leaves. International Journal of Remote Sensing 20:2741-2759.

[2] Delegido, J., J. Verrelst, L. Alonso, and J. Moreno. 2011. Evaluation of Sentinel-2 red-edge bands for empirical estimation of green LAI and chlorophyll content. Sensors 11:7063-7081.

[3] Gitelson, A. A., Y. Gritz, and M. N. Merzlyak. 2003. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. Journal of Plant Physiology 160:271-282.

[4] Gitelson, A. A., Y. Zur, O. B. Chivkunova, and M. N. Merzlyak. 2002. Assessing carotenoid content in plant leaves with reflectance spectroscopy. Photochemistry and Photobiology 75:272-281.

[5] Hunt, E. R., and B. N. Rock. 1989. Detection of changes in leaf water content using Near- and Middle-Infrared reflectances. Remote Sensing of Environment 30:43-54.

[6] Kim, M. S., C. Daughtry, E. W. Chappelle, J. E. Mcmurtrey, and C. L. Walthall. 1994. The use of high spectral resolution bands for estimating absorbed photosynthetically active radiation. ISPRS sixth international colloquium on physical measurements and signatures in remote sensing Val d'Isère, France:17-21.

[7] McMurtrey, J. E., E. W. Chappelle, M. S. Kim, J. J. Meisinger, and L. A. Corp. 1994. Distinguishing nitrogen fertilization levels in field corn (Zea mays L.) with actively induced fluorescence and passive reflectance measurements. Remote Sensing of Environment 47:36-44.

[8] Merzlyak, M. N., A. A. Gitelson, O. B. Chivkunova, and V. Y. U. Rakitin. 1999. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. Physiologia Plantarum 106:135-141.

[9] Pan, H., Z. Chen, J. Ren, H. Li, and S. Wu. 2019. Modeling winter wheat leaf area index and canopy water content with three different approaches using Sentinel-2 multispectral instrument Data. Ieee Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing 12:482-492.

[10] Penuelas, J., B. Frederic, and I. Filella. 1995. Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll-a ratio from leaf spectral reflectance. Photosynthetica 31:221-230.

[11] Rondeaux, G., M. Steven, and F. Baret. 1996. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. Remote Sensing of Environment 55:95-107.

[12] Rozenstein, O., N. Haymann, G. Kaplan, and J. Tanny. 2019. Validation of the cotton crop coefficient estimation model based on Sentinel-2 imagery and eddy covariance measurements. Agricultural Water Management 223:105715.

[13] Wu, C. Y., Z. Niu, Q. Tang, and W. J. Huang. 2008. Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: Modeling and validation. Agricultural and Forest Meteorology 148:1230-1241.

[14] Zarco-Tejada, P. J., J. C. Pushnik, S. Dobrowski, and S. L. Ustin. 2003. Steady-state chlorophyll a fluorescence detection from canopy derivative reflectance and double-peak red-edge effects. Remote Sensing of Environment 84:283-294.

[15] Zhang, H., J. Li, Q. Liu, S. Lin, A. Huete, L. Liu, H. Croft, J. G. P. W. Clevers, Y. Zeng, X. Wang, C. Gu, Z. Zhang, J. Zhao, Y. Dong, F. Mumtaz, and W. Yu. 2022. A novel red-edge spectral index for retrieving the leaf chlorophyll content. Methods in Ecology and Evolution 13:2771-2787.