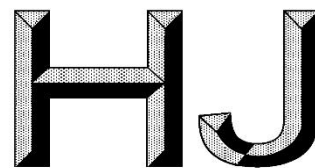


附件 10



中华人民共和国国家生态环境标准

HJ □□□□—20□□

陆地生态系统固碳服务功能评估技术 规范（试行）

Technical specification for assessment of carbon sequestration service of
terrestrial ecosystems (on trial)

（征求意见稿）

202□-□□-□□发布

202□-□□-□□实施

生态环境部 发布

目 次

前 言	ii
1 适用范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 总则	2
5 评估程序	3
6 评估指标及估算方法	3
7 评估内容	5
附录 A（规范性附录）生态系统总碳储量实测方法	6
附录 B（规范性附录）光能利用率模型参数确定方法	11
附录 C（规范性附录）光合作用生化机理模型参数确定方法	13
附录 D（资料性附录）涡度相关测定方法	18

前 言

为贯彻《中华人民共和国生态环境法典》及相关法规，规范陆地生态系统固碳服务功能评估工作，服务全国生态状况调查评估和“双碳”目标实现，制定本标准。

本标准规定了陆地生态系统固碳服务功能评估的总则、指标体系、方法选取等要求。

本标准附录 A~附录 C 为规范性附录，附录 D 为资料性附录。

本标准为首次发布。

本标准由生态环境部自然生态保护司、应对气候变化司、法规与标准司组织制订。

本标准主要起草单位：生态环境部卫星环境应用中心、中国科学院地理科学与资源研究所、首都师范大学。

本标准生态环境部 20□□年□□月□□日批准。

本标准自 20□□年□□月□□日起实施。

本标准由生态环境部解释。

陆地生态系统固碳服务功能评估技术规范

1 适用范围

本标准规定了陆地生态系统固碳服务功能评估的总则、指标体系、方法选取等要求。
本标准适用于全国、省级行政区和其他有评估需求区域的陆地生态系统的固碳服务功能评估。

2 规范性引用文件

本标准引用了下列文件或其中的条款。凡是注明日期的引用标准，仅注日期的版本适用于本标准。凡是未注日期的引用标准，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本标准。其他文件被新文件废止、修改、修订的，新文件适用于本标准。

GB/T 30115	卫星遥感影像植被指数产品规范
GB/T 33696	陆-气和海-气通量观测规范
GB/T 43648	主要树种立木生物量模型与碳计量参数
GB/T 43681	生态系统评估 区域生态系统调查方法
GB/T 46105	陆地生态系统碳汇核算指南
HJ 1167	全国生态状况调查评估技术规范——森林生态系统野外观测
HJ 1168	全国生态状况调查评估技术规范——草地生态系统野外观测
HJ 1176	全国生态状况调查评估技术规范——数据质量控制与集成
CH/T 3020	实景三维地理信息数据激光雷达测量技术规程
CH/T 8023	机载激光雷达数据处理技术规范
CH/T 8024	机载激光雷达数据获取技术规范
DD 2013-12	多光谱遥感数据处理技术规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1

陆地生态系统 **terrestrial ecosystems**

陆地上生物与其环境通过能量流、物质流、信息流形成的功能整体。

3.2

固碳服务功能 **carbon sequestration service**

陆地生态系统通过光合作用吸收大气中的二氧化碳，合成有机物质，将碳固定在植物和土壤中，降低大气中二氧化碳浓度的调节服务功能。

3.3

碳汇 carbon sink

从大气中清除二氧化碳和甲烷等导致温室气体效应的气体、气溶胶或它们初期形态的任何过程、活动和机制。

3.4

碳源 carbon source

向大气释放二氧化碳和甲烷等导致温室气体效应的气体、气溶胶或它们初期形态的任何过程、活动和机制。

3.5

生态系统固碳速率 ecosystem carbon sequestration rate

单位时间内单位土地面积生态系统净固定并长期储存在生态系统的碳量。

3.6

碳储量 carbon stock

特定时间陆地生态系统碳库中储存的碳的数量。

3.7

净生态系统生产力 net ecosystem productivity (NEP)

植物净初级生产力减去异养呼吸消耗的有机碳量，即光合作用固定碳量与生态系统总呼吸量的差值。

3.8

净生态系统二氧化碳交换量 net ecosystem exchange (NEE)

陆地生态系统与大气之间的二氧化碳通量差值，反映生态系统对大气二氧化碳的吸收和释放能力，即单位时间单位面积上碳通量的净平衡值。

4 总则

4.1 规范性原则

建立标准化的评估体系，明确方法适用规则，确保评估指标和方法的一致性，确保评估过程规范可控，同一区域、不同时段内、不同生态系统类型固碳服务功能的评估结果具备可比性。

4.2 可操作性原则

充分考虑全国及省级层面技术能力、工作积累等方面的差异，通过指标的分层设计、评估流程的拆解实现，提高方法的可操作性，让评估方法易于落地执行和推广。

4.3 先进性原则

在传统方法基础上，整合卫星遥感监测、过程模型模拟、通量观测等前沿技术方法，增强评估的

多尺度应用能力，同时与全球碳循环评估体系接轨，提升评估结果的科学性与前瞻性。

5 评估程序

陆地生态系统固碳的温室气体选择参照 GB/T 46105 的要求执行。评估程序包括明确评估范围、指标获取方法选择、评估指标估算及功能评估，具体见图 1。

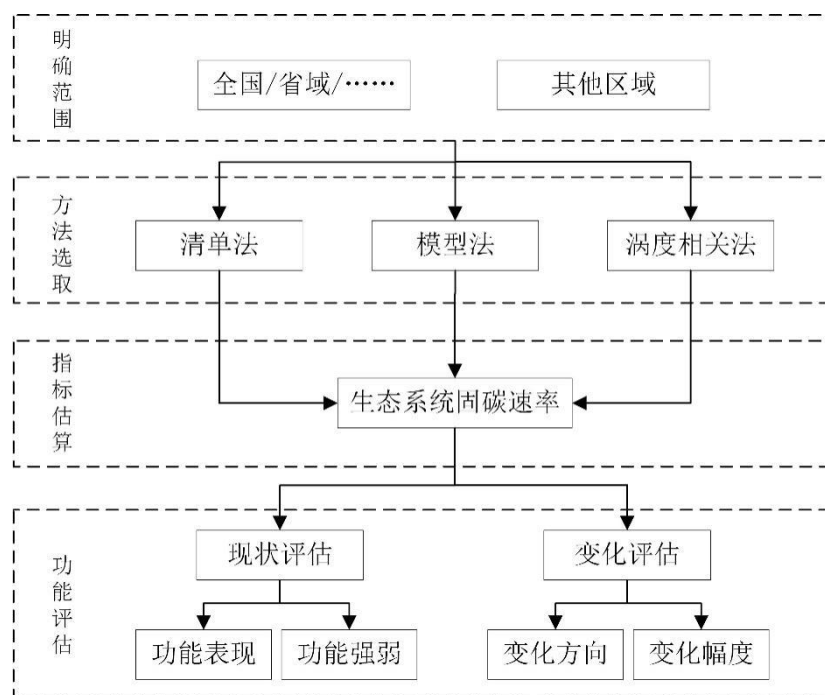


图 1 陆地生态系统固碳服务功能评估程序

6 评估指标及估算方法

以固碳速率作为陆地生态系统固碳服务功能的评估指标。不同方法适用于不同的数据基础和评估目的，评估者可根据实际需求，在清单法、模型法或涡度相关法中择优采用单一方法进行指标计算并开展评估。原则上，涉及多区域横向对比的评估应采用模型法。

6.1 清单法估算固碳速率

基于生态系统演替进程中碳储量的动态累积和周转过程，通过两个实测时间点的碳储量差分来估算固碳速率，进而评估生态系统固碳服务功能。适用于具备时间连续碳储量实测数据，如森林资源清查、土壤清查和草地清查资料等的场景。具体按公式（1）计算：

$$CSR = \frac{C(t_2) - C(t_1)}{\Delta T} \quad (1)$$

式中：CSR——评估区生态系统固碳速率，以碳计， $t/(hm^2 \cdot a)$ ；

$C(t_2)$ —— t_2 时刻（后时相）生态系统总碳储量，以碳计， t/hm^2 ；

$C(t_1)$ —— t_1 时刻（前时相）生态系统总碳储量，以碳计， t/hm^2 ；

ΔT ——评估时间区间，a。 $\Delta T = t_2 - t_1$ ， t_2 为评估年， t_1 为基准年。

各时刻生态系统总碳储量是该时刻评估区内植被碳储量和土壤碳储量之和，实测方法见附录 A。

6.2 模型法估算固碳速率

6.2.1 估算方法

基于生态系统碳循环的完整过程与植被光合-呼吸耦合机制，以净生态系统生产力表征生态系统固碳速率，进而评估生态系统固碳服务功能。适用于全国或省域等大尺度评估，且已具备光能利用率或植被光合作用生化模型等核心算法及驱动数据的场景。具体按公式（2）计算：

$$CSR = NEP = NPP - R_h \quad (2)$$

式中：CSR——评估区生态系统固碳速率，以碳计， $g/(m^2 \cdot a)$ ；

NEP——净生态系统生产力，以碳计， $g/(m^2 \cdot a)$ ；

NPP——植被净初级生产力，以碳计， $g/(m^2 \cdot a)$ ；

R_h ——异养生物呼吸消耗（土壤呼吸速率），以碳计， $g/(m^2 \cdot a)$ ，具体参照 GB/T 43681 相关要求执行。

植被净初级生产力（NPP）以植物光合作用的生理生态规律为基础，通过模拟光能吸收与转化为生物量的过程，同时响应环境因子对光合作用的调控作用，采用光能利用率模型或光合作用生化机理模型模拟获得。

6.2.2 光能利用率模型

由植被吸收的光合有效辐射量（APAR）与植被光能利用率（ ε ）两个参数估算NPP。具体按公式（3）计算：

$$NPP = APAR \times \varepsilon \quad (3)$$

式中：NPP——植被净初级生产力，以碳计， $g/(m^2 \cdot a)$ ；

APAR——植被吸收的光合有效辐射， $MJ/(m^2 \cdot a)$ ；

ε ——实际光能利用率，以碳计， g/MJ 。

各参数确定方法见附录 B。

6.2.3 光合作用生化机理模型

以 1,5-二磷酸核酮糖（RuBP）羧化-氧化作用动力学过程为基础模拟植被总初级生产力，再减去植被自养呼吸进而估算NPP。具体按公式（4）计算：

$$NPP = GPP - R_a \quad (4)$$

式中：NPP——植被净初级生产力，以碳计， $g/(m^2 \cdot a)$ ；

GPP——植被总初级生产力，以碳计， $g/(m^2 \cdot a)$ ；

R_a ——植被自养呼吸，以碳计， $g/(m^2 \cdot a)$ 。

各参数计算方法见附录 C。

6.3 涡度相关法估算固碳速率

基于大气边界层湍流输送原理，通过监测净生态系统二氧化碳通量评估生态系统固碳服务功能。适用具备长期连续微气象观测数据，如配备通量观测塔的森林、草地、农田等生态系统定位监测资料的场景。具体按公式（5）计算：

$$CSR = -\frac{12}{44}NEE = -\frac{12}{44}\left(\overline{w'\rho_c'}(z_r) + \int_0^{z_r} \frac{\partial \overline{\rho_c}}{\partial t} dz\right)$$
 (5)

式中：*CSR*——评估区生态系统固碳速率，以碳计，mg/(m²·s)；
NEE——净生态系统二氧化碳通量，即生态系统与大气间的净二氧化碳交换量，mg/(m²·s)；
 $\overline{w'\rho_c'}(z_r)$ ——二氧化碳垂直湍流通量，即垂直风速和二氧化碳密度脉动的协方差，mg/(m²·s)；
*w*为垂直风速脉动值，m/s；*ρ_c*为二氧化碳在空气中的密度，g/m³；撇号（'）表示瞬时值与平均值的偏差；*z_r*为仪器测量高度，m；
 $\int_0^{z_r} \frac{\partial \overline{\rho_c}}{\partial t} dz$ ——观测高度以下大气中的二氧化碳通量，mg/(m²·s)；
 $\frac{12}{44}$ ——碳与二氧化碳的相对分子质量之比。

涡度相关详细测定方法见附录 D。

7 评估内容

陆地生态系统固碳服务功能评估包括现状评估和变化评估。现状评估指某一时间节点或某段时间内的功能现状；变化评估指对比两个或多个时间节点或时段的功能变化。具体评估内容见表 1。

表 1 陆地生态系统固碳服务功能评估内容

评估层级	评估内容	评估规则
现状评估	功能表现	当固碳速率>0 时，生态系统固碳服务功能表现为净吸收碳，即为碳汇。
		当固碳速率<0 时，生态系统固碳服务功能表现为净释放碳，即为碳源。
	功能强弱	由评估时点或时段固碳速率的绝对值大小直接表征。
变化评估	变化方向	同向，即生态系统始终表现为碳源/碳汇。
		异向，即生态系统由碳源转变为碳汇或由碳汇转变为碳源。
	变化幅度	当变化方向为同向时，由后时点或时段固碳速率绝对值与前时点或时段固碳速率绝对值的差值表征。当差值为正时，功能提升；当差值为负时，功能降低；差值的绝对值大小直接表征功能变化幅度。
		当变化方向为异向时，由后时点（或时段平均）固碳速率与前时点（或时段平均）固碳速率的差值表征。当差值为正时，碳源转变为碳汇；当差值为负时，碳汇转变为碳源；差值的绝对值大小直接表征功能变化幅度。

附 录 A
(规范性附录)
生态系统总碳储量实测方法

清单法实测的各时刻生态系统总碳储量是该时刻评估区内植被碳储量和土壤碳储量之和，按公式 (A.1) 计算：

$$C(t_i) = C_{Tr}(t_i) + C_{Bu}(t_i) + C_{Gr}(t_i) + C_{DW}(t_i) + C_{Li}(t_i) + C_{SOC_i}(t_i) \quad (A.1)$$

式中： $C(t_i)$ —— t_i 时刻区域内生态系统总碳储量，以碳计，kg；

$C_{Tr}(t_i)$ —— t_i 时刻乔木碳储量，以碳计，kg；

$C_{Bu}(t_i)$ —— t_i 时刻灌木碳储量，以碳计，kg；

$C_{Gr}(t_i)$ —— t_i 时刻草本植物碳储量，以碳计，kg；

$C_{DW}(t_i)$ —— t_i 时刻枯死木碳储量，以碳计，kg；

$C_{Li}(t_i)$ —— t_i 时刻凋落物碳储量，以碳计，kg；

$C_{SOC_i}(t_i)$ —— t_i 时刻土壤有机碳储量，以碳计，kg；

i ——取 1 或 2，对应式 (1) 中的前时相或后时相。

实测法包括地面实地测量和遥感-地面同步观测两种方法。

A.1 乔木碳储量

A.1.1 地面实测每木检尺

适用于森林、灌丛、草地、湿地等生态系统中的活体乔木，通过地面实地测量获取区域内乔木每木检尺进而估算碳储量。

依照 HJ 1167 进行样地样方设置和每木检尺。按照优势物种对样地内所有乔木胸径、树高等信息进行归类，选择与树种对应的生物量异速生长方程，计算样地内所有乔木器官生物量及个体总生物量。乔木碳储量按公式 (A.2) 计算：

$$C_{Tr} = \sum_{j=l,b,s,r} \sum (f_{Tr_{i,j}}(DBH, H) \times CF_{Tr_{i,j}}) \times AP \quad (A.2)$$

式中： C_{Tr} ——乔木碳储量，以碳计，kg；

$f_{Tr_{i,j}}(DBH, H)$ —— i 树种 j 器官 (l, b, s, r 分别代表叶, 枝, 干, 根) 生物量异速生长方程 (具体参考 GB/T 43648, 对于 GB/T 43648 中未提到的树种, 按照与该标准中树形相近的树种进行近似估算), DBH 代表胸径, H 代表树高。以干重计, kg/株；

$CF_{Tr_{i,j}}$ —— i 树种 j 器官平均含碳系数，以碳计，kg/kg；

AP ——样地面积，m²。

A.1.2 遥感-地面同步观测

适用于采用卫星遥感和激光雷达技术，通过遥感和地面同步观测获取区域内乔木碳储量，数据质

量控制依据 HJ 1176 的相关要求执行。

a) 卫星遥感观测

根据评估区域的大小和特点选择不同中高空间分辨率卫星多光谱影像，时相与实地调查时间大致相同，并选择森林生长旺盛期的影像。依据 DD 2013-12 进行影像预处理。

b) 地面（样方）观测

基于待估算区域的卫星影像，针对每种森林类型至少设置一个典型样地。在各样地内设置代表性样方，具体依据 HJ 1167 的相关要求执行。通过手持或地基激光雷达设备获取所有样方内的高密度激光雷达点云，具体依据 CH/T 3020-2018。进行单木分割并提取样方内所有单木的位置、胸径和树高。

c) 无人机（样地）观测

获取所有样地的机载激光雷达点云数据，具体依据 CH/T 8024。进行机载激光雷达点云数据常规处理，具体依据 CH/T 8023。提取冠层高度模型，按 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 将其格网化并提取所有格网单元的点云特征（参考附录 B）。

d) 生物量估算

根据 A.1.1 提取的单木位置、胸径和树高，参照式(A.2)的异速生长方程选用原则，计算样方内每株乔木生物量，累加后得到样方乔木总生物量。按 $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$ 对样地的机载激光雷达点云体素化。各像元的乔木生物量，按公式（A.3）计算：

$$M_i = \frac{G \times N_{pi}}{T} \quad (\text{A.3})$$

式中： M_i ——像元 i 的乔木生物量，kg；

G ——样方内乔木总生物量，kg；

T ——样方总体素数量；

N_{pi} ——像元 i 在其垂直方向上的体素数量（不含最下层体素，以消除林下草本和灌木的干扰）。

根据样方乔木生物量 M_i 及其对应格网单元的点云特征，构建乔木生物量估算模型，筛选出最优估算模型及其对应的最优点云特征。估算模型可采用多元线性回归、随机森林和支持向量机模型。将样地内各格网单元的最优点云特征输入最优估算模型，计算样地乔木生物量空间分布图 B 。对 B 进行升尺度聚合，得到与卫星影像具有相同空间分辨率的样地乔木生物量分布图 C ，按公式（A.4）计算：

$$C_i = \sum_{j=1}^{n^2} B_j \quad (\text{A.4})$$

式中： C_i ——卫星影像上第 i 个像元的生物量，kg；

n ——目标卫星影像空间分辨率，m；

B_j ——与该卫星影像像元对应空间范围内第 j 个像元的生物量，kg。

根据样地乔木生物量分布图 C_i 及其对应卫星影像像元的遥感指数，构建乔木生物量估算模型，筛选出最优估算模型及其对应的最优遥感指数。遥感指数一般包括卫星遥感影像个各波段反射率、植被指数和纹理特征，植被指数计算方法参照 GB/T 30115 执行。估算模型可采用多元线性回归、随机森林和支持向量机模型。将卫星影像各像元的最优遥感指数输入最优估算模型，得到评估区域的乔木生物量空间分布图。

A.2 灌木碳储量

适用于森林、灌丛、草地、湿地等生态系统中活体灌木碳储量的实地测量。

参照 HJ 1167 进行样地样方设置。通过实测灌木植被群系碳密度等信息，采用累加法估算灌木碳储量，按公式（A.6）计算：

$$C_{Bu} = \sum C_{plot_i} \times A_i \quad (A.6)$$

式中： C_{Bu} ——灌木碳储量，kg；

C_{plot_i} —— i 群系样地碳密度，以碳计，kg/m²；

A_i —— i 群系面积，m²。

灌木碳密度包括地上生物量碳、地下生物量碳，按公式（A.7）计算：

$$C_{plot} = \frac{[(AGB_s + BGB_s) \times \theta]}{A_c} = \frac{[(AGB_s + BGB_s) \times \theta]}{A_s \times \cos \alpha} \quad (A.7)$$

式中： C_{plot} ——样地灌木碳密度，以碳计，kg/m²；

AGB_s ——灌木地上生物量，kg；

BGB_s ——灌木地下生物量，kg；

θ ——灌木生物量碳转换系数，取 0.5；

A_c ——样地的投影面积，m²；

A_s ——调查时设置的坡面面积，m²，一般为 25m²；

α ——样方平均坡度，°。

样方灌木地上生物量按公式（A.8）计算：

$$AGB_s = \sum \sum [a_{ij} \times (D_{ij}^2 \times H_{ij})] \quad (A.8)$$

式中： AGB_s ——灌木地上生物量，kg；

a_{ij} ——利用标准株法获得的物种*i*植株*j*基径和株高与收割干重生物量之间的关系；

D_{ij} ——物种*i*植株*j*的基径，m；

H_{ij} ——物种*i*植株*j*的株高，m。

样方灌木地下生物量按公式（A.9）计算：

$$BGB_s = \sum b_i \times \sum b_j \times AGB_{ij} \quad (A.9)$$

式中： BGB_s ——灌木地下生物量，kg；

b_i, b_j ——利用标准株法获得的物种*i*植株*j*地下生物量与地上生物量总量之间的关系；

AGB_{ij} ——物种*i*植株*j*的地上生物量，kg。

A.3 草本植物碳储量

适用于森林、灌丛、草地、荒漠、湿地等生态系统中活体草本植物碳储量的实地测量。

参照 HJ 1168 进行样地样方设置。采用实测草本植物各部分碳密度，采用面积加权累积法估算碳储量，按公式（A.10）计算：

$$C_{Gr} = \sum_{i=1}^n \left[CD_{AB} + \int_{j=1}^d (CD_{BB})_j \right] \times Area_i \quad (A.10)$$

式中： C_{Gr} ——草本植物碳储量，kg；

CD_{AB} ——地上活体生物量碳密度，kg/m²；

CD_{BB} ——地下根系生物量碳密度，kg/m²；

$Area_i$ ——第*i*类草地的面积，m²；

i ——草地类型数量， $i=1, 2, 3, \dots$ ；

j ——0cm~100cm土层，包括0cm~5cm、0cm~10cm、10cm~20cm、20cm~30cm、30cm~50cm、50cm~70cm、70cm~100cm，共7层。

生物量碳密度按公式（A.11）计算：

$$CD_K = M \times f_c \quad (A.11)$$

式中： CD_K ——植被生物量碳密度，kg/m²。 K 代表 AB 或 BB ，分别指地上活体、地下根系；

M ——植被生物量，kg。参照 HJ 1168，采用收获法获得；

f_c ——植被生物量含碳率，%。用直接方法测定：对生物量实验样品进行粉碎法制样，用元素分析仪法测定样品含碳量，通过公式（样品含碳率=样品含碳量/样品干重×100%）计算样品含碳率。

A.4 枯死木碳储量

适用于森林、灌丛等生态系统中枯死木碳储量的实地测量。通过实地调查获取区域内枯死木腐烂等级、体积、密度等参数进而估算碳储量。

枯死木包括枯死立木和枯死倒木（直径≥5cm）两类，按照枯死木的形态、等级进行分类，根据不同腐烂等级（轻度、中度、重度）体积、密度以及相应的碳含量估算其碳储量。按公式（A.12）计算：

$$C_{DW} = C_{SDW} + C_{LDW} \\ = \sum_{j=1}^3 [V_{SDW_j} \times D_{SDW_j} \times CF_{SDW_j}] + \sum_{j=1}^3 [V_{LDW_j} \times D_{LDW_j} \times CF_{LDW_j}] \quad (A.12)$$

式中： C_{DW} ——枯死木碳储量，以碳计，kg；

C_{SDW} ——枯死立木碳储量，以碳计，kg；

C_{LDW} ——枯死倒木碳储量，以碳计，kg；

j ——腐烂等级， j 取值 1、2 和 3 分别表示轻度分解、中度分解和重度分解。判断标准为：砍刀不会陷入木材中（被弹开）的为轻度分解，砍刀部分会陷入木材中且已经有部分木材损失的为中度分解，砍刀陷入木材中、有更大范围的木材损失且木材非常易碎的为重度分解；

V_{SDW_j} ——腐烂等级为*j*的枯立木体积，m³；

V_{LDW_j} ——腐烂等级为*j*的枯倒木体积，m³；

D_{SDW_j} ——腐烂等级为*j*的枯立木密度，kg/m³；

D_{LDW_j} ——腐烂等级为 j 的枯倒木密度, kg/m^3 ;

CF_{SDW_j} ——腐烂等级为 j 的枯立木含碳量, 以碳计, kg/kg , 采用元素分析法测定;

CF_{LDW_j} ——腐烂等级为 j 的枯倒木含碳量, 以碳计, kg/kg , 采用元素分析法。

A.5 凋落物碳储量

通过实地调查获取区域内凋落物现存量、含碳量等参数进而估算碳储量。

采用收获法获得区域内凋落物干重及碳含量换算凋落物碳储量, 按公式 (A.13) 计算:

$$C_{Li} = L_i \times CF_{Li} \times 10^{-3} / (AP \times 10^{-4}) \quad (\text{A.13})$$

式中: C_{Li} ——凋落物碳储量, kg ;

L_i ——样方中凋落物现存量, 以干重计, kg ;

CF_{Li} ——凋落物的平均含碳量, 以碳计, kg/kg , 采用元素分析法测定;

AP ——测定凋落物的样方面积, m^2 。

A.6 土壤有机碳储量

森林、灌丛、草地、荒漠、湿地等生态系统中土壤有机碳储量按公式 (A.14) 和 (A.15) 计算:

$$C_{SOC} = \sum_{i=1}^n \left[\int_{j=1}^d (SOC D)_j \right] \times Area_i \quad (\text{A.14})$$

$$SOC D = \sum_{j=1}^d T_j \times BD_j \times SOC_j \times \left(\frac{1}{100} - C_j \right) \quad (\text{A.15})$$

式中: C_{SOC} ——土壤有机碳储量, 以碳计, kg ;

$SOC D$ ——0cm~100cm 土壤有机碳密度, kg/m^2 ;

$Area_i$ ——第 i 类生态系统的面积, m^2 ;

i ——生态系统类型数量, $i=1, 2, 3, \dots$;

j ——0cm~100cm 土层, 包括 0cm~5cm、0cm~10cm、10cm~20cm、20cm~30cm、30cm~50cm、50cm~70cm、70cm~100cm, 共 7 层;

T_j ——第 j 层土壤的厚度, cm ;

BD_j ——第 j 层土壤的土壤容重, g/m^3 ;

SOC_j ——第 j 层土壤的土壤有机碳含量, 以碳计, g/kg ;

C_j ——第 j 层土壤 > 2mm 砾石所占比例。

附 录 B
(规范性附录)
光能利用率模型参数确定方法

基于光能利用率模型的植被净初级生产力由植被吸收的光合有效辐射量 ($APAR$) 与植被光能利用率 (ϵ) 两个参数确定。

植被所吸收的光合有效辐射取决于太阳总辐射和植被对光合有效辐射吸收的比例, 按公式 (B.1) 计算:

$$APAR(x, t) = SOL(x, t) \times FPAR(x, t) \times 0.5 \quad (B.1)$$

式中: $APAR(x, t)$ ——像元 x 在 t 月份植被吸收的光合有效辐射, $MJ/(m^2 \cdot a)$;

$SOL(x, t)$ ——像元 x 在 t 月份的太阳辐射量, $MJ/(m^2 \cdot mo)$;

$FPAR(x, t)$ ——像元 x 在 t 月份植被层对入射光合有效辐射的吸收比例;

0.5——植被所能利用的太阳有效辐射 (波长 $0.4\mu m \sim 0.7\mu m$) 占太阳总辐射的比例。

光合有效辐射吸收比例与归一化植被指数 ($NDVI$) 和比值植被指数 (SR) 均有较好的线性关系, 按公式 (B.2) 计算:

$$FPAR(x, t) = \frac{(SR(x, t) - SR_{i, min})}{(SR_{i, max} - SR_{i, min})} \times (FPAR_{max} - FPAR_{min}) + FPAR_{min} \quad (B.2)$$

式中: $FPAR(x, t)$ ——像元 x 在 t 月份植被层对入射光合有效辐射的吸收比例;

$SR(x, t)$ ——像元 x 在 t 月份比值植被指数;

$SR_{i, max}$ ——为第 i 种植被类型 $NDVI$ 的 95% 下侧百分数;

$SR_{i, min}$ ——为第 i 种植被类型 $NDVI$ 的 5% 下侧百分数;

$FPAR_{min}$ ——取值为 0.001;

$FPAR_{max}$ ——取值为 0.95。

比值植被指数按公式 (B.3) 计算:

$$SR(x, t) = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{RED}} \quad (B.3)$$

式中: $SR(x, t)$ ——像元 x 在 t 月份的比值植被指数;

ρ_{NIR} ——植被在近红外波段 (波长 800nm) 的反射率, %;

ρ_{RED} ——植被在红光波段 (波长 680nm) 的反射率, %。

SR 按公式 (B.4) 计算:

$$SR(x, t) = \frac{1 + NDVI(x, t)}{1 - NDVI(x, t)} \quad (B.4)$$

式中: $SR(x, t)$ ——像元 x 在 t 月份的比值植被指数;

$NDVI(x, t)$ ——像元 x 在 t 月份的归一化植被指数。

光能利用率是植物把光合有效辐射转化为有机碳的效率, 其大小受植物的种类以及环境不同而有

所差异，按公式（B.5）计算：

$$\varepsilon(i, t) = T_{\varepsilon 1}(i, t) \times T_{\varepsilon 2}(i, t) \times W_{\varepsilon}(i, t) \times \varepsilon_{\max} \quad (\text{B.5})$$

式中： $\varepsilon(i, t)$ ——像元 x 在 t 月份的实际光能利用率，以碳计，g/MJ

$T_{\varepsilon 1}(i, t)$ ——像元 x 在 t 月份低温对光能利用率的胁迫系数；

$T_{\varepsilon 2}(i, t)$ ——像元 x 在 t 月份高温对光能利用率的胁迫系数；

$W_{\varepsilon}(i, t)$ ——像元 x 在 t 月份的水分胁迫影响系数；

$\varepsilon_{\max}$ ——理论上的最大光能利用率，以碳计，g/MJ。取 0.389g/MJ，或根据不同生态系统类型取值。

温度胁迫影响系数反映温度的变化对光合作用形成有机碳过程的影响，低温对光能利用率的胁迫系数按公式（B.6）计算：

$$T_{\varepsilon 1}(x, t) = 0.8 + 0.02 \times T_{\text{opt}}(x) - 0.0005 \times [T_{\text{opt}}(x)]^2 \quad (\text{B.6})$$

式中： $T_{\varepsilon 1}(i, t)$ ——像元 x 在 t 月份低温对光能利用率的胁迫系数；

$T_{\text{opt}}(x)$ ——区域内一年中NDVI值达到最大时当月的平均温度，℃。

高温对光能利用率的胁迫系数按公式（B.7）计算：

$$T_{\varepsilon 2}(x, t) = \frac{1.1814}{\{1 + \exp[0.2 \times (T_{\text{opt}}(x) - 10 - T(x, t))]\} \times \{1 + \exp[0.3 \times (-T_{\text{opt}}(x) - 10 + T(x, t))]\}} \quad (\text{B.7})$$

式中： $T_{\varepsilon 2}(i, t)$ ——像元 x 在 t 月份高温对光能利用率的胁迫系数；

$T(x, t)$ ——像元 x 在 t 月份的气温，℃。

水分胁迫影响系数按公式（B.8）计算：

$$W_{\varepsilon}(x, t) = 0.5 + 0.5 \times \frac{E(x, t)}{E_p(x, t)} \quad (\text{B.8})$$

式中： $E(x, t)$ ——像元 x 在 t 月份的实际蒸散量，mm；

$E_p(x, t)$ ——像元 x 在 t 月份的潜在蒸散量，mm。

附 录 C
(规范性附录)
光合作用生化机理模型参数确定方法

C.1 C3 植物光合作用模型

C3 植物叶片光合作用生物化学模型主要模拟光合作用的碳还原、光呼吸的碳氧化、光驱动的电子传递过程及其 NADPH 和 ATP 再生循环等过程。叶片净光合速率可表达为 (C.1):

$$A = \min\{W_c, W_j, W_p\} \left(1 - 0.5 \frac{P_o}{\tau P_c}\right) - R_d \quad (\text{C.1})$$

式中: A ——叶片净光合速率, 以二氧化碳计, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;

W_c ——受 RuBP 羧化酶/加氧酶 (Rubisco) 活性限制的二氧化碳同化速率, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;

W_j ——受 RuBP 再生限制的二氧化碳同化速率, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;

W_p ——光合产物传输速度限制的二氧化碳同化速率, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;

P_o ——叶片胞间氧气分压, Pa;

P_c ——叶片胞间二氧化碳分压, Pa;

τ ——Rubisco 羧化与氧化速率比值;

R_d ——光照下的叶片暗呼吸速率, 以二氧化碳计, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

其中, 受 RuBP 羧化酶/加氧酶 (Rubisco) 活性限制的二氧化碳同化速率 W_c 按式 (C.2) 计算:

$$W_c = \frac{V_c^{\max} P_c}{P_c + K_c \left(1 + \frac{P_o}{K_o}\right)} \quad (\text{C.2})$$

式中: W_c ——受 RuBP 羧化酶/加氧酶 (Rubisco) 活性限制的二氧化碳同化速率, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;

$V_c^{\max}$ ——最大羧化速率, 以二氧化碳计, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;

K_c ——Rubisco 羧化的米氏常数, Pa;

K_o ——Rubisco 氧化的米氏常数, Pa。

受 RUBP 再生限制的二氧化碳同化速率 W_j 按式 (C.3) 计算:

$$W_j = \frac{J P_c}{4 \left(P_c + \frac{P_o}{\tau}\right)} \quad (\text{C.3})$$

式中: W_j ——受 RuBP 再生限制的二氧化碳同化速率, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;

J ——电子传递速率, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

光合产物传输速度限制的二氧化碳同化速率 W_p 按式 (C.4) 计算:

$$W_p = 3U + \frac{0.5W_{\min}P_o}{\tau P_c} \quad (\text{C.4})$$

式中： W_p ——光合产物传输速度限制的二氧化碳同化速率， $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ；

U ——丙糖磷酸的利用率，以二氧化碳计， $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ；

$W_{\min}$ —— W_c 和 W_j 的最小值，以二氧化碳计， $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。

电子传递速率可表示为式 (C.5)：

$$J = \frac{\alpha I}{\sqrt{1 + \frac{\alpha^2 I^2}{J_{\max}^2}}} \quad (\text{C.5})$$

式中： J ——电子传递速率， $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$

α ——光量子效率， mol/mol ；

$J_{\max}$ ——光饱和时的电子传递速率， $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ；

$V_c^{\max}$ 、 $J_{\max}$ 和 R_d 随温度变化而变化，通常表示为 25℃时的速率与温度响应函数的乘积。

将上述光合模型与气孔模型进行耦合。气孔控制了大气二氧化碳扩散到胞间的过程，因此二氧化碳的供应影响着三种受限制的羧化速率 W_c 、 W_j 和 W_p ， A 按式 (C.6) 计算：

$$A = \frac{g_s}{160} (P_o - P_c) \quad (\text{C.6})$$

式中： A ——叶片净光合速率，以二氧化碳计， $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ；

g_s ——水汽的气孔导度， $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ；

P_c ——大气二氧化碳分压，Pa。

水汽的气孔导度按式 (C.7) 计算：

$$g_s = \frac{mR_H A}{P_c} + b \quad (\text{C.7})$$

式中： g_s ——水汽的气孔导度， $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ；

m, b ——经验常数， b 取值为 0.08；

R_H ——叶表面的相对湿度，%。

如果考虑土壤水分对气孔导度的影响，则按式 (C.8) 计算：

$$g_s = \left(\frac{mR_H A}{P_c} + b \right) f(w_s) \quad (\text{C.8})$$

式中： g_s ——水汽的气孔导度， $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ；

w_s ——土壤含水量， cm^3/cm^3 ；

$f(w_s)$ ——气孔导度的水分响应函数，按式 (C.9) 计算：

$$f(w_s) = \frac{s_1(w_s - s_0)}{w_s - 2s_0 + s_2} \quad (\text{C.9})$$

式中： $f(w_s)$ ——气孔导度的水分响应函数

s_0 ——气孔导度为零时的土壤含水量， cm^3/cm^3 ；

s_1 ——土壤水分超过 s_0 后气孔导度随着土壤水分增加的斜率；

s_2 ——随着土壤含水量增高气孔导度达到最大时的土壤含水量， cm^3/cm^3 。

根据 (C.1)、式 (C.6) 和式 (C.8) 计算气孔导度 g_s 、胞间二氧化碳分压 P_c 和二氧化碳同化速率 A 。

C.2 C4 植物光合作用模型

C4 植物叶片净光合速率主要受光、二氧化碳、Rubisco 固定二氧化碳的能力等因素限制，按式 (C.10) 计算：

$$A_n = \min\{J_i, J_c, J_e\} - R_d \quad (\text{C.10})$$

式中： A_n ——C4 植物叶片净光合速率，以二氧化碳计， $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ；

J_i ——维管束鞘中的二氧化碳分压高到足以抑制光呼吸的条件下由光决定的叶片光合速率，以二氧化碳计， $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ；

J_c ——在低二氧化碳浓度条件下二氧化碳限制的通量，以二氧化碳计， $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ；

J_e ——当 J_i 和 J_c 不受限制时受 Rubisco 固定二氧化碳能力控制的同化速率，以二氧化碳计， $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ；

R_d ——叶片呼吸速率，以二氧化碳计， $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

J_i 按式 (C.11) 计算：

$$J_i = a\alpha_r f Q_p \quad (\text{C.11})$$

式中： J_i ——维管束鞘中的二氧化碳分压高到足以抑制光呼吸的条件下由光决定的叶片光合速率，以二氧化碳计， $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ；

a ——叶片吸收比；

α_r ——量子产额， mol/mol ；

f ——吸收量子比例；

Q_p ——入射的量子通量密度， $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

$\alpha_r f$ 项可合并为一个常数，其理论值为 $0.067 \text{mol}/\text{mol}$ 。

在低二氧化碳浓度下， J_c 按式 (C.12) 计算：

$$J_c = \frac{P_i \left(k_p - \frac{L}{P_i} \right)}{P} \quad (\text{C.12})$$

式中： J_c ——在低二氧化碳浓度条件下二氧化碳限制的通量，以二氧化碳计， $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ；

P_i ——胞间二氧化碳分压， Pa ；

k_p ——与 P_i 有关的 PEP 羧化酶的准一级反应速率常数， Pa ；

L ——PEP 羧化酶与底物结合的特征常数， Pa ；

P ——大气压强， Pa ，取值为 10^5Pa 。

J_e 在很大程度上与二氧化碳和光无关。维管束鞘叶绿体中高二氧化碳浓度对 Rubisco 来说近似于饱和, 这种情况下的 J_e 按式 (C.13) 计算:

$$J_e = V_{max} \quad (C.13)$$

式中, J_e ——当 J_i 和 J_c 不受限制时受 Rubisco 固定二氧化碳能力控制的同化速率, 以二氧化碳计, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;

V_{max} ——底物饱和的 Rubisco 能力, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。

采用嵌套的两个二次方程来表示光合速率受一种限制到另一种限制的转换, 将 C4 植物叶片总光合表示为 Q_p 、 P_i 以及叶温函数的两个二次方程 (C.14) 和 (C.15):

$$\theta M^2 - M(V_T + \alpha Q_p) + V_T \alpha Q_p = 0 \quad (C.14)$$

$$\beta A^2 - A \left(M + \frac{k_T P_i}{P} \right) + \frac{M k_T P_i}{P} = 0 \quad (C.15)$$

式中: θ ——曲率参数, 表示通量在受光限制和 V_T 限制之间的逐渐转变, 取值为 0.83;

M ——由 Rubisco 和光限制的通量, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 取值为 $3\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;

V_T ——由温度决定的底物饱和时的 Rubisco 能力, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;

α ——光量子效率, mol/mol , 取值为 $0.04 \text{ mol}/\text{mol}$;

A ——总光合速率, 以二氧化碳计, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;

$\frac{k_T P_i}{P}$ —— M 和二氧化碳限制的通量对总速率的限制项, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; 其中 k_T 是与 P_i 有关的由温度决定的准一级反应速率常数, $\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;

β —— M 和二氧化碳限制通量之间协同限制的程度, 取值为 0.93。

V_T 温度响应函数表示为:

$$V_T = \frac{V_{max} Q_{10}^{\frac{T_l-25}{10}}}{(1 + e^{0.3(13-T_l)})(1 + e^{0.3(T_l-36)})} \quad (C.16)$$

$$R_T = \frac{R_d Q_{10}^{\frac{T_l-25}{10}}}{1 + e^{1.3(T_l-55)}} \quad (C.17)$$

$$k_T = k Q_{10}^{\frac{T_l-25}{10}} \quad (C.18)$$

式中, V_T ——由温度决定的底物饱和时的 Rubisco 能力, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;

V_{max} ——底物饱和的 Rubisco 能力, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 取值为 $39 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;

Q_{10} ——当叶片温度增加 10°C 时参数值增加的比例;

T_l ——叶片温度, $^\circ\text{C}$;

R_T ——温度修正后的叶片呼吸速率，以二氧化碳计， $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ；

k_T ——与 P_i 有关的由温度决定的准一级反应速率常数， $\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ；

R_d ——叶片呼吸速率，以二氧化碳计， $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ，取值为 $0.8\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ；

k ——准一级反应速率常数， $\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ，取值为 $0.7 \text{ mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。

根据 (C.13)、式 (C.6) 和式 (C.8) 计算 g_s 、 A_n 和 P_i 。

C.3 植物自养呼吸

植物自养呼吸包括用于新组织合成的生长呼吸和已合成的活组织在维持功能状态过程中的维持呼吸，按式 (C.19) 计算：

$$R_a = R_m + R_g \quad (\text{C.19})$$

式中， R_a ——植物自养呼吸，以二氧化碳计， $\mu\text{mol}/\text{h}$ ；

R_g ——植物用于新组织合成的生长呼吸，以二氧化碳计， $\mu\text{mol}/\text{h}$ ；

R_m ——植物已合成的活组织在维持功能状态过程中的维持呼吸，以二氧化碳计， $\mu\text{mol}/\text{h}$ 。

植物体活组织（叶、茎、根等）的维持呼吸通常为生物量（干重）和温度的函数，按式 (C.20) 计算：

$$R_m = k_m m_w f(T) \quad (\text{C.20})$$

式中： R_m ——植物已合成的活组织在维持功能状态过程中的维持呼吸，以二氧化碳计， $\mu\text{mol}/\text{h}$ ；

k_m ——维持呼吸系数，以二氧化碳计， $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{h})$ ；

m_w ——器官生物量，g；

$f(T)$ ——温度响应函数。

植物生长呼吸通常根据光合产物去除维持呼吸后剩余量的固定比例计算，具体见式 (C.21)：

$$R_g = f(\text{GPP} - R_m) \quad (\text{C.21})$$

式中： R_g ——植物用于新组织合成的生长呼吸，以二氧化碳计， $\mu\text{mol}/\text{h}$ ；

f ——植物总初级生产力去除维持呼吸后剩余量的固定比例；

GPP ——植物总初级生产力，以二氧化碳计， $\mu\text{mol}/\text{h}$ ；

R_m ——植物已合成的活组织在维持功能状态过程中的维持呼吸，以二氧化碳计， $\mu\text{mol}/\text{h}$ 。

$$R_g = f(\text{GPP} - R_m) \quad (\text{C.22})$$

附 录 D
(资料性附录)
涡度相关测定方法

基于涡度协方差测量利用涡动协方差法测定的地表与大气之间的二氧化碳净交换量（即净生态系统二氧化碳交换量，NEE）评估站点或区域尺度生态系统的固碳功能。对多个观测站点测定的 NEE 数据进行尺度上推，得到区域尺度生态系统的固碳功能。当生态系统未受人类活动干扰时，NEE 的绝对值与 NEP 相等。具体测定方法：

a) 涡动协方差观测

基于微气象原理，当满足准平稳条件、下垫面平坦均匀、湍流充分发展的条件下，利用涡动协方差系统直接原位测量地表与大气之间的二氧化碳净交换量。通过在观测塔上架设高频超声风速仪和红外气体分析仪，分别测定大气垂直风速和二氧化碳浓度的瞬时脉动量，进而计算出净生态系统二氧化碳交换量。观测方法参照 GB/T 33696 执行。

b) 数据质量控制和处理

对涡动协方差系统观测的原始 10Hz 数据进行野点值剔除、延迟时间校正、坐标旋转、频率响应修正、超声虚温修正和密度修正等处理，以及大气平稳性和湍流相似性特征检验，进而计算得到 30 分钟或小时尺度 NEE 数据。质量控制和计算方法参照 GB/T 33696 执行。

对 30 分钟或小时尺度 NEE 数据进行降水同期数据剔除、阈值剔除、异常值剔除以及 u^* 校正等处理，进而采用平均昼夜变化法、查表法和非线性回归法等方法对缺失数据进行插补，得到时间连续的 NEE 数据。具体方法参照《陆地生态系统通量观测的原理与方法（第二版）》执行。

c) 数据尺度上推

采用统计方法或机器学习算法，结合区域的气象、遥感数据，对多个观测站点测定的 NEE 数据进行尺度上推，得到区域尺度生态系统的固碳功能。