



中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX

区域生态调查方法

Methodological for regional ecosystem survey

点击此处添加与国际标准一致性程度的标识

征求意见稿

(本稿完成日期：2023 年 1 月)

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前 言	1
1 适用范围	2
2 规范性引用文件	2
3 术语和定义	3
4 基本原则	4
5 基本流程	4
6 调查指标及方法	5
附 录 A（规范性）区域生态系统调查的主要技术	9
附 录 B（资料性）生态系统结构与格局指标调查技术方法	10
附 录 C（资料性）生态系统过程与功能指标调查技术方法	17

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。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由全国环境管理标准化技术委员会（SAC/TC 207）提出并归口。

本文件起草单位：生态环境部卫星环境应用中心、中国科学院生态环境研究中心、中国标准化研究院、中国林业科学研究院、中国科学院地理科学与资源研究所、山东大学、北京师范大学。

本文件起草人：

区域生态调查方法

1 适用范围

本文件提供了区域生态调查的内容和流程、指标体系、技术方法等。

本文件主要适用于全国及省级行政区域及其他自然地理区域的生态调查。

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 17296 中国土壤分类与代码

GB/T 20481 气象干旱等级

GB/T 30363 森林植被状况监测技术规范

GB/T 33027 森林生态系统长期定位观测方法

GB/T 34815 植被生态质量气象评价指数

GB/T 35221 地面气象观测规范 总则

GB/T 35226 地面气象观测规范 空气温度和湿度

GB/T 35227 地面气象观测规范 方向和风速

GB/T 35228 地面气象观测规范 降水量

GB/T 35231 地面气象观测规范 辐射

GB/T 38590 森林资源连续清查技术规程

GB/T 41280 卫星遥感影像植被覆盖度产品规范

GB/T 41534 地表温度遥感产品真实性检验

GB/T 50138 水位观测标准

GB 50179 河流流量测验规范

HJ 1166 全国生态状况调查评估技术规范——生态系统遥感解译与野外核查

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 1169 全国生态状况调查评估技术规范——湿地生态系统野外观测

HJ 1170 全国生态状况调查评估技术规范——荒漠生态系统野外观测

HJ 710.1 生物多样性观测技术导则 陆生维管植物

HJ 710.12 生物多样性观测技术导则 水生维管植物

LY/T 1225 森林土壤颗粒组成（机械组成）的测定

SL 759 径流实验观测规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

区域生态系统 Regional ecosystem

特定空间范围内生物与环境通过物质循环、能量流动和信息传递构成的整体，主要包括森林、草地、荒漠、湿地等生态系统。

3.2

生态系统结构与格局 Ecosystem structure and pattern

各类不同生态系统的组成成分、数量特征与空间分布状况。

3.3

生态系统过程与功能 Ecosystem processes and functions

生态系统物质循环和能量传递过程及体现出的各种功效和作用。

3.4

遥感调查 Remote sensing investigation

利用搭载在卫星、无人机等高空平台的传感器获取生态系统反射、辐射信息，以此为基础研究各类生态系统结构与格局、过程与功能等特征。

3.5

地面调查 Ground investigation

根据统计抽样方法，利用地面定位和观测仪器获取反映生态系统格局与结构、过程与功能等方面的参数和信息。

4 基本原则

4.1 适用性原则。应充分考虑调查区域的生态系统特征和自然地理环境特点，根据区域生态系统调查的主要目标、内容和任务，选择合理的生态系统结构与格局指标、生态系统过程与功能指标。

4.2 可操作性原则。应综合考虑调查区域的生态系统特点和空间范围大小，客观分析传统地面调查方法、遥感调查方法的可操作性，选择适宜的调查技术方法，保障区域生态系统调查任务的可实施。

4.3 科学性原则。无论采用传统的地面调查方法还是采用遥感调查方法，应科学规范的开展区域生态系统调查的前期准备、数据（样品）采集、数据（样品）分析整理等，确保区域生态系统调查数据的准确性。

5 基本流程

区域生态系统调查首先综合考虑调查的区域地理环境概况及目标内容和任务、选择生态系统调查指标、确定调查技术（见附录A）和具体方法等流程，具体如图1。

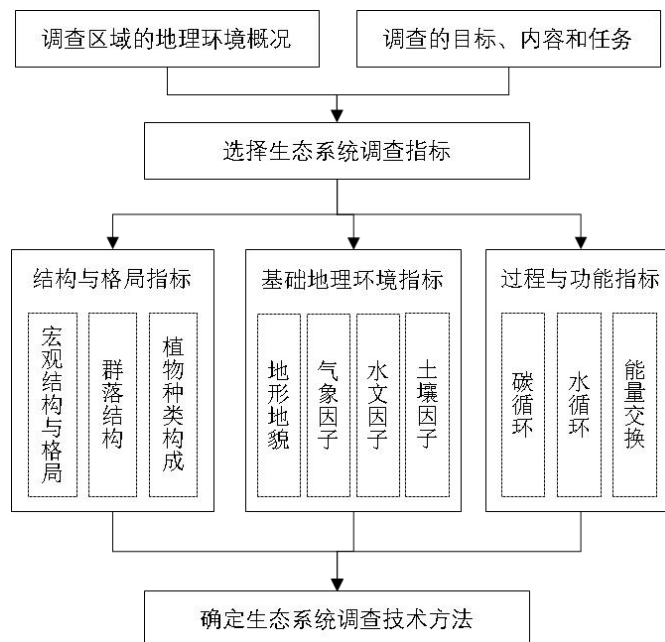


图1 区域生态系统调查流程

6 调查指标及方法

6.1 生态系统结构与格局指标及方法

生态系统结构与格局指标共包括宏观结构与格局、群落结构、植物种类构成3个一级指标,生态系统类型等15个二级指标,具体见表1。每项指标的具体调查技术方法按附录B.1~B.3的有关方法进行。

表 1 生态系统结构与格局指标

一级指标	二级指标	指标含义
宏观结构与格局	生态系统类型	在自然界一定的空间内,生物与环境之间通过物质循环和能量流动而构成的统一整体,主要包括森林、草地、湿地、荒漠等生态系统类型。
	生态系统面积	生态系统所占二维空间大小,通常指平面空间,单位为平方公里。
	生态系统面积比例	某类或某几类生态系统面积占区域总面积的百分比。
	植被覆盖度	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。
	叶面积指数	单位土地面积上植物叶片总面积与土地面积的比值。
群落结构	平均盖度	全部植被地上冠层部分垂直投影面积占单位面积的百分比平均值。
	平均高度	植被群落中,植被从基部地面到植物茎叶最高处垂直高度的平均值。
	平均冠幅	乔木冠层南北和东西方向宽度的平均值。
	平均胸径	乔木主干离地表 1.3m 处的直径的加权平均值,仅计入胸径大于 5cm 的乔木。
	株密度	单位面积内全部或者某种植物的个体数量。
	丰富度	植被群落中所含物种数目的多少。
	起源	植被群落在其最初发育时所依靠的媒介方式,主要分为人工或天然。

一级指标	二级指标	指标含义
植物种类构成	植物区系构成	一个地区或某个植被类型中所有物种的科、属和区系成分的组成情况。
	优势植物种构成	植物群落中，个体数量、覆盖度、生物量等均占优势的物种所占比例。
	水生植物类型	根据植物对水分适应类型的不同进行生活型分类，分为挺水植物、浮水植物、沉水植物。

6.2 生态系统过程与功能指标及方法

生态系统过程与功能指标包含基础地理环境指标、生态系统过程与功能指标，具体见表2和表3。

a) 基础地理环境指标共包括地形地貌、气象因子、水文因子、土壤因子4个一级指标，经纬度等22个二级指标，具体见表2。每项指标的具体调查技术方法按附录C.1的有关方法进行。

b) 生态系统过程与功能指标共包括碳循环过程与功能、水循环过程与功能、能量交换过程与功能3个一级指标，总初级生产力等21个二级指标，具体见表3。指每项指标的具体调查技术方法按附录C.2~C.4的有关方法进行。

表 2 基础地理环境指标

一级指标	二级指标	指标含义
地形地貌	经纬度	地理位置坐标信息。
	海拔高度	与海平面的高度差。
	坡度	地表陡缓的程度。
	坡长	地面上一点沿水流方向到其流向起点间的地面距离。
	坡向	坡面法线在水平面上的投影的方向。
	地表粗糙度	表示地面凹凸不平的程度。
气象因子	降水量	从天空降落到地面上的雨水，未经蒸发、渗透、流失而在水面上积聚的水层深度。
	气温	近地面空气的温度。
	日照时数	表示太阳中心从出现在一地的东方地平线到进入西方地平线，其直射光线在无地物、云、雾等任何遮蔽的条件下，照射到地面所经历的时间。
	总辐射	水平地表所接收到的太阳直接辐射和天空辐射之和。

一级指标	二级指标	指标含义
	风速/风向	风的速度和方向。
水文因子	流量	在某一时段内通过某一过水断面的水量。将瞬时流量按时间平均，可求得某时段的平均流量。
	流速	单位时间里水流前进的距离。
	含沙量	单位体积水体所含干沙的质量。
	水位	自由水面相对于黄海基面的高程。
	积水深度	水面距河流、湖泊等湿地水体底部的距离。
	淹水历时	湿地生态系统从开始积水到排完水的过程。
	结冰期	水体从结冰开始到结束的过程。
土壤因子	土壤类型	根据土壤性状、质与量的差异，划分土壤各类型。
	土壤质地	土壤中不同大小直径的矿物颗粒的组合状况。
	土壤可蚀性因子	土壤的粗砂、粉砂、黏粒和有机碳的百分含量。
	土壤厚度	土壤母质层以上到土壤表面的垂直深度。

表 3 生态系统过程与功能指标

一级指标	二级指标	指标说明
碳循环过程与功能	总初级生产力	单位面积、单位时间群落（或生态系统）中，植物利用太阳能固定的能量或生产的有机质的量。该指标决定了进入陆地生态系统的初始能量与物质总量。
	净初级生产力	从固定的总能量或产生的有机质总量中减去植物呼吸所消耗的量，直接反映了植被群落在自然环境条件下的生产能力，表征陆地生态系统的质量状况。
	净生态系统生产力	表征陆地与大气之间的净碳通量或碳储量的变化速率，一般是净初级生产力中再减去异养生物（土壤）的呼吸作用所消耗光合产物之后的剩余部分。
	植被地上生物量	某一时刻，单位面积植被地上部分累积的物质总量。
	植被根冠比	植物地下部分与地上部分的鲜重或干重的比值。
	植被碳密度	单位面积植被中的碳素存留量。
	植被释氧量	植被利用光能同化二氧化碳和水制造有机物质的同时释放的氧气量。
	土壤呼吸	土壤中微生物、根系、动物的呼吸作用释放的二氧化碳总量。
	土壤碳储量	一定深度内（通常为 1m），单位面积矿质土和有机土（包括

一级指标	二级指标	指标说明
		泥炭土) 中的有机碳素存留量。
	土壤有机碳密度	单位面积、单位时间群落 (或生态系统) 中, 植物利用太阳能固定的能量或生产的有机质的量。该指标决定了进入陆地生态系统的初始能量与物质总量。
水循环过程与功能	潜在蒸散发量	地表在一定气象条件下可达到的最大蒸发蒸腾量。
	实际蒸散发量	特定区域天然情况下的实际总蒸散发量, 又称流域蒸发散量, 是地表水体蒸发散量、土壤蒸发散量和植物蒸发散量之和。
	地表径流量	又称地面径流量, 一定区域内降水或融雪强度超过蒸散发、截留和下渗强度, 暂留于地表向低处流动, 形成地表径流的水量。
	冠层截留量	叶片、枝干等植物地上生理器官对落入其内水分的截留容纳数值。
	凋落物最大持水量	凋落物含水量达到饱和时的持水量, 一般情况下为该凋落物浸水 24 小时后的持水量。
	凋落物最大持水率	凋落物含水量达到饱和时的持水率, 一般情况下为该凋落物浸水 24 小时后的持水率。
	土壤湿度	土壤湿度指土壤的湿润程度, 与土壤的含水量成正比。
	土壤孔隙度	土壤孔隙容积占土体容积的百分比。
能量交换过程与功能	地表反照率	地表总反射辐射通量与总入射辐射通量之比。
	地表比辐射率	又称发射率, 是指地表辐射出射度与同温度下的黑体辐射出射度比值。
	地表温度	地球表面与空气交界处的温度。
	植被光合有效辐射吸收比率	植被冠层吸收的光合有效辐射占总光合有效辐射的比值。

附录 A

(规范性)

区域生态系统调查的主要技术

A.1 遥感调查

遥感调查主要指利用卫星和无人机等技术手段,获取区域生态系统调查指标。遥感技术主要用于直接或间接获取宏观层面和地表以上的各调查指标。当区域尺度较大时,优先选择卫星遥感技术开展调查;当区域尺度较小时,优先选取无人机遥感技术开展调查。当遥感技术获取的指标与地面调查不符时,应以地面调查结果为准。

A.2 地面调查

地面调查主要指利用样地选择和样方布设等方式,对森林、草地、湿地和荒漠生态系统开展调查。地面调查主要用于直接获取群落层面和地表以下的各调查指标。样地选择和样方布设参照HJ 1167、HJ 116、HJ 1169和HJ 1170相关要求执行。样地基础信息表见表A.1。

表 A.1 样地基础信息表

样地号: _____ 样方号: _____ 日期: _____

地理位置名称		经纬度	
海拔高度/m		坡度/(°)	
坡向/(°)		坡长/m	
土壤厚度/m		土壤粒度	粗砂__%、粉砂__%、黏粒__% 有机碳__%
土壤类型		土壤质地	

注 1: 经纬度: 采用十进制度填写, 至少保留 6 位小数。

注 2: 土壤质地分别为砂土、壤土(砂壤土、轻壤土、中壤土、重壤土)和粘土。

注 3: 其他按照“附录 C 生态系统过程与功能指标调查技术方法”中的观测值填写。

A.3 资料收集

资料收集主要指利用统计年鉴、科技文献等获取区域生态系统调查指标。资料收集主要用于获取基础地理环境类指标, 也可作为遥感技术和地面调查手段的辅助方式。

附录 B

(资料性)

生态系统结构与格局指标调查技术方法

B.1 宏观结构与格局

B.1.1 生态系统类型

生态系统类型反映了区域内生态系统成分。该指标一般采用遥感调查方法获取，主要包括生态系统遥感解译和野外核查等流程，具体依据 HJ 1166 的相关要求执行。

B.1.2 生态系统面积

生态系统面积反映了区域内各生态系统的数量特征。该指标一般采用遥感调查方法获取生态系统类型数据信息，然后利用空间统计方法得到各类生态系统面积。

B.1.3 生态系统面积比例

生态系统面积比例反映各生态系统面积占区域整体的数量特征。该指标一般在生态系统类型和生态系统面积指标的基础上，通过数学运算得到，计算方法见式 (B.1)：

$$P_i = \frac{S_i}{TS} \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

式中：

P_i ——第 i 类生态系统的面积比例；

S_i ——第 i 类生态系统的面积，单位为平方公里[km^2]；

TS ——区域总面积，单位为平方公里[km^2]。

B.1.4 植被覆盖度

植被覆盖度量化了植被的茂密程度，反映了植被的生长态势。本标准的植被覆盖度包含区域内森林植被的郁闭度和灌草植被的覆盖度。该指标主要采用遥感调查和地面调查方法获取，一般采用遥感调查方法，在较小尺度调查中可采用地面调查方法。

a) 遥感调查法

常用的方法是采用像元二分模型，利用遥感获取的植被指数 (NDVI) 计算获取植被覆盖度。像元二分模型是指假定像元由植被和非植被两部分构成，光谱信息为这两个组分的线性组合。通过模型计算，获得的植被覆盖所占像元比例即为该像元的植被覆盖度，计算方法见式 (B.2)：

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

式中：

FVC ——像元植被覆盖度；

$NDVI$ ——混合像元的 $NDVI$ 值；

$NDVI_{soil}$ ——纯裸土覆盖像元的 $NDVI$ 值；

$NDVI_{veg}$ ——纯植被覆盖像元的 $NDVI$ 值。

由于受土壤、植被类型等因素的影响，目前 $NDVI_{soil}$ 和 $NDVI_{veg}$ 主要通过对图像的统计分析确定，例如直接将图像中 $NDVI$ 的最大值和最小值分别作为纯植被覆盖和纯裸土覆盖的 $NDVI$ 值。

b) 地面调查法

采用带有“鱼镜头”相机观测获得，森林和灌草调查方法有所区别：

1) 森林冠层郁闭度的地面调查

在森林生态系统样方内尽量选取同质植物中心位置作为采样点，用鱼镜头垂直向上拍摄，利用 CAN-EYE 软件对鱼眼照片进行分析，从照片中计算天空空隙率获得实测冠层郁闭度。每个样方内布设 5~6 个采样点，同一个采样点至少 2 次重复拍摄，样方的冠层郁闭度以多个采样点的平均值为准。

2) 灌草植被覆盖度的地面调查

在灌草生态系统样方内尽量选取同质植物中心位置作为采样点，用鱼镜头垂直向下拍摄，利用 CAN-EYE 软件对鱼眼照片进行分析，从照片中计算绿色像素的比例获得实测植被覆盖度。每个样方内布设 2~6 个采样点，同一个采样点至少 2 次重复拍摄，样方的植被覆盖度以多个采样点的平均值为准。

B.1.5 叶面积指数

叶面积指数反映区域生态系统中单位面积上的叶面积大小，是模拟陆地生态系统、水热循环和生物地球化学循环的重要参数。该指标主要采用遥感调查和地面调查方法获取，一般采用遥感调查方法，在较小尺度调查中可采用地面调查方法。

a) 遥感调查法

目前基于光学遥感数据获取叶面积指数的方法主要包括两类，一类是统计方法，常用的是建立叶面积指数与植被指数之间经验或半经验关系；一类是基于辐射传输模型的遥感反演方法。

1) 统计法

经验模型法是常用的统计方法，该方法是用植被指数估算叶面积指数，一般过程是建立植被指数和叶面积指数的经验关系，并使用观测数据进行拟合，再使用拟合好的模型估算叶面积指数。

2) 模型法

冠层模型通常可划分为四类：参数模型、几何光学模型、混合介质模型和计算机模拟模型。这些模型已在冠层形态和光学特征估算中得到广泛应用，目前基于冠层模型估算叶面积指数常采用反演优化算法、神经网络技术、遗传算法、贝叶斯网络算法和查找表方法等，可根据评估区域和所具备的实际条件选择合适的模型和方法估算叶面积指数。

b) 地面调查法

主要采用植物冠层分析仪完成。植物冠层分析仪不受光线条件限制，可测量不同大小的冠层，调查方法对于森林、灌草等不同类型植被均适用。

在野外进行观测时，首先在植物冠层分析仪上设置植物的种类和测量的位置信息，把仪器的传感器放置在植被上方位置测量 1 次，然后把仪器传感器放置在植被下方位置测量 4 次。一般重复测量 2 次后，仪器自动计算最终的叶面积指数测量结果。

B.2 群落结构

B.2.1 平均盖度

平均盖度用于反映群落内植被整体覆盖状况。该指标主要采用地面调查和遥感调查方法获取，一般采用地面调查方法，在较大尺度调查中可采用遥感调查方法。

a) 地面调查方法

参考 GB/T 38590，采用对角线截距抽样或目测方法分别调查样地内乔木植物的郁闭度、灌木植物的覆盖度、草本植物的覆盖度，按百分比记载，精确到 5%。

根据乔木郁闭度与灌木和草本覆盖度的重叠情况综合确定植被群落总覆盖度，按百分比记载，精确到 5%。

b) 遥感调查方法

参考 GB/T 41280，可采用经验模型法、半经验模型法、或物理模型法估算植被覆盖度。经验模型法是通过将遥感数据的某一波段、波段组合反射率或遥感植被指数与实际测量的植被覆盖度进行回归，建立统计估算模型，并将模型推广到更大尺度上的植被覆盖度估算。一般采用归一化差值植被指数（NDVI）作为经验模型自变量。半经验模型法基本原理是图像中的一个像元实际上由多个组分构成，而每个组分对传感器观测到的信息都有贡献，常用方法是混合像元分解模型，应用最广泛的是线性混合分解模型。在众多线性模型中，像元二分模型形式简单、参数较少、应用最为广泛。

再采用最大值合成法、限定条件下的最值合成法等将单日植被覆盖度合成为任意时间范

围的多日合成植被覆盖度。

B.2.2 平均高度

平均高度用于反映群落内植被垂直结构特征。该指标主要采用地面调查和遥感调查方法，一般采用地面调查方法获取，在较大尺度调查中可采用遥感调查方法。

a) 地面调查法

参考 GB/T 38590，采用目测结合实测方法分别调查灌木平均高、草本平均高，以米为单位，记载到小数点后一位。乔木优势树种中，根据平均胸径大小选择 3~5 株平均样木，用测高仪器或其他测量工具测定树高，采用算数平均法计算平均树高，以米为单位，记载到小数点后一位。对于竹林，调查平均竹枝下高。

实测法采用测高仪，先对树木根部进行测量，再用数码取景器的横丝照准树木顶端，通过倾角实时计算高度。

b) 遥感调查法

一般利用无人机和地基激光雷达，基于摄影测量技术获取的多视角图像集来估计相机位姿并重建场景结构，利用图像特征匹配算法，从多视角照片中提取重叠区域的三维地形数据，进而开展高时空分辨率植被高度观测，作为从样方尺度到区域尺度之间的补充。

利用星载激光雷达数据和高光谱遥感数据，可实现大范围区域的植被平均高度制图。

B.2.3 平均冠幅

平均冠幅用于反映群落内植被顶层水平结构特征。该指标主要采用地面调查和遥感调查方法获取，一般采用地面调查方法，在较大尺度调查中可采用遥感调查方法。

a) 地面调查法

首先，通过正午阳光投影大概测出东西方向宽度和南北方向宽度并求取平均值，其次，通过垂直投射原理，将卷尺下拉，测出东西方向宽度和南北方向宽度的平均值。

对于幼苗，可直接使用皮尺记录南北、东西及其他方向的宽度并记录数值，求平均值所得数据即为苗木的冠幅。

b) 遥感调查法

平均冠幅遥感调查利用高空间分辨率影像或无人机遥感图像，采用边缘检测算法、或分水岭分割算法、或实例分割深度学习算法，分割单株树冠，提取东西冠幅、南北冠幅、树冠面积等，再利用空间统计学半方差方法，得到区域森林平均冠幅。

B.2.4 平均胸径

平均胸径是反映群落内树木的生物量的重要参数之一。该指标主要采用地面调查和遥感调查方法获取，一般采用地面调查方法，在较大尺度调查中可采用遥感调查方法。

a) 地面调查法

乔木同龄林根据优势树种的每木检尺确定胸径，采用平方平均法计算平均胸径，以厘米为单位，记载到小数点后 1 位。

乔木异龄林利用占总断面积或蓄积 65%或总株数 35%的较大径级乔木计算平均胸径。

竹林调查平均胸径，采用 3 株平均竹的平方平均值。

平均胸径反映森林林木粗度，是林木胸高断面积的平均水平，根据上述调查结果，计算出样地内全部林木断面积的总和与平均断面积，再求出与平均断面积相对应的直径作为样地平均直径。

b) 遥感调查法

利用地面调查得到的冠幅、树冠面积与平均胸径建立胸径预测模型，其中 80%样本树作为拟合样本树，拟合出冠幅-树冠面积-胸径的多元回归模型，其余 20%样本树作为验证。通过附录 B.2.3 获得单株冠幅与树冠面积的基础上，结合胸径预测模型，可获得区域森林生态系统的平均胸径信息。

B.2.5 株密度

株密度直接反映了群落植被平均占有的营养面积和空间的大小。该指标主要采用地面调查和遥感调查方法获取，一般采用地面调查方法，在较大尺度调查中可采用遥感调查方法。

a) 地面调查法

主要根据不同植被特征，设置样方采用计数法获取。

1) 乔木株密度：设置 30m×30m 样方，按照主要乔木树种不同径阶调查样地的乔木株数。

2) 竹林株数调查：设置 10m×10m 代表性样方，或者选择 2~3 个典型竹丛，调查竹株数，再推算样地株数。

3) 灌木株数调查：设置 4m×4m 样方，按照主要灌木种调查灌木（含高度小于 2m 的幼树）的株数。

4) 草本株数调查：设置 1m×1m 样方，按照主要草本植物种调查草本植物的株数。

b) 遥感调查法

通过附录 B.2.3 获得单木树冠信息的基础上，通过计数法可获得区域森林生态系统的株密度信息。

B.2.6 丰富度

丰富度用于反映群落内的植物物种丰富情况。该指标主要采用地面调查和遥感调查方法

获取，一般采用地面调查方法，在较大尺度调查中可采用遥感调查方法。

a) 地面调查法

采用样线法和样方法等实地调查辅以资料检索，调查植物的种类、多度、生境特点，国家和省级重点保护野生植物、IUCN 红皮书附录植物以及省级特有或主要集中在某地理分布区的植物种类、数量、分布特点和生境信息等。

b) 遥感调查法

可利用海量的地面调查丰富度信息，建立丰富度与生态系统类型、植被指数、气候因子的相关关系，结合高度、盖度等植被三维结构信息，结合近地面无人机、卫星遥感多源数据，开展丰富度遥感调查。首先，基于单木分割数据和高光谱数据，提取单木形态与功能性状，即林冠垂直、水平结构参数和植被指数。然后，采用基于移动窗口法分析在生态系统尺度（30m×30m）林冠丰富度与株密度的关系，基于冠幅、株密度得到丰富度空间分布信息。

B.2.7 起源

起源反映群落内植被的天然特征和程度，一般采用资料收集方法获取。

a) 对于乔木林、灌木林、竹林，调查确定起源为人工林或天然林。

b) 对于草地，调查确定起源为天然草原或人工草地。

B.3 植物种类构成

B.3.1 植物区系构成

植物区系构成用于反映区域内植物组成，是认识区域生态系统特征的基础指标。该指标主要采用地面调查和资料收集方法获取。

a) 地面调查法

采用典型抽样法、核实法、系统抽样法开展植物种类分层调查。

b) 资料收集法

依据《中国植物志》等专著与文献，确定植物种类及其县级分布信息。同时，结合野外调查数据、中国数字植物标本馆（CVH, <http://www.cvh.org.cn/>）、国家标本资源共享平台（NSII）、中国植物物种信息数据库（<http://db.kib.ac.cn/eflora>）等相关标本补充物种分布信息。整合的物种分布信息数据包括物种的科名、属名、种名、分布县和分布区类型。按照《中国植被》中的植被分类系统确定到群系一级。列出调查区域的植被型组、植被型、植被亚型、群系组和群系。进行科、属、种的统计，分析调查区域植物的科（属）组成、区系成分及资源类型。

B.3.2 优势植物种构成

优势植物种构成能够反映区域生态系统内占优势的植物类型，该指标主要采用地面调查和资料收集方法获取。

a) 地面调查法

采用典型抽样法、核实法、系统抽样法开展植物群落优势种（或建群种、或标志种、或特征种）的地面调查，调查、鉴别和划分优势植物种类型，并分析掌握其分布规律。具体参照 GB/T 38590、GB/T 30363。

b) 统计分析法

优势植物种构成常用优势植物种构成系数来表征，即某一优势植物种的生物量或株数在植物群落总生物量或总株数中所占的比重，一般可用十分法表示。植物群落中，各优势植物构成系数之和等于 10。由优势植物种名称及相应的构成系数写为构成式。

B.3.3 水生植物类型

水生植物类型能够反映湿地生态系统的植物特点。该指标主要采用地面调查和资料收集方法获取。

a) 地面调查法

通过系统抽样与典型抽样相结合的方法布设调查样地，沿样地内对角线开展野外调查，将调查区域内所有样地植物名录进行整合。调查样地覆盖调查区域所有主要植被类型和湿地类型，湿地调查样地垂直于湿地岸带，覆盖深水、浅水、季节性淹水、岸带等生境。然后根据挺水植物、浮水植物、沉水植物等植物生活型的差异，确定调查区域内水生植物类型。具体调查方法可按照 HJ 710.1 和 HJ 710.12 的要求。

b) 资料收集法

依据《中国植物志》等专著与文献，确定植物种类及其县级分布信息。并结合野外调查数据、中国数字植物标本馆（CVH, <http://www.cvh.org.cn/>）、国家标本资源共享平台（NSII）、中国植物物种信息数据库（<http://db.kib.ac.cn/eflora>）等相关标本补充物种分布信息。

附录 C

(资料性)

生态系统过程与功能指标调查技术方法

C.1 基础地理要素指标

C.1.1 经纬度

经纬度表征调查区域的位置信息。该指标可利用 GPS 等工具获取。

C.1.2 海拔高度

海拔高度表征调查区域的海拔信息。该指标可利用GPS等工具获取，或使用数字高程模型（DEM）提取。

C.1.3 坡度

坡度表征调查区域的陡缓程度。该指标可利用罗盘等工具获取，或使用数字高程模型（DEM）提取。坡度共分为六个等级（上含下不含），如下：

- a) I 级为平坡： $0^{\circ}\sim 5^{\circ}$ ；
- b) II 级为缓坡： $5^{\circ}\sim 15^{\circ}$ ；
- c) III 级为斜坡： $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ ；
- d) IV 级为陡坡： $25^{\circ}\sim 35^{\circ}$ ；
- e) V 级为急坡： $35^{\circ}\sim 45^{\circ}$ ；
- f) VI 级为险坡： 45° 以上。

C.1.4 坡向

坡向表征调查区域朝向。该指标可采用罗盘等工具获取，或使用数字高程模型（DEM）提取。共分为八个方向（上含下不含），如下：

- a) 北坡：方位角 $337^{\circ}\sim 360^{\circ}$ ， $0^{\circ}\sim 22^{\circ}$ ；
- b) 东北坡：方位角 $22^{\circ}\sim 67^{\circ}$ ；
- c) 东坡：方位角 $67^{\circ}\sim 112^{\circ}$ ；
- d) 东南坡：方位角 $112^{\circ}\sim 157^{\circ}$ ；
- e) 南坡：方位角 $157^{\circ}\sim 202^{\circ}$ ；
- f) 西南坡：方位角 $202^{\circ}\sim 247^{\circ}$ ；
- g) 西坡：方位角 $247^{\circ}\sim 292^{\circ}$ ；
- h) 西北坡：方位角 $292^{\circ}\sim 337^{\circ}$ 。

C.1.5 坡长

坡长是生态系统过程与功能调查的基本参数之一。该指标常以坡长因子（L）来表征，可采用卷尺测量，也可依据坡度信息计算得到，计算方法见式（C.1—C.3）：

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^m \dots\dots\dots (C.1)$$

$$m = \beta / (1 + \beta) \dots\dots\dots (C.2)$$

$$\beta = (\sin\theta / 0.0896) / [3.0 \times (\sin\theta)^{0.8} + 0.56] \dots\dots\dots (C.3)$$

式中：

L——坡长因子；

m——坡长指数；

θ ——坡度，单位为度[°]；

λ ——任意坡长小区的水平投影长度，单位为米[m]。

C.1.6 地表粗糙度

地表粗糙度是生态系统过程与功能调查的基本参数之一。该指标常以土壤糙度因子（ K' ）表征。

土壤糙度因子 K' 取决于自由糙度RR和定向糙度OR。地表糙度可采用一种滚轴式链条法来测定。其基本原理是：两点间直线距离最短，当地表糙度增加时，其地表距离随之增加。于是当一个给定长度为 L_1 的链条放于粗糙的地表时，其水平长度将缩小为 L_2 ， L_1 和 L_2 的差值和地表粗糙程度密切相关，计算方法见式（C.4）。

$$C_{rr} = \left(1 - \frac{L_2}{L_1}\right) \times 100 \dots\dots\dots (C.4)$$

式中：

C_{rr} ——任意方向上的地表糙度；

L_1 ——给定长度，单位为米[m]；

L_2 —— L_1 在粗糙地表的水平长度，单位为米[m]。

这里还涉及到一个垂直于垄向的糙度PR，当用链条法测出RR和PR时，OR可通过 $OR=PR-RR$ 来求得。

假设土垄呈等腰三角形则，计算方法见式（C.5），：

$$K_r = \frac{2.118 \times 10^{-2} \times OR}{N_r} \dots\dots\dots (C.5)$$

式中：

N_r ——在长度 L_2 范围内土垄的数量。

根据实验结果，当不考虑风向的影响时，土壤糙度因子 (K') 与土垄糙度因子 (K_r) 和随机糙度 (RR) 的回归方程为：

$$K_r = \frac{2.118 \times 10^{-2} \times OR}{N_r} \dots\dots\dots (C.6)$$

式中：

K_r ——土垄糙度因子；

N_r ——在长度 L_2 范围内土垄的数量；

OR ——定向糙度。

也可采用风向与垄成任意角度时的糙度因子公式：

$$K' = e^{(1.86K_r - 2.41K_r^{0.934} - 0.124C_{rr})} \dots\dots\dots (C.7)$$

$$R_c = 1.0 \times 10^{-2}(4.71\theta - 7.33 \times 10^{-2}\theta^2 + 3.74 \times 10^{-4}\theta^3) \dots (C.8)$$

式中：

K' ——土壤糙度因子；

R_c ——中间因子；

K_r ——土垄糙度因子；

C_{rr} ——任意方向上的地表糙度；

θ ——风向与垄平行方向的夹角，单位为度[°]。

C.1.7 降水量

降雨量是生态系统过程与功能调查的基本参数之一。该指标可从当地气象台站直接获取，也可采用雨量器人工测量或气象站点自动测量，人工观测日累计降水量，自动观测每小时降雨量，具体依据GB/T 35228的相关要求执行。

C.1.8 气温

气温是生态系统过程与功能调查的基本参数之一。该指标可从当地气象台站直接获取，也可采用温度计人工测量或气象站点自动测量，人工观测日最高、日最低气温，自动观测每小时平均气温，具体依据GB/T 35226的相关要求执行。

C.1.9 日照时数

日照时数是生态系统过程与功能调查的基本参数之一。该指标可从当地气象台站直接获取，也可采用日照计人工测量或气象站点自动测量，具体依据GB/T 35221的相关要求执行。

C.1.10 总辐射

总辐射是生态系统过程与功能调查的基本参数之一。该指标可从当地气象台站直接获取，也可采用辐射表进行自动测量，具体依据GB/T 35231的相关要求执行。

C.1.11 风速/风向

风速/风向是生态系统过程与功能调查的基本参数之一。该指标可从当地气象台站直接获取，也可采用风速仪和风向标观测风速风向，人工观测日平均风速和最多风向，自动观测采用每小时平均风速和最多风向，具体依据GB/T 35227的相关要求执行。

C.1.12 流量

流量是生态系统过程与功能调查的基本参数之一。该指标可从当地水文站直接获取，也可采用流速仪等调查。调查过程中需要对测验断面进行选择与勘察，按照流量测验方法需要科学布设测验断面，具体方法按照GB 50179的相关要求执行。

C.1.13 流速

流速是生态系统过程与功能调查的基本参数之一。该指标观测方法主要有机械式流速仪法、时差法和多普勒流速仪法等，通过流速仪进行连续监测，具体依据GB50179的相关要求执行。

C.1.14 含沙量

含沙量是生态系统过程与功能调查的基本参数之一。该指标可从当地水文站直接获取，也可使用采样器从水流中采取水样，然后经过量积、沉淀、过滤、烘干、称重等处理，计算一定体积水中的干沙重量。计算方法见式（C.9）：

$$S = \frac{M}{V} \quad \dots\dots\dots (C.9)$$

式中：

S——含沙量，单位为千克[kg]；

M——土壤水样中干沙质量，单位为千克[kg]；

V——水样体积，单位为立方米[m³]。

C.1.15 水位

水位是生态系统过程与功能调查的基本参数之一。该指标可从当地水文站直接获取，也可使用自记水位计对水位进行连续监测，将瞬时水位按时间平均，可求得某时段的平均水位，具体观测方法按照GB/T 50138的要求。

C.1.16 积水深度

积水深度是生态系统过程与功能调查的基本参数之一。该指标可选择超声波测深仪、水文测杆进行调查监测获得。

C.1.17 淹水历时

淹水历时是生态系统过程与功能调查的基本参数之一。该指标可采用人工观测记录法，结合积水深度数据确定。

C.1.18 结冰期

结冰期是生态系统过程与功能调查的基本参数之一。该指标可采用人工观测法，结合水位观测数据和气象数据确定。一般情况下，最低气温稳定在0℃以下且水位基本稳定可确定为结冰期。

C.1.19 土壤类型

土壤类型是生态系统过程与功能调查的基本参数之一。可根据中国土壤分类表和《中国土系志》综合确定。

土壤分类表依据GB/T 17296相关要求执行，主要观测到土纲层级，可根据实际情况在此基础上进行细化和备注。

C.1.20 土壤质地

土壤质地是生态系统过程与功能调查的基本参数之一。可采用野外调查的方式测定。

土壤质地也称土壤机械组成，采用吸管法测定，具体采样方法和测定步骤依据LY/T 1225的相关要求执行，主要测定土壤砂粒、粉粒和黏粒含量。

C.1.21 土壤可蚀性因子

土壤可蚀性因子是生态系统过程与功能调查的基本参数之一。该指标通过通用土壤流失方程（RUSLE）中计算方法，即根据土壤砂粒、粉粒、黏粒和土壤有机碳含量估算土壤可蚀性因子（土壤砂粒、粉粒和黏粒含量可以从土壤质地调查中获取），计算方法见式（C.10）：

$$K = \{0.2 + 0.3 \exp[-0.0256m_s(1 - m_{silt}/100)]\} \times [m_{silt}/(m_c + m_{silt})]^{0.3} \\ \times \{1 - 0.25 \text{orgC}/[\text{orgC} + \exp(3.72 - 2.95 \text{orgC})]\} \\ \times \{1 - 0.7(1 - m_s/100)\} \\ / \{(1 - m_s/100) + \exp[-5.51 + 22.9(1 - m_s/100)]\} \\ \dots\dots\dots (C.10)$$

式中：

K——土壤可蚀性因子；

m_s ——土壤砂粒百分含量，单位为百分数[%]；

m_{silt} ——土壤粉粒百分含量，单位为百分数[%]；

m_c ——土壤黏粒百分含量，单位为百分数[%]。

C.1.22 土壤厚度

土壤厚度是生态系统过程与功能调查的基本参数之一，可采用插钎法测定。插钎法是将钢钎垂直于土壤插入土层中，直到插不动为止，然后测量钢钎露出部分长度，总长度减去露出部分即为土壤厚度。

C.2 碳循环过程与功能

C.2.1 总初级生产力

总初级生产力（GPP）是陆地生态系统碳循环的重要参数之一，用于表征进入陆地生态系统的初始能量与物质总量。该指标主要采用遥感调查和地面调查方法获取，一般采用遥感调查方法，在小尺度调查中可采用地面调查方法。

a) 遥感调查方法

遥感调查可采用遥感统计模型或光能利用率模型。

1) 遥感统计模型利用地面实测数据与遥感植被指数构建经验关系，以估测区域的植被生产力，常用遥感植被指数为归一化植被指数（NDVI）、增强植被指数（EVI）、日光诱导植被荧光（SIF）等。

2) 光能利用率模型的核心思想是光合作用吸收的 CO_2 由植被吸收的光能与植被转化吸收光能的效率决定。计算方法见式（C.11）：

$$GPP = LUE_{max} \times f \times fPAR \times PAR \quad \dots\dots\dots (C.11)$$

式中：

GPP ——总初级生产力，单位为克碳每公顷 $[gC \cdot hm^{-2}]$ ；

LUE_{max} ——最大光能利用率，单位为克碳每兆焦 $[gC \cdot MJ^{-1}]$ ；

f ——环境影响因子，包括水分条件及温度影响因子；

$fPAR$ ——光合有效辐射吸收比；

PAR ——光合有效辐射，单位为兆焦每平方米 $[MJ \cdot m^{-2}]$ 。

b) 地面调查方法

地面调查采用产量收获法或涡度相关法。

1) 产量收获法按照GB/T 30363的要求。

2) 涡度相关法利用仪器直接测量大气与生态系统边界的碳、水等物质交换，再间接计算得到。

C.2.2 净初级生产力

净初级生产力 (NPP) 是陆地生态系统碳循环的重要参数之一，用于表征陆地生态系统的质量状况。该指标主要采用遥感调查和地面调查方法获取，一般采用遥感调查方法，在小尺度调查中可采用地面调查方法。

a) 遥感调查方法

参考GB/T 34815, *NPP*遥感调查可利用统计模型(Miami模型)或过程模型(BIOME-BGC模型)或光能利用率模型(CASA模型)进行计算。根据区域生态系统特征和数据基础确定具体方法。

通过CASA模型计算净初级生产力，计算方法见式 (C.12)：

$$NPP_{(x,t)} = APAR_{(x,t)} \times \varepsilon_{(x,t)} \quad \dots\dots\dots (C.12)$$

式中：

NPP——净初级生产力，单位为克碳每公顷年[gC·hm⁻²·a⁻¹];

APAR——植被所吸收的光合有效辐射，单位为兆焦每平方米[MJ·m⁻²];

ε ——植被光能利用率，单位为克碳每兆焦[gC·MJ⁻¹];

t——时间;

x——空间位置。

b) 地面调查方法

地面调查一般根据植被生物量的动态数据，利用增重累积法进行测算。

C.2.3 净生态系统生产力

净生态系统生产力 (NEP) 是陆地生态系统碳循环的重要参数之一，用于表征陆地生态系统与大气之间碳交换的物理量。在不考虑各种扰动影响的情况下，*NEP*的数值反映了陆地生态系统的净碳交换量，即碳源、汇的大小。该指标主要采用遥感调查和地面调查方法获取，一般采用遥感调查方法，在小尺度调查中可采用地面调查方法。

a) 遥感调查方法

*NEP*遥感调查采用*NPP*减去异养生物呼吸消耗(即土壤呼吸)光合产物。计算方法见式 (C.13)：

$$NEP = NPP - Rh \quad \dots\dots\dots (C.13)$$

式中：

NEP——净生态系统生产力，单位为克碳每公顷年 $[\text{gC}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}]$ ；

NPP——净初级生产力，单位为克碳每公顷年 $[\text{gC}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}]$ ；

Rh——土壤呼吸速率，单位为克碳每公顷年 $[\text{gC}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}]$ 。

*NEP*数值可以为正，也可以为负，*NEP* > 0时，表示生态系统为碳汇，*NEP* < 0时，表示生态系统为碳源，*NEP* = 0时，碳排放与吸收达到平衡状态。

b) 地面调查方法

地面调查以*NPP*和土壤呼吸的地面调查为主，*NPP*地面调查见附录C.2.2，土壤呼吸地面调查见附录C.2.4。

C.2.4 土壤呼吸

土壤呼吸 (*Rh*) 是陆地生态系统碳循环的重要参数之一，用于表征土壤释放CO₂的过程造成的生态系统有机碳输出量。该指标主要采用遥感调查和地面调查方法获取，一般采用遥感调查方法，在小尺度调查中可采用地面调查方法。

a) 遥感调查方法

Rh 遥感调查通过某些环境参数的半经验模型来估算或模拟。本文件推荐气候因子模型、气候-土壤因子模型两种方法，可根据数据基础选择合适的调查方法。

1) 气候因子模型的计算方法见式 (C.14)：

$$Rh = 1.250 \times e^{(0.05452T_a)} \times [P/(4.259 + P)] \quad \dots\dots\dots (C.14)$$

式中：

Rh——土壤呼吸量，单位为克碳每公顷年 $[\text{gC}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}]$ 。

T_a——平均大气温度，单位为摄氏度 $[\text{°C}]$ ；

P——降水量，单位为毫米 $[\text{mm}]$ 。

2) 气候-土壤因子模型的计算方法见式 (C.15)：

$$Rh = 1.55e^{0.031T_a} \times \left[\frac{P}{P+0.68} \right] \times [SOC/(SOC + 2.23)] \quad \dots\dots\dots (C.15)$$

式中：

Rh——土壤呼吸量，单位为克碳每公顷年 $[\text{gC}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}]$ 。

T_a——平均大气温度，单位为摄氏度 $[\text{°C}]$ ；

P——降水量，单位为毫米 $[\text{mm}]$ 。

SOC——表层土壤有机碳密度，单位为克碳每公顷年 $[\text{gC}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})]$ 。表层土壤厚度一般考

考虑 0~20cm。

b) 地面调查方法

参考GB/T33027，土壤呼吸地面调查采用便携式土壤呼吸测量仪，通过气相色谱法或红外气体分析法观测得到。

C.2.5 植被地上生物量

植被地上生物量是陆地生态系统碳循环的重要参数之一，用于表征植被地上部分碳储量的大小。该指标主要采用地面调查和遥感调查方法获取，一般采用地面调查方法，在较大尺度调查中可采用遥感调查方法。

a) 地面调查方法

乔木、灌木、草本的植被地上生物量地面调查方法不同，具体可参照 GB/T33027 执行。

b) 遥感调查方法

植被地上生物量遥感调查可采用植被指数-生物量统计法、异速生长方程法、累积NPP法等进行计算。

1) 植被指数-生物量统计法是通过实地测量的生物量数据和遥感植被指数建立两者之间的统计模型，基于遥感植被指数与统计模型反演得到评价区域的植被地上生物量。具体植被指数及回归模型的选择取决于模型拟合及验证结果。

2) 森林植被地上生物量可采用异速生长方程法，基于胸径、树高构建不同树种的生物量相对生长方程，利用相对生长方程估算植被地上生物量。

3) 草地植被地上生物量可采用累积NPP法进行估算，首先确定草地的生长周期（返青期至枯萎期），对生长周期内的NPP进行累加以计算植被地上生物量。

C.2.6 植被根冠比

植被根冠比（RTR）是陆地生态系统碳循环的重要参数之一，用于表征植被地下与地上部分碳储量的比例。该指标主要采用地面调查和遥感调查方法获取，一般采用地面调查方法，在较大尺度调查中可采用遥感调查方法。

a) 地面调查方法

植被根冠比可采用全根调查法，获得不同森林生态系统类型、不同龄级的森林植被地上生物量与地下生物量，以及不同草地生态系统类型的草本植被地上生物量与地下生物量，通过比值计算得到植被根冠比。森林全根调查法参考GB/T33027执行。

b) 遥感调查方法

植被根冠比遥感调查可采用类型赋值法，首先利用全根调查法或文献整合法得到的不同生态系统类型植被根冠比，基于不同生态系统类型的空间分布，通过赋值法得到植被根冠比的空间分布数据。

C.2.7 植被碳密度

植被碳密度是陆地生态系统碳循环的重要参数之一，用于表征植被地下与地上部分碳储量的大小。该指标主要采用地面调查和遥感调查方法获取，一般采用地面调查方法，在较大尺度调查中可采用遥感调查方法。

a) 地面调查方法

参考 GB/T33027-2016，植被碳密度包括森林、灌木、草本植被的地上碳密度和地下碳密度。可根据植被地上生物量、植被根冠比、含碳率进行计算，具体计算公式如下：

$$C_{VEG} = \sum_{j=1}^m [(1 + RTR_j) \times C_{Aj}] \quad \dots\dots\dots (C.16)$$

$$C_{Aj} = C_{AF} + C_{AS} + C_{AG} \quad \dots\dots\dots (C.17)$$

$$C_{AF} = \sum_{k=1}^n (B_{AFk} \times CF_{AFk}) \quad \dots\dots\dots (C.18)$$

$$C_{AS} = B_{AS} \times CF_{AS} \quad \dots\dots\dots (C.19)$$

$$C_{AG} = B_{AG} \times CF_{AG} \quad \dots\dots\dots (C.20)$$

$$B_{AFk} = V_{AFk} \times SVD_{AFk} \times BEF_{AFk} \quad \dots\dots\dots (C.21)$$

式中：

C_{VEG} ——植被碳密度，单位为克碳每公顷 $[gC \cdot hm^{-2}]$ ；

C_{Aj} ——植被 j 的地上碳密度，单位为克碳每公顷 $[gC \cdot hm^{-2}]$ ；

RTR_j ——植被 j 的根冠比；

C_{AF} ——森林植被的地上部分碳密度，单位为克碳每公顷 $[gC \cdot hm^{-2}]$ ；

C_{AS} ——灌木植被的地上部分碳密度，单位为克碳每公顷 $[gC \cdot hm^{-2}]$ ；

C_{AG} ——草本植被的地上部分碳密度，单位为克碳每公顷 $[gC \cdot hm^{-2}]$ ；

B_{AFk} ——森林植被中树种 k 的单位面积地上生物量，单位为克每公顷 $[g \cdot hm^{-2}]$ ；

B_{AS} ——灌丛植被单位面积地上生物量，单位为克每公顷 $[g \cdot hm^{-2}]$ ；

B_{AG} ——草本植被单位面积地上生物量，单位为克每公顷 $[g \cdot hm^{-2}]$ ；

CF_{AFk} ——森林植被中树种 k 的平均含碳率，单位为克碳每克 $[gC \cdot g^{-1}]$ ；

CF_{AS} ——灌丛植被平均含碳率，单位为克碳每克 $[gC \cdot g^{-1}]$ ；

CF_{AG} ——草本植被平均含碳率，单位为克碳每克 $[gC \cdot g^{-1}]$ ；

V_{AFk} ——树种 k 的单位面积蓄积量，单位为立方米每公顷 $[m^3 \cdot hm^{-2}]$ ；

SVD_{AFk} ——树种 k 的基本木材密度，单位为克每立方米 $[g \cdot m^{-3}]$ ；

BEF_{AFk} ——树种 k 的生物量扩展因子。

b) 遥感调查方法

植被碳密度遥感调查可采用类型赋值法，首先，利用地面调查得到的不同生态系统类型植被地上生物量、植被根冠比，结合文献整合法得到的不同生态系统类型植被含碳率、生物量扩展因子、基本木材密度，基于不同生态系统类型的空间分布，计算得到植被碳密度的空间分布数据。

C.2.8 植被释氧量

植被释氧量是陆地生态系统碳循环的重要参数之一，用于表征植物通过光合作用将二氧化碳转换为氧气的多少。根据植物光合作用固碳和释氧的特定量化关系，该指标主要采用 NPP 转换法，根据净初级生产力推算植被释氧量，计算方法见式 (C.22)：

$$OR_{veg} = NPP \times (M_{O_2}/M_C) \quad \dots\dots\dots (C.22)$$

式中：

OR_{veg} ——单位面积植被释氧量，单位为克氧气每公顷年 $[gO_2 \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}]$ ；

NPP ——净初级生产力，单位为克碳每公顷年 $[gC \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}]$ ；

M_{O_2}/M_C ——C 转化为 O_2 的系数，一般取值为 32/12。

C.2.9 土壤有机碳密度

土壤有机碳密度 (SOC) 是陆地生态系统碳循环的重要参数之一，用于表征土壤碳库中有机碳素存留量的大小。该指标主要采用地面调查和遥感调查方法获取，一般采用地面调查方法，在较大尺度调查中可采用遥感调查方法。

a) 地面调查方法

土壤有机碳密度地面调查可以采用剖面法或土钻法。具体方法参考 GB/T 33027 执行。

b) 遥感调查方法

土壤有机碳密度遥感调查可以采用土壤类型赋值法与 SOC 变化率法进行。

土壤类型赋值法是依据大量采样点的 SOC 密度，区分不同气候地理单元、不同土壤类型得到统计阈值，再结合土壤类型分布进行赋值，将样点尺度的 SOC 密度展布到空间栅格上。基于采样点多次 SOC 密度采样调查，统计不同气候地理单元、不同生态系统类型、不同土壤类型的 SOC 密度变化率，结合 SOC 空间栅格数据与 SOC 密度变化率，可以获得 SOC 密度变化

空间分布数据。

C.3 水循环过程与功能

C.3.1 潜在蒸散发量

潜在蒸散发量能够量化区域内水分蒸发能力，是区域生态系统的水循环的重要参数之一。该指标常采用结合遥感调查的模型方法来获取，包括两类模型。一类是基于地表能量平衡模型，另一类是半经验半理论模型。

a) 地表能量平衡模型

核心思想是利用余项法，计算获得潜热通量，然后转换为潜在蒸散发量，基本公式如下：

$$R_n = H + LE + G \quad \dots\dots\dots (C.23)$$

式中：

R_n ——净辐射，单位为瓦每平方米 $[W \cdot m^{-2}]$ ；

H ——感热通量，单位为瓦每平方米 $[W \cdot m^{-2}]$ ；

LE ——潜热通量，单位为瓦每平方米 $[W \cdot m^{-2}]$ ；

G ——土壤热通量，单位为瓦每平方米 $[W \cdot m^{-2}]$ 。

通过遥感数据的各种反演方法与参数化方案，可以获得各种地表生物物理参数，进而估算出净辐射、感热通量和土壤热通量，进而计算得到潜热通量。然后利用单位换算进行热通量和水通量转换，获得潜在蒸散发。

b) 半经验半理论模型

常见的模型为Thorntwaite模型和FAO Penman-Monteith模型。不同模型需要的参数不同，计算精度和复杂度也不同。遥感数据可作为模型中部分参数的输入源。计算方法可参照GB/T 20481。

C.3.2 实际蒸散发量

实际蒸散发量能够量化区域内生态系统水分蒸发状况，是区域生态系统的水循环的重要环节之一。该指标主要基于潜在蒸散发量，采用经验模型获取。计算方法见式 (C.24)：

$$AET = \left(\frac{1 + \frac{w \times PET}{PRE}}{1 + \frac{w \times PET}{PRE} + \frac{PRE}{PET}} \right) \times PRE \quad \dots\dots\dots (C.24)$$

式中：

AET ——实际蒸散发量，单位为毫米 $[mm]$ ；

w ——土地利用类型的用水系数（参考值：森林 2，灌丛 1.5，草地 0.5，农田 0.5，人工表面、裸地和荒漠为 0）；

PRE——降水量，单位为毫米[mm]；

PET——潜在蒸散法量，单位为毫米[mm]，见附录 C.3.1。

C.3.2 地表径流量

地表径流量反映了区域生态系统的产水能力，是水循环的重要环节之一。该指标主要采用地面调查方法获取，常见的方法包括流域实验法和测筒实验法。

a) 流域实验法

通过设置实验沟和径流场观测地表径流量，实测滞水深度、地表流速、降雨前后土壤含水量、地表径流起止时间等，地表径流观测的实验沟、径流场具体设置按照 SL 759 的要求。河流湿地径流量的观测则采用量水建筑物法、流速仪法，量水建筑物可以采用测流堰或测流槽。

b) 测筒实验法

常采用地埋式测筒或称重式测筒，地埋式测筒地表径流量使用地表径流计量仪监测，称重式测筒地表径流量应采用集水器皿直接称量，具体调查观测方法按照 SL 759 的要求。

C.3.3 冠层截留量

冠层截留量反映了区域生态系统对降水的截留能力。该指标主要采用地面调查方法获取，常见的方法包括水量平衡法、对比法和浸泡法。

a) 水量平衡法

计算方法见式 (C.25)：

$$C_I = P_G - S_R - E - M_I \quad \dots\dots\dots (C.25)$$

式中：

C_I——冠层截留量，单位为毫米[mm]；

P_G——总降雨量，单位为毫米[mm]；

S_R——地表径流量，单位为毫米[mm]；

E——蒸发量，单位为毫米[mm]；

M_I——土壤水分增加量，单位为毫米[mm]。

当地表径流量不在随降雨历时的延长而增加时，计算得到的冠层截留量即为冠层截留容量。

b) 对比法

计算方法见式 (C.26)：

$$C_I = P_G - TF \quad \dots\dots\dots (C.26)$$

式中：

C_L ——冠层截留量，单位为毫米[mm]；

P_G ——植被外总降雨量，单位为毫米[mm]；

TF ——植被下穿透雨量，单位为毫米[mm]。

在样地内均匀布设穿透雨收集器 5 个以上，每次降雨结束后用量筒测定样地内雨量收集器中穿透雨的体积（ml），并换算成植被下穿透雨量（mm）；同时在调查样地外设置 1 个标准雨量筒，获取植被外总降雨量（mm）。

c) 浸泡法

使用冠层分析仪测定植物群落的植物叶面积指数。其中，乔木群落在贴近树干距地面 1.2 m 处，分别测定树冠东、西、南、北四个方位叶面积指数，求平均值计算最终的叶面积指数；灌木、草本在距地面 0.2 m、距植物群落边缘进深 0.7 m 处，采用随机布点进行测定，每种植物采样点 4 处，求平均值计算最终的叶面积指数。

选择调查样地内每种植物 20 个标准叶片测定单位面积叶片蓄水量。将叶片放入叶面积仪内，记录叶片面积。用沾水棉球拭去叶片污染物 5 分钟后，使用高精度电子天平快速称重，然后将叶片浸入水中 5 分钟，用镊子轻轻取出至叶片不再滴水，再次称重。叶片单位面积蓄水量计算方法见式（C.27）：

$$k_L = \frac{M_w - M_l}{A_l} \dots\dots\dots (C.27)$$

式中：

k_L ——单位面积叶片蓄水量，单位为克每平方米[$g \cdot m^{-2}$]；

M_w ——叶片浸水后重量，单位为克[g]；

M_l ——叶片鲜重，单位为克[g]；

A_l ——叶片面积，单位为平方米[m^{-2}]。

根据蓄水量-叶面积指数关系换算得到冠层截留量，计算方法见式（C.28）：

$$S_L = LAI \times k_L \times 100 \dots\dots\dots (C.28)$$

式中：

S_L ——冠层截留量，单位为毫米[mm]；

LAI ——叶面积指数；

k_L ——单位面积叶片蓄水量，单位为克每平方米[$g \cdot m^{-2}$]。

C.3.4 凋落物最大持水量

凋落物最大持水量反映了植被凋落物对降水的截留程度。该指标主要采用地面调查方法获取，常见的方法为浸泡法。浸泡法方法为在样地内选定凋落物调查地点，收集单位面积的凋落物混合样品，烘干后称重，获得凋落物干重。将凋落物装入尼龙网袋后放入水中浸泡，在浸泡 24 小时后取出并静置，到凋落物不滴水时再称湿重，设定三个重复。

计算方法见式 (C.29)：

$$W_f = (M_w - M_f) \times 10 \quad \dots\dots\dots (C.29)$$

式中：

W_f ——凋落物最大持水量，单位为吨每公顷[t·hm⁻²];

M_w ——浸水后凋落物湿重，单位为千克每平方米[kg·m⁻²];

M_f ——凋落物干重，单位为千克每平方米[kg·m⁻²]。

C.3.5 凋落物最大持水率

凋落物最大持水率反映了植被凋落物对降水的截留能力。该指标主要采用地面调查方法获取，常见的方法为浸泡法。计算方法见式 (C.30)：

$$C_{W_f} = \frac{W_f}{M_f} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (C.30)$$

式中：

C_{W_f} ——凋落物最大持水率，单位为百分数[%];

W_f ——凋落物最大持水量，单位为吨每公顷[t·hm⁻²];

M_f ——凋落物干重，单位为千克每平方米[kg·m⁻²]。

C.3.6 土壤湿度

土壤湿度反映了土壤含水量大小。该指标主要采用地面调查方法获取，常见的方法为重量法、电阻法和负压计法。

a) 重量法

取土样烘干，称量其干土重和含水重加以计算。计算方法见式 (C.31)：

$$W_s = \frac{w - m_d}{m_d} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (C.31)$$

式中：

W_s ——土壤湿度，单位为百分数[%];

w ——土壤含水量，单位为克[g];

m_d ——土壤干重，单位为克[g]。

b) 电阻法

使用电阻式土壤湿度测定仪测定。

c) 负压计法

使用负压式土壤湿度计测定。

C.3.7 土壤孔隙度

土壤孔隙度反映了土壤疏松程度，该指标主要采用地面调查方法获取。

a) 土壤孔隙度通过获取土壤容重和比重来计算获得，计算方法见式 (C.32)：

$$K = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_s}\right) \times 100\% \quad \dots\dots\dots (C.32)$$

式中：

K——土壤孔隙度，单位为百分数[%]；

ρ_b ——土壤容重，单位为克每立方厘米[$g \cdot cm^{-3}$]；

ρ_s ——土壤比重。用土壤密度表示时单位为克每立方厘米[$g \cdot cm^{-3}$]。

b) 土壤容重测定使用环刀法。选定土壤调查地点，挖掘土壤剖面，一般在地下 0.5 m 左右将环刀垂直压入土壤，用铁铲将环刀从土壤中挖出，不破坏土壤自然状态，同样取三份。然后将环刀内土壤无损移入铝盒中，再将铝盒打开盖放入 105℃烘箱中烘 8 小时后称土壤干重，求其平均值。土壤容重计算方法见式 (C.33)：

$$\rho_b = \frac{W_s (g)}{V_s (cm^3)} \quad \dots\dots\dots (C.33)$$

式中：

ρ_b ——土壤容重，单位为克每立方厘米[$g \cdot cm^{-3}$]；

W_s ——环刀内土壤干重，单位为克[g]；

V_s ——环刀内土壤容积，单位为立方厘米[cm^3]。

c) 土壤比重测定使用比重瓶法。将比重瓶加水至满、外部擦干，称重为 A；再将比重瓶中水分倒出约 1/3 把 10 克烘干土小心倒入瓶中，加水至满，注意不使水溢出，擦干，称重为 B。土壤比重计算方法见式 (C.34)：

$$\rho_s = \frac{10}{10+A-B} \quad \dots\dots\dots (C.34)$$

式中：

ρ_s ——土壤比重；

A——瓶、水总质量，单位为克[g]；

B——瓶、水、土总质量，单位为克[g]。

C.4 能量交换过程与功能

C.4.1 地表反照率:

地表反照率是反映区域生态系统对太阳短波辐射反射特性的物理参量指标,是区域生态系统能量循环的重要参数之一。该指标主要采用遥感调查和地面调查方法获取,一般采用遥感调查方法,在较小尺度调查中可采用地面调查方法。

a) 遥感调查法

遥感调查法常用方法是依据植被的二项性反射模型,根据遥感数据的多光谱信息,构建统计模型、物理模型和半经验模型,根据公式 C.37 计算获得。

b) 地面调查法

地面调查法主要包括两种。一种方法是利用地面光谱仪,对生态系统进行多角度光谱测量,然后利用公式 C.37 进行积分得到;另一种方法是利用辐射表分别获得调查区域地表上行辐射通量和下行辐射通量,直接根据公式 C.37 计算获得。两种方法都较为常用。

c) 计算方法

地表反照率计算方法见式 (C.35);

$$\alpha(\theta_i, \Lambda) = \frac{F_u(\theta_i, \Lambda)}{F_d(\theta_i, \Lambda)} = \frac{\int_{\Lambda} F_u(\theta_i, \Lambda) r(\lambda) d\lambda}{\int_{\Lambda} F_d(\theta_i, \Lambda) d\lambda} \quad \dots\dots\dots (C.35)$$

式中:

θ_i ——太阳入射角,单位为弧度[rad];

F_u ——地表上行辐射通量,单位为瓦每平方米[w·m⁻²];

F_d ——地表下行辐射通量,单位为瓦每平方米[w·m⁻²];

$r(\lambda)$ ——地表反射率;

Λ ——波长 λ_1 到 λ_2 的波段范围。

C.4.2 地表比辐射率

地表比辐射率是反映区域生态系统对太阳长波辐射辐射特性的物理参量指标,是区域生态系统能量循环的重要参数之一。该指标主要采用遥感调查和地面调查方法获取,一般采用遥感调查方法,在较小尺度调查中可采用地面调查方法。

a) 遥感调查法

遥感调查法常用方法是依据遥感影像热红外通道数量特点,构建统计模型为主的单波段或多波段方程方法来计算获得。其中建立比辐射率与植被指数等参数统计关系的方法较为常用。

b) 地面调查法

地面调查法常用方法是利用红外辐射计等仪器构建发射率箱体，以公式 C.38 为基础，多次测量构建方程组求解获取，可参照 GB/T 41534 中地表发射率获取方法执行。

c) 计算方法

地表比辐射率计算方法见式 (C.36)：

$$\varepsilon(T, \lambda) = \frac{M_s(T, \lambda)}{M_B(T, \lambda)} \dots\dots\dots (C.36)$$

式中：

$M_s(T, \lambda)$ ——地表在温度 T 、波长在 λ 处的辐射出射度，单位为瓦每平方米 $[\text{w}\cdot\text{m}^{-2}]$ ；

$M_B(T, \lambda)$ ——同温度、同波长下黑体辐射出射度，单位为瓦每平方米 $[\text{w}\cdot\text{m}^{-2}]$ 。

C.4.3 地表温度

地表温度是反映区域生态系统对太阳净辐射的转换和再分配过程，是区域生态系统能量循环的重要参数之一。该指标主要采用遥感调查和地面调查方法获取，一般采用遥感调查方法，在较小尺度调查中可采用地面调查方法。

a) 遥感调查法

遥感调查法常用方法是依据遥感影像热红外通道数量特点，构建统计模型为主的“单通道”“多通道”方法来计算获得。

b) 地面调查法

一般采用红外辐射计等仪器观测得到，观测方法参照 GB/T 41534-2022 相关要求执行。

C.4.4 植被光合有效辐射吸收比率

植被光合有效辐射吸收比率是反映了植物冠层的光学特性，是表征植被光合作用水平和生长状态的重要参数。该指标主要采用遥感调查和地面调查方法获取，一般采用遥感调查方法，在较小尺度调查中可采用地面调查方法。

a) 遥感调查法

遥感调查法主要有两类。一类是基于统计模型，利用实测 $fPAR$ 或模拟数据集建立不同植被指数与 $fPAR$ 之间的相关关系来估算；另一类是基于物理模型，根据植被结构与冠层辐射传输方程模拟太阳光的吸收、反射和散射过程，进而估算 $fPAR$ 。两种方法都较为常用。

b) 地面调查法

一般采用冠层分析仪来观测，根据公式 C.39 计算 $fPAR$ 。

c) 计算方法

植被光合有效辐射吸收比率计算方法见式 (C.37)：

$$fPAR = \frac{I_{cl} - I_{ct} - (I_{ucl} - I_{uct})}{I_{cl}} \dots\dots\dots (C.37)$$

式中：

I_{cd} 为植被冠层顶太阳下行辐射，单位为瓦每平方米 $[w \cdot m^{-2}]$ ；

$I_{c\uparrow}$ 为植被冠层出射太阳辐射，单位为瓦每平方米 $[w \cdot m^{-2}]$ ；

I_{ucd} 为植被冠层下太阳下行辐射，单位为瓦每平方米 $[w \cdot m^{-2}]$ ；

$I_{uc\uparrow}$ 为植被冠层下土壤反射太阳辐射，单位为瓦每平方米 $[w \cdot m^{-2}]$ 。
