

团 体 标 准

T/CMSA 0027—2022

区域陆地碳汇评估技术指南

Technical guideline for regional land carbon sink assessment

2022 - 04 - 18 发布

2022 - 04 - 18 实施

目 次

前言	III
1 范围	4
2 规范性引用文件	4
3 术语和定义	4
4 基本原则	6
4.1 客观性	6
4.2 准确性	6
4.3 连续性	6
4.4 一致性	6
4.5 真实性	6
5 评估流程	6
5.1 确定评估的地理边界和时间边界	6
5.2 确定评估方法	6
5.3 数据收集、处理和补充观测	6
5.4 模型验证和评价	7
5.5 开展区域陆地碳汇评估	7
5.6 撰写区域陆地碳汇评估报告	7
6 区域陆地碳汇的评估方法	7
6.1 区域陆地碳汇评估指标	7
6.2 GPP 的计算	7
6.3 R_h 的计算	7
6.4 NPP 的计算	7
6.5 R_h 的计算	8
6.6 NEP 的计算	8
7 数据收集和处理	8
7.1 区域陆地碳汇评估空间分辨率的确定	8
7.2 数据收集及处理	8
7.3 参数本地化和校准	9
7.4 模型验证和评价	9
附录 A (规范性) 区域陆地碳汇评估报告编制大纲	10
附录 B (规范性) AVIM 模型计算 GPP 方案	11
附录 C (规范性) CEVSA 模型计算 GPP 方案	13
附录 D (规范性) 自养呼吸的计算	15
附录 E (规范性) 基于光能利用率模型计算 NPP	16
附录 F (资料性) 中国森林林龄-生物量方程	17

附录 G (资料性)	不同森林类型叶、茎、根和凋落物占总生物量的比例.....	19
附录 H (规范性)	土壤异养呼吸的计算.....	21
附录 I (资料性)	气象数据插值方法.....	23
附录 J (资料性)	陆地生态系统过程模型相关参数参考表.....	24
附录 K (资料性)	植物群落调查和土壤取样方法.....	27
附录 L (资料性)	模型评价的统计参数及计算方法.....	29
附录 M (资料性)	土壤含水量模拟方法.....	30
参考文献	32

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。

本文件由中国气象服务协会提出并归口。

本文件起草单位：中国科学院地理科学与资源研究所、中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所、中国绿色碳汇基金会、福智生（北京）科技有限公司、北京碳金鸿科技有限公司、富景天策（北京）生态科技有限公司、北京万云科技开发有限公司、北京市气候中心、博宇科技股份有限公司。

本文件主要起草人：黄玫、顾峰雪、张勇、巩贺、郑立明、侯远青、王挺、高宏斌、丁谊、孟倩文、邢佩、杜吴鹏、陈立英、李双成、翟旭东。

区域陆地碳汇评估技术指南

1 范围

本文件提供了区域陆地碳汇评估的基本原则、评估流程、评估的技术方法、数据来源与处理、模型验证和评价等方面的指导。

本文件适用于省（自治区、直辖市）、市（地区、州、盟）、县（自治县、市）、乡（民族乡、镇）等行政单元，或者国家公园、自然保护区、森林公园、湿地公园、风景名胜区等兴趣区的区域陆地碳汇评估。

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 32739—2016 土壤科学数据元数据
- GB/T 33674—2017 气象数据集核心元数据
- GB/T 36197—2018 土壤质量 土壤采样技术指南
- GB/T 41149—2021 基础地理信息数据质量要求与评定
- QX/T 118—2020 气象观测资料质量控制 地面

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

陆地生态系统 terrestrial ecosystem

地球陆地表面由生物及其环境通过能流、物流、信息流形成的功能整体。包括森林生态系统、湿地生态系统、农田生态系统、灌丛生态系统、草地生态系统和荒漠生态系统。

3.2

陆地生态系统碳汇 terrestrial ecosystem carbon sink

陆地生态系统在一定时间内通过光合作用所储存的大气二氧化碳（CO₂）总量，一般用净生态系统生产力（3.16）进行测度。

3.3

区域陆地碳汇 regional land carbon sink

区域陆地生态系统碳汇

区域内所有陆地生态系统碳汇的总和。

3.4

森林生态系统 forest ecosystem

以乔木为主体的绿色植物及其与环境相互作用，并产生能量流动和物质循环的综合系统，包括天然林生态系统和人工林生态系统。

3.5

湿地生态系统 wetland ecosystem

陆地和水域相互作用而形成的兼有水域和陆地生态系统特征的综合系统，包括天然或人工、长久或暂时性的沼泽地、泥炭地或水域地带、静止或流动淡水，包括低潮时水深不超过6 m的水域。

3.6

农田生态系统 cropland ecosystem

以作物为中心，利用生物和非生物环境之间以及生物种群之间的相互关系，通过合理的生态结构和高效生态机能，进行能量转化和物质循环，并按人类社会需要进行物质生产的综合系统。

3.7

灌丛生态系统 shrubland ecosystem

以灌木为主体的植物群落与环境相互作用，并产生能量转换和物质循环的综合系统。

注：灌木是没有明显主干、呈丛生状态且高度小于6 m的树木。

3.8

草地生态系统 grassland ecosystem

以草本植物和食草动物为主体的生物群落与其环境共同构成的综合系统，包括人工草地生态系统和天然草地生态系统两大类。

注：在我国少量分布的山地苔原生态系统，植被种类以草本植物为主的，在计算时归为此类。

3.9

荒漠生态系统 desert ecosystem

由超强耐旱生物及其干旱环境所组成的综合系统。

3.10

总初级生产力 gross primary productivity

GPP

在单位时间和单位面积上，绿色植物通过光合作用所固定的有机碳总量。

3.11

净初级生产力 net primary productivity

NPP

单位时间内植物通过光合作用所吸收的碳除去植物自养呼吸的碳损耗所剩余的部分。

3.12

植物自养呼吸 plant autotrophic respiration

R_a

植物以碳水化合物为底物，通过呼吸代谢途径，降解并产生能量和各种中间产物供给其生命活动的过程。

3.13

植物维持呼吸 plant maintenance respiration

R_m

植物自养呼吸作用所产生的能量和中间产物中用于维持植物细胞存活的部分。

3.14

植物生长呼吸 plant growth respiration

R_g

植物自养呼吸作用所产生的能量和中间产物用于合成植物生长所需要物质的部分。

3.15

土壤异养呼吸 soil heterotrophic respiration

R_h

土壤中的微生物进行新陈代谢活动消耗土壤中的有机碳，产生CO₂的过程。

3.16

净生态系统生产力 net ecosystem productivity

NEP

净初级生产力除去土壤异养呼吸的碳损耗所剩余的部分。

3.17

植被碳密度 vegetation carbon density

陆地生态系统中单位面积植被的碳含量。

3.18

土壤有机碳密度 soil organic carbon density

陆地生态系统中单位面积土壤的有机碳含量。

3.19

陆地碳汇评估模型 assessment model of terrestrial ecosystem carbon sink
评估模型

能够模拟陆地生态系统碳汇大小、空间分布及其动态变化的模型。

4 基本原则

4.1 客观性

评估所用数据来源于国家或行业主管部门公开发布的数据;按照行业规范的数据质量控制和标准处理方法处理数据;评估模型具有权威性,并经大量观测调查数据校准和验证,适用于中国区域陆地碳汇评估。

4.2 准确性

陆地碳汇评估模型模拟的NEP或NPP、植被碳密度和土壤有机碳密度能够准确反映评估区域内观测值的时间动态和空间格局。

4.3 连续性

受气候变化、土地利用变化、人为干扰等因素的影响,区域陆地碳汇的年间波动较大,宜进行动态评估。

4.4 一致性

在不同时间对同一评估单元再次或多次评估时,宜采用相同评估方法、参数和数据标准。

基于所有下一级行政单元(空间范围)的区域陆地碳汇评估方法、参数和数据来源与处理方法与基于上一级行政单元(空间范围)的碳汇评估方法、参数和数据来源与处理方法相同。

不同区域相同植被功能型的参数取值一致。

4.5 真实性

评估数据和评估技术方法公开透明,评估结果可验证、可核实、可报告。

5 评估流程

5.1 确定评估的地理边界和时间边界

5.1.1 地理边界

根据评估目的,确定区域陆地碳汇评估的地理边界,评估区域可以是行政单元,如省、市、县、乡、村,也可以是功能相对完整的生态系统地域单元(如林场、森林公园、草场等),以及由不同生态系统类型组合而成的特定地域单元(如自然保护区、风景名胜区等)。

5.1.2 时间边界

根据评估目的,确定评估的时间边界(起止年份)。

5.2 确定评估方法

根据评估区域内的生态系统类型、分布、气候、土壤特征和数据积累情况,按照数据、资料的可获得性,按照第6章选择相应的评估模型,并根据区域的空间范围大小,按7.1确定评估的空间分辨率。

5.3 数据收集、处理和补充观测

5.3.1 参数率定和模型验证评价数据收集和处理

收集开展区域陆地碳汇评估模型参数率定、模型验证和评价所需要的相关文献数据、历史观测数据，开展必要的实地观测调查，进行参数本地化和模型验证评价。

5.3.2 模型驱动数据收集和处理

区域陆地碳汇评估模型驱动数据包括遥感数据、土地利用、气候、土壤和大气 CO₂ 浓度等数据，按照第 7 章进行数据质量控制和标准化处理流程进行处理，并将数据插值到 7.1 要求的空间分辨率上。

5.4 模型验证和评价

利用获取的植被碳密度、土壤有机碳密度、*NPP*、*NEP* 观测数据按照 7.4 进行模型验证和评价。

5.5 开展区域陆地碳汇评估

利用处理后的驱动数据，运行区域陆地碳汇评估模型，开展指定区域陆地碳汇评估。

5.6 撰写区域陆地碳汇评估报告

出具区域陆地碳汇评估报告，宜按照附录 A 进行编制。

6 区域陆地碳汇的评估方法

6.1 区域陆地碳汇评估指标

区域陆地碳汇是评估区域内所有陆地生态系统净生态系统生产力 (*NEP*, gC·m⁻²·yr⁻¹) 之和。评估指标包括：总初级生产力 (*GPP*, gC·m⁻²·yr⁻¹)、净初级生产力 (*NPP*, gC·m⁻²·yr⁻¹)、植物自养呼吸 (*R_a*, gC·m⁻²·yr⁻¹)、土壤异养呼吸 (*R_b*, gC·m⁻²·yr⁻¹)、生态系统总呼吸 (*R_e*, gC·m⁻²·yr⁻¹) 和净生态系统生产力 (*NEP*, gC·m⁻²·yr⁻¹)，各指标之间的关系见公式 (1) ~ 公式 (3)。

$$NEP = NPP - R_h \dots\dots\dots (1)$$

$$NPP = GPP - R_a \dots\dots\dots (2)$$

$$NEP = GPP - R_a - R_h \dots\dots\dots (3)$$

NEP 的计算包括了对 *GPP*、*NPP*、*R_a* 和 *R_b* 的计算，相应的计算方法见 6.2~6.5。

6.2 *GPP* 的计算

宜使用附录 B 和附录 C 给出的中国自主研发的生态系统过程模型——AVIM 和 CEVSA 模型及其后续版本计算 *GPP*，这两个模型均采用 Farquhar 的光合作用方案。

6.3 *R_e* 的计算

植物自养呼吸 (*R_e*) 分为植物维持呼吸 *R_m* 和植物生长呼吸 *R_g* 两部分。其中：

——植物维持呼吸 *R_m* 与器官生物量成正比 (μmol·m⁻²·s⁻¹，以 CO₂ 计)，且随温度变化而改变；

——植物生长呼吸 *R_g* 正比于器官生物量的增长速率。

R_e 宜按照附录 D 进行计算。

6.4 *NPP* 的计算

6.4.1 直接计算

按照公式 (2)，利用 6.2 和 6.3 计算的 *GPP* 减去 *R_a*，即得到 *NPP*。

6.4.2 基于光能利用率模型计算

如果能够及时获取评估区域内、评估时段内符合 7.1 要求分辨率的遥感数据，宜按照附录 E 使用光能利用率模型计算 *NPP*。

6.4.3 利用森林生态系统的林龄-生物量方程计算

如果能够获取评估区域内森林生态系统内树种、林龄等观测信息时，宜使用林龄-生物量方程计算 NPP 。该方法中，森林 NPP 为连续两年森林植被生物量的净增长量 ΔB 与凋落物 $litter$ 之和，按公式（4）计算：

$$NPP = \Delta B + litter \dots \dots \dots (4)$$

式中：

ΔB ——连续两年森林植被生物量的净增长量，森林生物量 B 的估算可通过森林样地数据拟合的林龄-生物量方程得到，中国主要森林类型的林龄-生物量方程见附录 F。

$litter$ ——一年的森林植被生物量的凋落物， $Litter = \sum_{i=1}^3 (B * L_i * M)$ ， $L_i (i = 1、2、3)$ 分别代表叶、茎、根生物量占总生物量的比例， M 代表凋落物占总生物量的比例。根据观测数据计算的中国主要森林类型的叶、茎、根、凋落物占总生物量的比例见附录 G。

6.5 R_b 的计算

计算方法见附录 H。

6.6 NEP 的计算

根据公式（1）或公式（3）计算得到 NEP 。

7 数据收集和处理

7.1 区域陆地碳汇评估空间分辨率的确定

根据评估区域范围的大小和评估目标确定区域陆地碳汇评估的空间分辨率，一般宜：

- a) 全国陆地碳汇评估使用 1 km~10 km；
- b) 省级单元陆地碳汇评估使用 90 m~1 km；
- c) 地市级和县级单元陆地碳汇评估使用 10 m~30 m；
- d) 乡镇或森林公园、林场、园区等更小区域陆地碳汇评估使用 1 m~10 m。

7.2 数据收集及处理

7.2.1 气象数据

太阳辐射、地表气温、降水、相对湿度、云量、风速、大气压等气象观测数据宜来自评估区域内的国家基本气象站、国家基准气候站及自动气象观测站，并按照 QX/T 118—2020 对获取的观测数据缺测值和机器误差进行处理，得到评估所需要时间时段内的站点数据。然后利用样条函数插值法对评估区域内的气象观测数据进行内插，得到评估区域内所需分辨率的气象栅格数据，最终数据宜按照 GB/T 33674—2017 存储。插值方法见附录 I。

7.2.2 土地利用/土地覆盖数据

评估区域内逐年的土地利用/土地覆盖数据，可采用卫星产品的反演结果，其空间分辨率符合 7.1 的要求。土地利用/土地覆盖可以使用表 J.1 给出的分类，也可使用 GB/T 21010—2017 进行分类。

7.2.3 土壤颗粒组成和土壤质地数据

土壤颗粒组成数据主要包括粘粒、壤粒和砂粒的含量，土壤质地分类见表 J.2。

依据评估区域内不同比例尺的土壤图和最新全国土壤普查数据，制作土壤质地数据，也可以根据需求在评估区域进行土壤采样，通过实验测定土壤颗粒组成的各个参数，采样过程宜满足 GB/T 36197—2018 要求。通过软件将数据插值或重采样到符合 7.1 要求的空间分辨率，按 GB/T 32739—2016 进行存储。

7.2.4 大气 CO_2 浓度数据

可以从评估区域内气象观测站点获得逐月大气 CO_2 浓度的数据，当评估区域内气象观测站点无大气 CO_2 浓度观测数据时，可从中国大气本底观测站，如青海瓦里关大气本底监测站获取大气 CO_2 浓度数据，

若评估时段早于中国的大气本底观测，可以从美国夏威夷 Mauna Loa 观测所 (<https://scrippsco2.ucsd.edu/>) 获取1958年以来逐月大气CO₂浓度数据。

7.2.5 遥感数据

评估区域内逐年的归一化植被指数 (NDVI) 数据，宜采用符合7.1空间分辨率要求的卫星产品。所有空间数据的准确性宜满足GB/T 41149—2021。

7.3 参数本地化和校准

区域陆地评估模型所需参数见表1。

表1 模型主要参数和初始状态变量

参数/初始变量及单位	描述	参数/初始变量及单位	描述
<i>Lon</i>	经度	<i>YSAN</i> / gN·m ⁻²	土壤有效氮
<i>Lat</i>	纬度	<i>CN</i>	土壤氮碳比
<i>VGTY</i>	植被类型	<i>INSWC</i> / mm	初始土壤含水量
<i>height</i>	冠层高度	<i>SAT</i> / cm ³ ·cm ⁻³	饱和含水量 (体积)
<i>VEGC</i> / gC·m ⁻²	植被碳	<i>whc</i> / cm ³ ·cm ⁻³	田间持水量 (体积)
<i>LAI_{max}</i> / m ² ·m ⁻²	最大叶面积指数	<i>Wilt</i> / cm ³ ·cm ⁻³	萎蔫系数
<i>YSMC</i> / gC·m ⁻²	土壤有机碳	<i>SLA</i> / m ² ·gC ⁻¹	比叶面积

表1中的参数可来源于文献、评估区域内长期观测站点的历史积累数据，若文献数据和历史观测资料无法满足所有参数本地化需求时，宜开展实地的调查与观测，评估区域样地调查方法和内容见附录K。

7.4 模型验证和评价

7.4.1 基于生态系统通量观测 NEP 的直接验证

如果评估区域有碳通量观测站，则直接通过观测的NEP数据对模型模拟的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》。

7.4.2 基于样方调查的 NPP、植被碳密度和土壤有机碳密度数据的间接验证

在无通量观测数据进行直接验证的区域，可以用样方调查的NPP、植被碳和土壤有机碳密度数据对模型的模拟结果进行验证。

在评估区内，首先根据土地利用图确定区域的主要生态系统类型，在每一种生态系统类型内，选择代表性样地进行取样，分析获得评估区域内各样方的NPP、植被碳密度和土壤有机碳密度数据，森林样地内要调查树种组成和林龄。样地调查方法和内容见附录K。

7.4.3 模型准确性的评价

模型的准确性通过模拟值与观测值的比较来评价，宜利用一些统计参数来评价模型的模拟效果，如使用决定系数 (R^2)、系统性均方差 (MSE_s)、非系统性均方差 (MSE_i) 和Nash-Sutcliffe效率系数 (NS) 等。这些参数的计算见附录L。

附录A
(规范性)
区域陆地碳汇评估报告编制大纲

评估报告内容编制要素主要包括但不限于前言、评估区域概况、评估方法、数据来源和处理、准确性评价、区域陆地碳汇量和空间格局、结论和附录。编制大纲示例见图A.1。

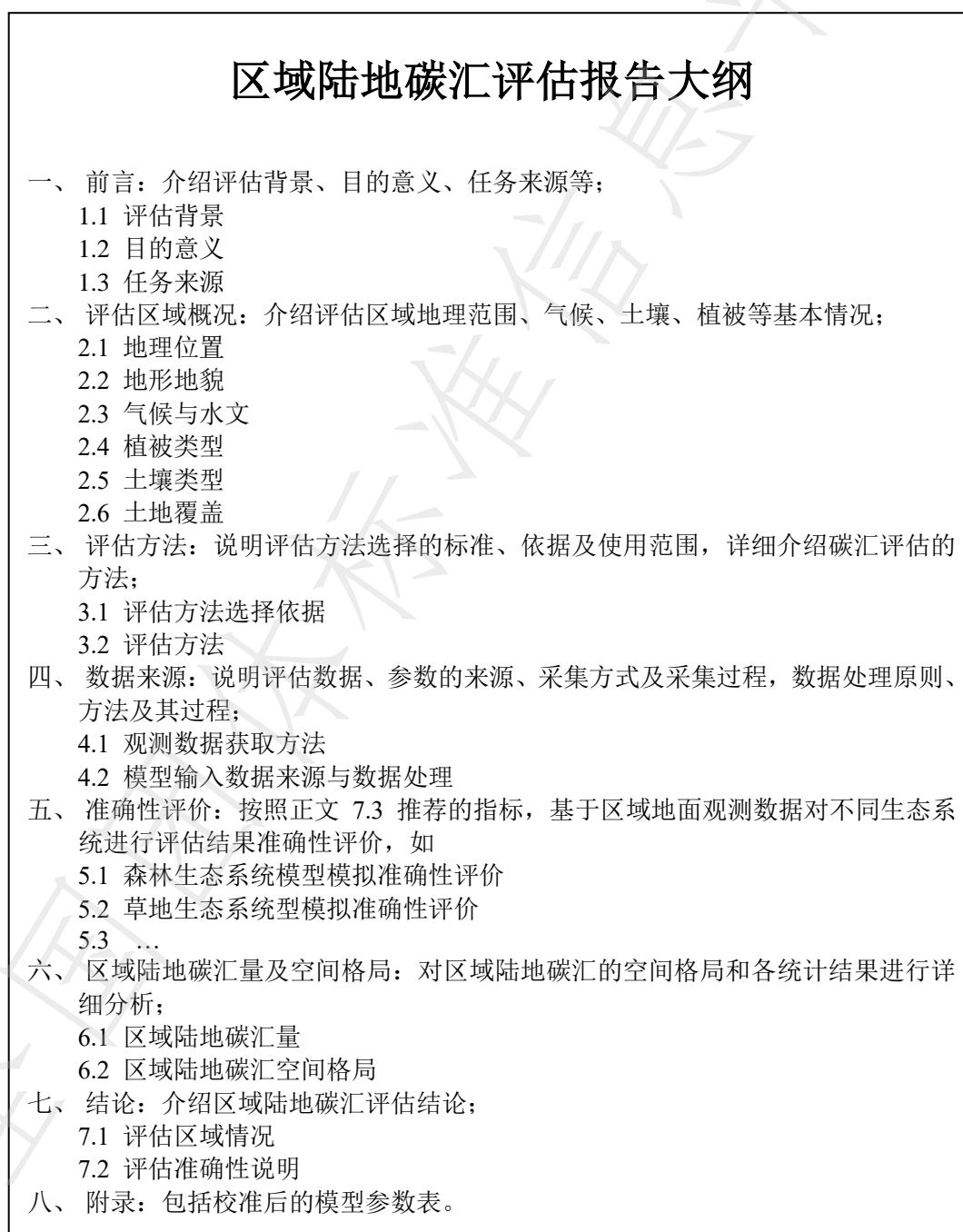


图 A.1 区域陆地碳汇评估报告大纲参考样例

附录B
(规范性)
AVIM 模型计算 GPP 方案

Farquhar的光合作用方案考虑了光合作用的生物化学过程对环境变化的响应，叶片的光合速率 A ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，以 CO_2 计)由叶绿素光合酶浓度限制下的羧化效率 W_c 和光通量限制下的羧化效率 W_j 二者中的小值决定，即：

$$A = \min(W_c, W_j) \dots\dots\dots (\text{B. 1})$$

$$W_c = \begin{cases} V_{c \max} & \text{C4} \\ V_{c \max}(C_i - \Gamma^*)/[C_i + K_c(1 + O_i/K_o)] & \text{C3} \end{cases} \dots\dots\dots (\text{B. 2})$$

$$W_j = \begin{cases} \frac{\alpha PAR(C_i - \Gamma^*)}{4 C_i + 2\Gamma^*} & \text{C4} \\ \alpha_1 PAR & \text{C3} \end{cases} \dots\dots\dots (\text{B. 3})$$

公式(B. 2)和公式(B. 3)中：

$V_{c \max}$ ——Rubisco的最大羧化效率，是温度(T)、土壤水分(W_s) (计算方法见附录M)和叶中含氮量(N)的函数，按照公式(B. 4)计算，单位为微摩尔每平方米秒($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，以 CO_2 计)，模型中暂不考虑羧化效率对叶中氮浓度的响应；

C_i 、 O_i ——分别是叶子内部 CO_2 和 O_2 的分压，单位为帕(Pa)；

Γ^* —— CO_2 的补偿点，单位为帕(Pa)；

K_c 、 K_o ——分别是对 CO_2 和 O_2 相应的Michaelis-Menten常数；

α 、 α_1 ——光量子固定 CO_2 或释放 O_2 的量子效率；

PAR ——光合有效辐射，单位为瓦每平方米($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)。

注：C3、C4分别对应碳三、碳四植物。

$$V_{c \max} = V_{c \max 25} f(N) \cdot f(W_s) \cdot f(T) \dots\dots\dots (\text{B. 4})$$

$$f(T) = Q_{10}^{0.1(T_c - 25)} \dots\dots\dots (\text{B. 5})$$

$$f(W_s) = (1 - e^{-b|w - w_i|})^{-1} \dots\dots\dots (\text{B. 6})$$

$$f(N) = 1 \dots\dots\dots (\text{B. 7})$$

公式(B. 4)~公式(B. 7)中：

$V_{c \max 25}$ —— $V_{c \max}$ 在 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 时的取值，单位为微摩尔每平方米秒($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，以 CO_2 计)；

Q_{10} ——敏感性参数，取值2.0；

T_c ——叶温，单位为凯尔文(K)；

b ——实验拟合参数；

w ——土壤含水量，单位为立方厘米每立方厘米($\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$)；

w_i ——土壤萎蔫系数，单位为立方厘米每立方厘米($\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$)。

大气中 CO_2 进入叶气孔进行光合作用是一个扩散过程，因而有(B. 8)所示关系式，光合速率和气孔导度的关系见公式(B. 9)。由公式(B. 8)、公式(B. 9)和公式(B. 1)就可以同时解出光合速率和气孔导度。

$$A = (C_a - C_i)(g - g_b)/(1.65P_s) \dots\dots\dots (\text{B. 8})$$

$$g = m \frac{A}{C_a} h_s + b \dots\dots\dots (\text{B. 9})$$

公式(B. 8)和(B. 9)中：

C_a ——大气 CO_2 的分压，单位为帕(Pa)；

C_i ——叶子内部 CO_2 的分压，单位为帕(Pa)；

P_s ——地面气压，单位为帕(Pa)；

g 、 g_b ——分别是气孔导度及其最小值，单位为米每秒($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)；

h_s ——叶片周围的相对湿度；

m 、 b ——实验常数。

光合速率从叶片扩大到冠层， GPP 计算见公式 (B.10)。

$$GPP = \frac{1 - e^{-K \cdot LAI}}{K} A \dots\dots\dots (B.10)$$

式中：

K ——冠层消光系数；

LAI ——叶面积指数。

全国团体标准信息平台

附录C
(规范性)
CEVSA 模型计算 GPP 方案

CEVSA模型在Farquhar方程的基础上,综合考虑光合作用、气孔导度、呼吸作用、氮吸收和蒸发蒸腾量等生理生态过程来决定GPP。光合作用速率决定于叶肉组织光合酶对CO₂的利用效率和CO₂向叶肉组织的扩散速率。由生物化学过程决定的光合速率(A_b)可表达为公式(C.1)。

$$A_b = \min\{W_c, W_j, W_p\}(1 - 0.5 P_o/\tau P_c) - R_d \dots\dots\dots (C. 1)$$

式中:

- W_c ——由光合酶,即二磷酸核酮糖-羧化酶-氧化酶(Rubisco)活性所决定,与叶片氮含量直接相关,按照公式(C.2)计算;
- W_j ——取决于光合反应过程中的电子传递速度,决定于叶片吸收的光合有效辐射,按照公式(C.3)计算;
- W_p ——决定于光合反应过程对磷酸丙糖(Triose phosphate)的利用效率,决定于叶片对光合产物的利用和输出能力,按照公式(C.4)计算;
- P_o 、 P_c ——分别是叶肉组织中O₂和CO₂的分压,单位是帕(Pa),决定于大气CO₂分压和叶片气孔传导度;
- τ ——Rubisco对CO₂浓度的特定反应参数,单位是焦耳每摩尔(J·mol⁻¹),在模型中 τ 是温度的函数;
- R_d ——白昼非光合呼吸速率, R_d 是 V_c^{\max} 的函数,按照公式(C.5)计算。

$$W_c = V_c^{\max} P_c / [P_c + K_c(1 + P_o/K_o)] \dots\dots\dots (C. 2)$$

$$W_j = J P_c / [4(P_c + P_o/\tau)] \dots\dots\dots (C. 3)$$

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

$$R_d = 0.015 V_c^{\max} \dots\dots\dots (C. 5)$$

公式(C.2)~公式(C.5)中:

- V_c^{\max} ——由Rubisco决定的最大的羧化速率,可以根据植被类型取特定常数,也可以将公式(C.1)代入方程(C.3)计算得到,见公式(C.6);
- K_c ——CO₂相应的Michaelis-Menten常数,单位是焦耳每摩尔(J·mol⁻¹);
- K_o ——O₂相应的Michaelis-Menten常数,单位是焦耳每摩尔(J·mol⁻¹);
- J ——电子传输速率,单位是微摩尔每平方米秒($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),辐射 I 驱动电子传输速率 J ,计算见公式(C.7);
- U ——丙糖磷酸的利用率,单位是微摩尔每平方米秒($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),计算见公式(C.8);
- W_{\min} —— W_c 和 W_j 两者中的小者。

$$V_c^{\max} = (A_b + R_d)[P_c + K_c(1 + P_o/K_o)] / (P_c - 0.5 P_o/\tau) \dots\dots\dots (C. 6)$$

式中, $A_b=A_{\max}$,是最大光饱和光合速率,模型中植物的氮含量决定了植物的最大光合速率,根据经验方程,将每一层叶片的最大光合速率与氮含量(N)联系在一起, $A_{\max} = 190N/(360 + N)$ 。

$$J = \alpha I / [(1 + \alpha^2 I^2 / J_{\max}^2)^{0.5}] \dots\dots\dots (C. 7)$$

式中:

- α ——光子转化电子的效率,单位是摩尔每摩尔(mol·mol⁻¹);
- I ——光子辐射,单位是微摩尔每平方米秒($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$);
- J_{\max} ——光饱和的电子传输速率,与 V_c^{\max} 线性相关, $J_{\max} = 29.1 + 1.64 V_c^{\max}$ 。

$$U = 5.79 \times 10^{-7} + 0.0569 J_{\max} \dots\dots\dots (C. 8)$$

温度主要通过对电子传递和次发生反应过程来影响光合作用。每种植物都是在一定的温度范围内才能进行光合作用,并且有其最高、最低和最适的温度范围。温度对光合作用的影响,在模型中可以通过 V_c^{\max} 和 J_{\max} 等生理参数来表达。温度对 V_c^{\max} 和 J_{\max} 的影响用经验公式(C.9)和公式(C.10)表达。

$$V_c^{\max}(T) = V_c'[1 + 0.051(T - 25) - 2.48 \times 10^{-4}(T - 25)^2 - 8.09 \times 10^{-5}(T - 25)^3] \dots \dots (C. 9)$$

$$J_{\max}(T) = J'_{\max}[1 + 0.041(T - 25) - 1.54 \times 10^{-3}(T - 25)^2 - 9.42 \times 10^{-5}(T - 25)^3] \dots \dots (C. 10)$$

公式 (C. 9) ~ 公式 (C. 10) 中:

T —— 摄氏温度值, 单位为摄氏度 ($^{\circ}\text{C}$);

V_c' 、 J'_{\max} —— 在 25°C 时测得的 J_{\max} 和 V_c^{\max} , 25°C 是试验测定植物光合速率的参考温度。

大气 CO_2 向叶肉组织的扩散速率取决于叶片气孔传导度, 它所决定的光合速率 (A_d) 计算见公式 (C. 11):

$$A_d = g_s (P_a - P_c) / 160 \dots \dots \dots (C. 11)$$

式中:

g_s —— 植物叶片的气孔导度数值, 单位是毫摩尔每平方米秒 ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 计算见公式 (C. 12);

P_a 、 P_c —— 分别是叶片表面和细胞内的 CO_2 分压数值。

采用修正的 Ball-Berry 模型来模拟气孔导度的变化, 模型中也考虑了土壤干旱对气孔导度的影响。

$$g_s = (g_0(T) + g_1(T)AR_h/P_a)k_g(w_s) \dots \dots \dots (C. 12)$$

式中:

g_0 —— 在光补偿点下光合速率为零时的气孔传导度, 取值范围为 $[8, 80] \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 可按照 $g_0(T) = 142.4 - 4.8T$ 计算;

T —— 绝对温度;

g_1 —— 灵敏度参数, 取值范围为 $[6.9, 10]$, 可按照 $g_1(T) = 12.7 - 0.207T$ 计算;

A —— 实际光合速率;

R_h —— 叶片周围空气相对湿度。

$k_g(w_s)$ —— 气孔传导度对土壤含水量 w_s (计算方法见附录 M) 的反应函数, 可按公式 (C. 13) 计算。土壤含水量 w_s 对气孔导度 g_s 的影响基于一个双曲线响应函数 (公式 (C. 13)):

$$k_g(w_s) = s_1(w_s - s_0)/(w_s - 2s_0 + s_2) \dots \dots \dots (C. 13)$$

式中:

s_1 —— 气孔导度在土壤含水量大于 s_0 后增加的响应斜率;

s_0 —— 气孔导度为 0 时的土壤含水量, 单位是克每克 ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$);

s_2 —— 当土壤含水量达到最大值时气孔导度响应平缓时的速率, 单位是克每克 ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)。

为求出实际的光合速率, 可以采用连续迭代的方法解有关的非线性方程组使由生物化学过程和气孔传导度决定的光合速率相等, 最终求得光合速率 A_i 。在植被冠层尺度上, 光合速率还与叶面积及由此决定的光合有效辐射和叶片氮含量垂直分布有关。把植被冠层划分为与叶面积指数相等的层次并对其所接受的光合有效辐射, 气孔传导度和光合速率分别进行计算。整个冠层的光合速率等于冠层每个层次光合速率的总和, 模型中根据日长计算每天整个冠层的光合总量 GPP , 即每天的 GPP 为:

$$canA = \int_1^{LAI} A_i dLAI \dots \dots \dots (C. 14)$$

$$GPP = \int_{t_1}^{t_2} canA dt \dots \dots \dots (C. 15)$$

式中:

$canA$ —— 整个冠层的光合速率;

LAI —— 叶面积指数, 可以是遥感数据输入, 也可以根据光合与呼吸及水供应与需求的共同平衡和整个冠层光合速率最大化原则来确定叶面积指数和光合速率;

A_i —— 某一层叶片的光合速率;

GPP —— 日光合总量;

t_1 、 t_2 —— 白天进行光合作用的时间。

附录D
(规范性)
自养呼吸的计算

植物自养呼吸 (R_a) 分为植物维持呼吸 R_m 和植物生长呼吸 R_g 两部分,

$$R_a = R_m + R_g \quad \text{..... (D. 1)}$$

植物维持呼吸 R_m 与器官生物量成正比 ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 以 CO_2 计), 且随温度变化而改变, 按公式 (D. 2) 计算。

$$R_m = \sum_i R_{mi25} 2.0^{0.1(T_i-25)} M_i \quad \text{..... (D. 2)}$$

式中:

i ——分别代表叶、茎和根;

R_{mi25} ——在 25 °C 时单位生物量的呼吸率, 单位为微摩尔每平方米秒 ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 以 CO_2 计);

T_i ——冠层温度 (对叶, 茎) 或土壤温度 (对根), 单位为开尔文 (K);

M_i ——器官生物量, 单位为千克每平方米 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)。

根据质量守恒原理, 植物各器官生物量的变化为:

$$\frac{dM_i}{dt} = \eta_i(1 - \sigma_i)(A - R_m) - \text{Loss}_i M_i \quad i = f, s, r \quad \text{..... (D. 3)}$$

式中:

η_i ——叶、茎和根的分配系数;

σ_i ——生长呼吸系数;

A ——光合速率, 根据附录 G 和 H 中的方法可以算出;

Loss_i ——植被的凋落率, 茎和根的凋落率与生物量成正比, 叶的凋落率与叶丛的生物量和植物的物候期有关。

植物生长呼吸 R_g 按公式 (D. 4) 计算。

$$R_g = \sum_i \eta_i \frac{dM_i}{dt} \quad \text{..... (D. 4)}$$

式中:

η_i ——叶、茎和根的分配系数, $\sum_i \eta_i = 1$ 。对叶 (f)、茎 (s)、根 (r) 的分配比例系数 η_f 、 η_s 、 η_r 的计算见公式 (D. 5);

$\frac{dM_i}{dt}$ ——器官生物量的增长速率, 当 $dM_i/dt < 0$ 时, $R_g = 0$ 。

$$\begin{cases} \eta_f = (1 - \alpha_1) \exp(-b_1(LAI/LAIM)^2) \\ \eta_s = \alpha_1(1 - \eta_f) \\ \eta_r = (1 - \alpha_2)(1 - \eta_f) \end{cases} \quad \text{..... (D. 5)}$$

式中:

α_1 、 α_2 ——由物候决定的对各器官的分配;

b_1 ——经验常数;

LAI ——叶面积指数;

$LAIM$ ——特征叶面积指数, 依植物群落种类不同而不同。

相关参数见表 J. 3-J. 5。

附录E
(规范性)
基于光能利用率模型计算 *NPP*

光能利用率模型用植物的光合有效辐射 (*APAR*) 和实际光能利用率 (ε) 来估算 *NPP*, 见公式 (E. 1)。

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \varepsilon(x, t) \dots\dots\dots (E. 1)$$

式中:

APAR(*x*, *t*)——有效光合辐射, 可由植被所能吸收的太阳有效辐射和植被对入射光合有效辐射的吸收比例来确定, 按公式 (E. 2) 计算;

ε (*x*, *t*) ——光能利用率, *x*为某一个格点位置, *t*为时间, 可按照公式 (E. 4) 计算。

$$APAR(x, t) = SOL(x, t) \times FPAR(x, t) \times 0.5 \dots\dots\dots (E. 2)$$

式中:

SOL(*x*, *t*) ——太阳总辐射量;

FPAR(*x*, *t*)——植被对入射光合有效辐射的吸收比例, 可以通过遥感的 *NDVI* 数据求得, 按公式 (E. 3) 计算;

0.5 ——植被所能利用的太阳有效辐射比例。

$$FPAR(x, t) = \frac{(SR(x, t) - SR_{i, min})}{(SR_{i, max} - SR_{i, min})} \times (FPAR_{max} - FPAR_{min}) + FPAR_{min} \dots\dots\dots (E. 3)$$

式中:

SR(*x*, *t*) ——植被指数, $SR(x, t) = \frac{1 + NDVI(x, t)}{1 - NDVI(x, t)}$;

*SR*_{*i*, max}和*SR*_{*i*, min} ——分别为第*i*种植被类型*NDVI*的95%和5%下侧百分数;

*FPAR*_{max}、*FPAR*_{min} ——分别为0.001和0.95。

$$\varepsilon(x, t) = T_{\varepsilon 1}(x, t) \times T_{\varepsilon 2}(x, t) \times W_{\varepsilon}(x, t) \times \varepsilon_{max} \dots\dots\dots (E. 4)$$

式中:

T _{$\varepsilon 1$} (*x*, *t*)、*T* _{$\varepsilon 2$} (*x*, *t*)——温度胁迫因子, 可分别按公式 (E. 5) 和公式 (E. 6) 估算;

W _{ε} (*x*, *t*) ——水分胁迫因子, 可按公式 (E. 7) 估算;

ε_{max} ——理论上最大的光能利用效率, 取0.389 g·C·MJ⁻¹。

$$T_{\varepsilon 1}(x, t) = 0.8 + 0.02 \times T_{opt}(x) - 0.0005 \times [T_{opt}(x)]^2 \dots\dots\dots (E. 5)$$

$$T_{\varepsilon 2}(x, t) = 1.1814 / \{1 + e^{[0.2 \times (T_{opt}(x) - 10 - T(x, t))]} \} / \{1 + e^{[0.3 \times (-T_{opt}(x) - 10 + T(x, t))]} \} \dots\dots\dots (E. 6)$$

公式 (E. 5) 和公式 (E. 6) 中:

*T*_{opt}(*x*)——植物生长的最适温度, 取25 °C;

T(*x*, *t*)——气温。

$$W_{\varepsilon}(x, t) = 0.5 + 0.5 \times EET(x, t) / EPT(x, t) \dots\dots\dots (E. 7)$$

式中:

EET(*x*, *t*)——区域实际蒸散量;

EPT(*x*, *t*)——区域潜在蒸散量。

附录F
(资料性)
中国森林林龄-生物量方程

表F.1给出了中国主要森林类型的林龄-生物量方程，森林类型按照优势树种划分。

表 F.1 中国主要森林类型的林龄-生物量方程

编号	优势树种	方程	R^2	P
1	红松	$y=221.2197/(1+27.1932 \times \exp(-0.1156x))$	0.92	<0.001
2	冷杉	$y=209.5947 \times (1-\exp(-0.0143x))$	0.72	<0.001
3	云杉	$y=396.9727 \times (1-\exp(-0.0060x))$	0.83	<0.001
4	铁杉	$y=203.06/(1+4.8039 \times \exp(-0.0201x))$	0.96	-
5	柏木	$y=214.3669 \times (1-\exp(-0.0150x))$	0.51	<0.001
6	落叶松	$y=131.5287 \times (1-\exp(-0.0330x))$	0.75	<0.001
7	樟子松	$y=129.8733/(1+738.7535 \times \exp(-0.1841x))$	0.88	<0.001
8	赤松	$y=49.14/(1+2.3436 \times \exp(-0.0985x))$	0.67	-
9	黑松	$y=80.3069/(1+14.5894 \times \exp(-0.18x))$	0.77	<0.01
10	油松	$y=106.5817/(1+65.2834 \times \exp(-0.18x))$	0.94	<0.001
11	华山松	$y=118.9491 \times (1-\exp(-0.0448x))$	0.91	<0.001
12	马尾松	$y=273.1726 \times (1-\exp(-0.0208x))$	0.95	<0.001
13	云南松	$y=147.88/(1+5.3342 \times \exp(-0.0736x))$	0.73	-
14	思茅松	$y=95.71/(1+2.0674 \times \exp(-0.0878x))$	0.83	-
15	高山松	$y=408.0696/(1+22.8692 \times \exp(-0.1235x))$	0.92	<0.001
16	杉木	$y=228.4472 \times (1-\exp(-0.0436x))$	0.98	<0.001
17	樟树	$y=195.6586/(1+29.081 \times \exp(-0.2017x))$	0.97	<0.001
18	楠木	$y=167.6151/(1+23.1429 \times \exp(-0.2121x))$	0.95	<0.001
19	栎类	$y=117.0554 \times (1-\exp(-0.0394x))$	0.83	<0.001
20	桦木	$y=110.6981 \times (1-\exp(-0.0395x))$	0.80	<0.001
21	硬阔类	$y=320.1067 \times (1-\exp(-0.0106x))$	0.86	<0.001
22	椴树类	$y=266.71/(1+7.8232 \times \exp(-0.0586x))$	0.96	-
23	桉树	$y=377.8447 \times (1-\exp(-0.0399x))$	0.95	<0.001
24	杨树	$y=80.7104/(1+28.0613 \times \exp(-0.4669x))$	0.95	<0.001
25	桐类	$y=194.3060/(1+17.6398 \times \exp(-0.0755x))$	0.99	<0.001
26	软阔类	$y=120.8642/(1+28.2886 \times \exp(-0.1661x))$	0.83	<0.001

表F.1 中国主要森林类型的林龄-生物量方程（续）

编号	优势树种	方程	R^2	P
27	针叶混	$y=215.8278 \times (1-\exp(-0.0262x))$	0.81	<0.001
28	东北针阔混交林	$y=256.9785/(1+11.8998 \times \exp(-0.0292x))$	0.85	<0.001
29	东南针阔混交林	$y=747.0699/(1+12.5065 \times \exp(-0.0321x))$	0.94	<0.001
30	西北针阔混交林	$y=215.5257/(1+10.0404 \times \exp(-0.0411x))$	0.93	<0.001
31	西南针阔混交林	$y=249.9467/(1+14.5800 \times \exp(-0.0296x))$	0.90	<0.001
32	东北阔叶混交林	$y=205.5919 \times (1-\exp(-0.0208x))$	0.91	<0.001
33	东南阔叶混交林	$y=448.0037 \times (1-\exp(-0.0127x))$	0.89	<0.001
34	西北阔叶混交林	$y=217.9374 \times (1-\exp(-0.0133x))$	0.85	<0.001
35	西南阔叶混交林	$y=337.2582 \times (1-\exp(-0.0207x))$	0.91	<0.001
<p>注1: x为林龄, y为生物量。东北包括:黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、河北、河南、山东、山西、北京、天津; 东南包括:江苏、安徽、浙江、上海、福建、广东、广西、湖南、湖北、江西、海南;西北包括:陕西、甘肃、宁夏、青海、新疆;西南包括:四川、重庆、贵州、云南、西藏。</p> <p>注2: 数据来源:王万同、唐旭利、黄玫等.中国森林生态系统碳储量—动态及机制[M].北京:科学出版社,2018。</p>				

附录G
(资料性)

不同森林类型叶、茎、根和凋落物占总生物量的比例

表G.1给出了根据观测数据计算的中国主要森林类型的叶、茎、根、凋落物占总生物量的比例，森林类型按照优势树种划分。

表 G.1 叶、茎、根和凋落物占总生物量的比例

编号	森林类型	叶	茎	根	凋落物
1	红松	0.051	0.657	0.210	0.082
2	冷杉	0.068	0.703	0.195	0.034
3	云杉	0.145	0.580	0.230	0.045
4	铁杉	0.145	0.580	0.230	0.045
5	柏木	0.145	0.587	0.188	0.08
6	落叶松	0.066	0.664	0.205	0.065
7	樟子松	0.107	0.698	0.162	0.033
8	赤松	0.130	0.636	0.180	0.054
9	黑松	0.131	0.649	0.182	0.038
10	油松	0.092	0.619	0.170	0.119
11	华山松	0.075	0.663	0.183	0.079
12	马尾松	0.083	0.711	0.132	0.074
13	云南松	0.493	0.321	0.115	0.071
14	思茅松	0.083	0.711	0.132	0.074
15	高山松	0.072	0.692	0.188	0.048
16	杉木	0.086	0.676	0.181	0.057
17	樟树	0.062	0.664	0.216	0.058
18	楠木	0.060	0.551	0.166	0.223
19	栎类	0.053	0.654	0.196	0.097
20	桦木	0.136	0.578	0.196	0.09
21	硬阔类	0.052	0.692	0.188	0.068
22	椴树类	0.056	0.622	0.202	0.12
23	桉树	0.045	0.738	0.091	0.126
24	杨树	0.060	0.683	0.204	0.053
25	桐类	0.056	0.655	0.260	0.029

表G.1 叶、茎、根和凋落物占总生物量的比例（续）

编号	森林类型	叶	茎	根	凋落物
26	软阔类	0.109	0.671	0.145	0.075
27	针叶混	0.089	0.674	0.180	0.057
28	东北针阔混	0.054	0.688	0.202	0.056
29	东南针阔混	0.049	0.717	0.180	0.054
30	西北针阔混	0.170	0.586	0.178	0.066
31	西南针阔混	0.085	0.535	0.316	0.064
32	东北阔叶混	0.038	0.719	0.199	0.044
33	东南阔叶混	0.042	0.734	0.176	0.048
34	西北阔叶混	0.139	0.666	0.152	0.043
35	西南阔叶混	0.081	0.521	0.314	0.084

注：数据来源：王万同、唐旭利、黄玫等. 中国森林生态系统碳储量—动态及机制[M]，北京：科学出版社，2018。

附录H
(规范性)
土壤异养呼吸的计算

进入土壤的凋落物分解为CO₂或转化为土壤有机质，这些转化的有机物最终也会矿化为CO₂。土壤有机碳库被分为8个部分：地表结构和新陈代谢凋落物，结构和新陈代谢根凋落物，地表微生物和土壤微生物，缓性土壤碳（其周转时间大约为20年~40年）和惰性土壤碳（周转时间为200年~1500年）。把这些有机物质的分解和转化作为一级速率反应，每个有机碳库有各自的潜在衰变速率*K*(*P*)（取值见表J.6），其分解受温度、土壤水分、氮的有效性、土壤颗粒组成和碳库木质素含量的影响。各碳库土壤异养呼吸*R_h*(*P*)由公式（H.1）决定：

$$R_h(P) = \begin{cases} POLC(P) \times K(P) \times ABF \times NLIM(P) \times F(P) \times L_c & P = 1,2 \\ POLC(P) \times K(P) \times ABF \times NLIM(P) \times F(P) \times T_m & P = 3 \dots\dots\dots (H.1) \\ POLC(P) \times K(P) \times ABF \times NLIM(P) \times F(P) & P = 4, \dots, 8 \end{cases}$$

式中：

R_h ——各个碳库的土壤异养呼吸；

P ——不同碳库；

POLC——碳库大小；

K ——潜在衰变速率；

ABF ——土壤水分和温度对呼吸的影响，按照公式（H.2）计算；

NLIM——有效氮对分解的作用，按照公式（H.13）计算；

F ——呼吸参数，取值见表J.6；

L_c ——结构物质中木质素含量 *L_s*（取值为0.3）对分解的影响，按 $L_c = e^{(-3 \times L_s)}$ 计算；

T_m ——土壤质地对活性土壤有机物质周转时间的影响，按 $T_m = (1 - 0.75 \times T)$ 计算，*T* 为粉土和粘土的含量之和。

$$ABF = FIEM \times FMOI \dots\dots\dots (H.2)$$

式中：

FTEM——温度对呼吸的影响，按公式（H.3）计算，公式中 *TEM* 为每天的平均温度；

FMOI——土壤水分的影响因子，按公式（H.4）计算。

$$FTEM = \begin{cases} 0 & TEM \leq -5.0 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 0.04 & -0.5 \text{ } ^\circ\text{C} < TEM \leq 0 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 0.04 + 0.06 \times TEM & 0 \text{ } ^\circ\text{C} < TEM \leq 5.0 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 0.07 + 0.016 \times (TEM - 5.0) & 5.0 \text{ } ^\circ\text{C} < TEM \leq 10.0 \text{ } ^\circ\text{C} \dots\dots\dots (H.3) \\ 0.15 + 0.03 \times (TEM - 10.0) & 10.0 \text{ } ^\circ\text{C} < TEM \leq 35.0 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 0.95 & 35.0 \text{ } ^\circ\text{C} < TEM \leq 40.0 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 0.95 - 0.135 \times (TEM - 40.0) & 40.0 \text{ } ^\circ\text{C} < TEM \leq 47.0 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 0 & TEM > 47.0 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases}$$

土壤水分通过在低土壤含水量下对水分有效性的作用和在高土壤含水量下对氧有效性的作用来影响分解作用。土壤水分的影响因子 *FMOI* 按公式（H.4）计算。

$$FMOI = 0.8MSAT^a + 0.2 \dots\dots\dots (H.4)$$

式中：

MSAT——参数，其值取决于土壤结构，见表J.7；

a ——参数，按公式（H.5）计算。

$$a = [(MOS^b - MOPT^b)/(MOPT^2 - 100^b)]^2 \dots\dots\dots (H.5)$$

式中:

MOS ——土壤相对含水量, 计算方法见附录I;

$MOPT$ ——分解作用的最优土壤含水量;

b ——参数, 其值取决于土壤结构, 见表J.7。

在有机质分解过程中, 如果释放的氮不满足分解微生物的条件, 分解速率将会降低, $NLIM$ 定量表达了有效氮对分解的影响, 按下面方法计算。

微生物利用的潜在碳 (C_a , $gC \cdot m^{-2} \cdot mon^{-1}$) 和潜在氮 (N_a , $g \cdot N \cdot m^{-2} \cdot mon^{-1}$) 按公式 (H.6) 和公式 (H.7) 进行估算:

$$C_a = \sum_i OM_i K_i \dots\dots\dots (H.6)$$

$$N_a = \sum_i OM_i K_i (CN_i)^{-1} \dots\dots\dots (H.7)$$

式中:

i ——1, 2, ..., 8, 表示不同的碳库;

OM_i ——各个碳库的大小;

K_i ——各个碳库潜在衰变率;

CN_i ——各个碳库的碳氮比, 按公式 (H.8) 取值。

$$CN = \begin{cases} 150 & i = 1,2 \\ 8.0 & i = 3,4 \\ 0.18/NITG & i = 5,6 \\ 20.0 - 400.0 * NITG & i = 7 \\ 16.0 - 600.0 * NITG & i = 8 \end{cases} \dots\dots\dots (H.8)$$

式中, $NITG$ 是木质素含量, 与植被功能型相关, 森林和灌丛取值为 0.008, 其他植被取值为 0.012。

氮的潜在需要和提供量之间的平衡用 β ($g \cdot N \cdot m^{-2} \cdot month^{-1}$) 表示, 并按公式 (H.9) 计算。

$$\beta = N_a + N_{av} - \varepsilon C_a / CN_j \dots\dots\dots (H.9)$$

式中:

N_{av} ——土壤中已有的矿化氮;

ε ——同化效率, $\varepsilon = 1 - F$, 例如, 被分解的碳中被用来合成微生物组织的部分。

J ——微生物库3和4, 它们具有相同的碳氮比;

如果 $\beta < 0$, 系统受氮的限制, 各个库的衰变率降低程度见公式 (H.10) - 公式 (H.13)。

$$NAV_i = N_{a(i)} - \varepsilon C_{a(j)} / CN_j \dots\dots\dots (H.10)$$

$$NSUP = N_{av} + \sum_i NAV_i \quad NAV_i \geq 0 \quad \dots\dots\dots (H.11)$$

$$NNED = \sum_i NAV_i \quad NAV_i < 0 \quad \dots\dots\dots (H.12)$$

$$NLIM_i = \begin{cases} NSUP / NNED & NAV_i < 0 \\ 1.0 & NAV_i \geq 0 \end{cases} \dots\dots\dots (H.13)$$

式中:

NAV_i ——库 i 中分解过程中的潜在矿化 (或固定) 氮, $NAV_i < 0$, 则库 i 受氮的限制;

$NSUP$ ——受氮限制的库中支持分解过程的氮量;

$NNED$ ——在受氮限制的库中的氮需求量;

$NLIM_i$ ——值为 0~1, 表示氮对库 i 分解作用的限制。

附录 I
(资料性)
气象数据插值方法

气象数据可利用Anuspline软件或ArcGIS软件进行插值。Anuspline是一种采用平滑样条函数对多变量数据进行分析 and 插值的工具,即使用函数逼近曲面的一种方法,它能够对数据进行合理的统计分析和数据诊断,并可以对数据的空间分布进行分析进而实现空间插值的功能,其插值方法见公式(I.1)。

$$r_i = f(x_i, y_i, h_i) + \varepsilon_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad \text{..... (I. 1)}$$

式中:

- r_i ——因变量观测值;
 f ——未知的连续平滑函数,可按照公式(I.2)计算;
 x_i, y_i, h_i ——分别是作为自变量的数据点*i*的经度、纬度和高程。
 ε_i ——误差项。

$$f(x) = \sum_{j=1}^m a_j \Phi_j(x) + \sum_{i=1}^n b_i \Psi(r_i) \quad \text{..... (I. 2)}$$

式中:

- m ——是低次多项式的个数,由自变量的维数、协同变量数等决定;
 j ——单项式序数;
 a_j ——未知系数;
 Φ_j ——第*j*个单项式;
 n ——观测数;
 b_i ——未知系数;
 Ψ —— r_i 的函数;
 r_i —— x 和 x_i 的距离。

公式(I.2)右边的第一项代表局部趋势函数,第二项代表基本函数。

插值生成的气候曲面(surface)是一组样条函数多项式,表达的是气候变量在插值区域内沿水平和垂直方向发生的变化规律,本身不具有空间分辨率的内涵,之后借助数字高程(DEM)提供的三维空间信息,即可推算插值区域内任意一点的气候变量内插值。根据统计误差和广义交叉验证(GCV)的结果来判断插值质量。

附录J
(资料性)

陆地生态系统过程模型相关参数参考表

表J.1-表J.1给出了陆地生态系统过程模型相关参数的参考值。

表 J.1 IGBP 全球土地覆被分类系统

编号	类型	含义
1	常绿针叶林	覆盖度大于 60%和高度超过 2 m, 且常年绿色, 针状叶片的乔木林地
2	常绿阔叶林	覆盖度大于 60%和高度超过 2 m, 且常年绿色, 具有较宽叶片的乔木林地
3	落叶针叶林	覆盖度大于 60%和高度超过 2 m, 且有一定的落叶周期, 针状叶片的乔木林地
4	落叶阔叶林	覆盖度大于 60%和高度超过 2 m, 且有一定的落叶周期, 具有较宽叶片的乔木林地
5	混交林	前四种森林类型的镶嵌体, 且每种类型的覆盖度不超过 60%
6	郁闭灌木林	覆盖度大于 60%, 高度低于 2 m, 常绿或落叶的木本植被用地
7	稀疏灌木林	覆盖度在 10%~60%之间, 高度低于 2 m, 常绿或落叶的木本植被用地
8	有林草地	森林覆盖度在 30%~60%之间, 高度超过 2 m, 和草本植被或其它林下植被系统组成的混合用地类型
9	稀树草原	森林覆盖度在 10%~30%之间, 高度超过 2 m, 和草本植被或其它林下植被系统组成的混合用地类型
10	草地	由草本植被类型覆盖, 森林和灌木覆盖度小于 10%
11	永久湿地	常年或经常覆盖着水(淡水、半咸水或咸水)与草本或木本植被的广阔区域, 是介于陆地和水体之间的过渡带
12	农田	由农作物覆盖, 包括作物收割后的裸露土地; 永久的木本农作物可归类于合适的林地或者灌木覆盖类型
13	城镇与建成区	被建筑物覆盖的土地类型
14	农田与自然植被镶嵌体	由农田、乔木、灌木和草地组成的混合用地类型, 且任何一种类型的覆盖度不超过 60%
15	冰雪	常年由积雪或者冰覆盖的土地类型
16	裸地	裸地、沙地、岩石, 植被覆盖度不超过 10%
17	水体	海洋、湖泊、水库和河流, 可以是淡水或咸水

表 J.2 中国制土壤质地分类(1981)

土壤质地	颗粒组成(%)			
	质地名称和编号	砂粒(1~0.05)	壤粒(0.05~0.01)	粘粒(0.001)
砂土	粗砂土 21	>70	-	<30
	细砂土 22	[60, 70]		
	面砂土 23	[50, 60)		
壤土	砂粉土 31	≥20	≥40	<30
	粉土 32	<20	<40	
	砂壤土 33	≥20		
	壤土 34	<20		
	砂粘土 35	≥50	-	
粘土	粉粘土 41	-	-	[30, 35)
	壤粘土 42			[35, 40]
	粘土 43			>40

表 J.3 不同植被类型的默认光合作用参数

植被类型	最高光合温度 T_{max}/K	最适光合温度 T_{opt}/K	最低光合温度 T_{min}/K	最大光合速率 $V_{max}/kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
常绿针叶林	323	298	269	2.85
常绿阔叶林	323	303	271	4.32
落叶针叶林	313	295	270	2.85
落叶阔叶林	318	298	270	2.85

表J.3 不同植被类型的默认光合作用参数（续）

植被类型	最高光合温度 T_{max}/K	最适光合温度 T_{opt}/K	最低光合温度 T_{min}/K	最大光合速率 $V_{max}/kg\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$
混交林	313	298	273	2.85
郁闭灌丛	308	298	268	2.85
稀疏灌丛	308	298	275	1.47
有林草地	313	298	271	1.47
草地	308	298	273	2.80
高寒草甸	306	296	271	2.80
农作物	313	298	268	4.32
农作物/自然植被	313	298	268	4.32
荒漠草原	308	295	268	2.5
荒漠	308	295	268	2.5

表 J.4 不同植被类型的默认呼吸参数

每千克干物质中二氧化碳含量单位为千克每千克秒

植被类型	$C_{rg}(1)$	$C_{rg}(2)$	$C_{rg}(3)$	$C_{rn}(1)$	$C_{rn}(2)$	$C_{rn}(3)$
常绿针叶林	0.25	0.25	0.25	0.00123	0.00034	0.00012
常绿阔叶林	0.25	0.25	0.25	0.00185	0.00034	0.00012
落叶针叶林	0.25	0.25	0.25	0.00123	0.00034	0.00012
落叶阔叶林	0.25	0.25	0.25	0.00185	0.00034	0.00012
混交林	0.25	0.25	0.25	0.00150	0.00034	0.00012
郁闭灌丛	0.25	0.25	0.25	0.00064	0.00005	0.00012
稀疏灌丛	0.25	0.25	0.25	0.00064	0.00005	0.00012
有林草地	0.25	0.25	0.25	0.00202	0.00005	0.00012
草地	0.25	0.0	0.25	0.00123	0.0	0.00145
高寒草甸	0.25	0.0	0.25	0.00123	0.0	0.00145
农作物	0.25	0.25	0.25	0.00185	0.00005	0.00012
农作物/自然植被	0.25	0.25	0.25	0.00185	0.00005	0.00012
荒漠草原	0.25	0.0	0.25	0.00080	0.00005	0.00012
荒漠	0.25	0.0	0.25	0.00080	0.00005	0.00012

注： $C_{rg}(1)$, $C_{rg}(2)$, $C_{rg}(3)$ 分别为叶、茎、根的生长呼吸参数， $C_{rn}(1)$, $C_{rn}(2)$, $C_{rn}(3)$ 为叶、茎和根的维持呼吸系数。

表 J.5 不同植被类型的默认形态参数

单位为米

植被类型	冠层顶高度	冠层底高度
常绿针叶林	14	4
常绿阔叶林	14	4
落叶针叶林	14	4
落叶阔叶林	14	4
混交林	14	4
郁闭灌丛	3.0	1.5
稀疏灌丛	1.0	0.2
有林草地	1.5	0.4
草地	0.5	0.01
高寒草甸	0.5	0.01
农作物	0.8	0.01
农作物/自然植被	0.8	0.01
荒漠草原	0.4	0.01
荒漠	0.4	0.01

表 J.6 土壤有机碳库最大衰变速率和呼吸参数

土壤有机碳库		衰变速率 (K)	呼吸参数 (F)	土壤有机碳库	衰变速率 (K)	呼吸参数 (F)
土壤凋落物	结构	3.9	0.6	地表微生物	6.0	0.6
	新陈代谢	14.8	0.55	土壤微生物	7.3	0.55
根凋落物	结构	4.8	0.55	慢速碳	0.2	0.55
	新陈代谢	18.5	0.6	钝性碳	0.0045	0.55

表 J.7 用于估算土壤水分对分解作用影响的土壤参数

参数	沙土	砂壤土	砂质粘土	粘壤土	粘土
$MOPT$	59.0	64.0	68.0	71.0	73.0
$MSAT$	0.5000	0.5625	0.6250	0.6875	0.7500
b	0.356	0.308	0.140	-0.624	-1.883

表 J.8 不同叶面积指数下的穿透雨比例

叶面积指数 (LAI)	穿透雨比例 ($tf(lai)$)
1	1.0
2	0.95
3	0.935
4	0.92
5	0.905
6	0.89
7	0.875
8	0.86
9	0.845
10	0.83
11	0.815
12	0.8
13	0.785

附录K
(资料性)
植物群落调查和土壤取样方法

K.1 植物群落样方调查方法和观测指标

可按照《陆地生态系统生物观测指标与规范》，进行乔、灌、草的群落结构特征调查。记录主要调查样点（样地）位置信息、气候要素、海拔、地形特征（坡度、坡向、坡位等）和土壤类型、林火情况等数据。森林、灌丛、草地、农田等生态系统的样方调查方法如下。

- a) **森林生态系统：**在森林生态系统调查样点设置 4 个 $30\text{ m} \times 40\text{ m}$ （最小不能小于 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ ）乔木调查样方，在每个乔木样方内分别设置 2 个 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 灌木调查样方和 4 个 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 草本调查样方。调查样方设置示意图 K.1。乔木样方内调查优势种和建群种的物种名称，分物种调查每株乔木胸径（大于 0.1 cm 计入乔木）、高度、冠幅，确定林龄；灌木样方分物种调查每株灌木基径、高度、冠幅、多度（用 Drude 的 7 级制划分）；草本样方分物种调查其高度（营养高度和生殖高度）、盖度、密度、多度和生物量，层间植物（藤本、附生、寄生植物）分物种调查基茎、长度、蔓数，采用烘干法测定每个物种的生物量。调查完成后，分别取乔、灌、草植物样品，测定根、茎、叶的含碳量，生物量乘上含碳量得到样方的植被碳密度，在草本样方内收集地表凋落物，并采用烘干法测定凋落物量。各指标的详细测定方法见《陆地生态系统生物观测指标与规范》。

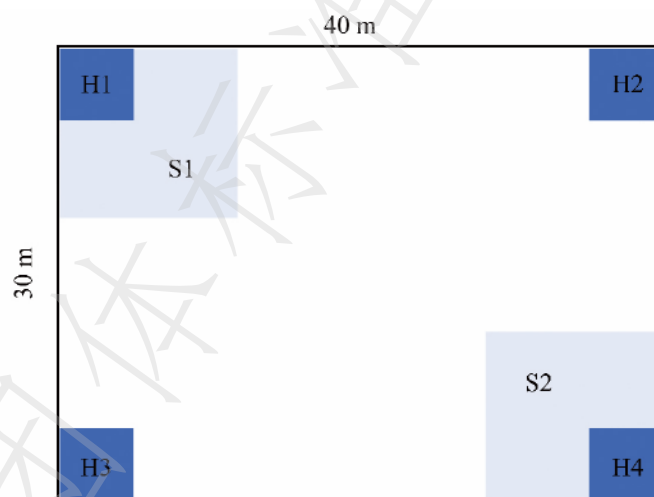


图 K.1 森林调查样方设置示意图

- b) **农田生态系统：**在农田调查样点，分别设置 8 个 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 调查样方（玉米等高大作物调查则需设置 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ ），在样方内调查作物密度、比叶面积、生物量。生物量或比叶面积测定样品采样时可采用标准株调查采样法，即：选取一定的代表株进行测定，以此得到样方值，进而得到作物群体特征值。不同作物每采样点取样株数为：小麦 20 株、水稻 3~5 穴、玉米 3~5 株、棉花 3~5 株、大豆 10 株。具体取样时，把各选定标准株的地上部分齐地剪割，同时将标准株叶片与其他器官分开保存，在实验室烘干后，分别进行测定标准株叶片和其他部分的生物量。各指标的详细测定方法见《陆地生态系统生物观测指标与规范》。
- c) **其他生态系统：**在草地、灌丛、荒漠和湿地生态系统调查样点设置 8 个 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ （或 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ ）调查样方，在每个草本样方分物种调查其高度（营养枝高度和生殖枝高度）、盖度、密度和生物量，采用烘干法测定每个物种的生物量。调查完成后，收集地表凋落物，并采用烘干法测定凋落物量。各指标的详细测定方法见《陆地生态系统生物观测指标与规范》。

K.2 土壤样品采集方法和测试指标

在群落调查样方内采集土壤样品，土壤样品采集技术宜按照GB/T 36197—2018执行。利用土钻法进行样品采集，土壤取样分0 cm~10 cm、10 cm~30 cm、30 cm~50 cm、50 cm~100 cm四层进行土壤取样，取样量约500 g左右，首先测定各层土壤含水量、饱和含水量、田间持水量和凋萎系数等水分参数，取得的土壤样品风干后送往专业实验室进行土壤有机碳、容重、颗粒组成和全氮量的测定，测定方法见表K.1。

表 K.1 植物和土壤样品测定指标和方法

测定指标	分析方法	方法来源
土壤有机碳	重铬酸钾氧化	GB 15618—2018
土壤全氮	半微量凯氏法	GB 15618—2018
土壤容重	环刀法	GB 15618—2018
颗粒组成	吸管法/激光粒度分析仪	GB 15618—2018
土壤含水量	烘干法	GB 15618—2018
土壤饱和含水量	环刀法	GB 15618—2018
土壤田间持水量	环刀法	GB 15618—2018
凋萎系数	环刀法	GB 15618—2018
生物量	收获法	-
植物样品含碳率	同土壤有机碳分析方法	GB 15618—2018

附录L
(资料性)
模型评价的统计参数及计算方法

L.1 决定系数 (R^2)

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right]^2 \dots\dots\dots (L.1)$$

式中:

O_i 、 P_i ——分别是时间步长 i 上的观测值和模拟值;

\bar{O} 、 \bar{P} ——分别是观测值和模拟值的平均值。

L.2 均方差 (Mean squar error, MSE)

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n} \dots\dots\dots (L.2)$$

均方差可以分为系统性均方差 (systematic mean squar error, MSE_s) 和非系统性均方差 (unsystematic mean squar error, MSE_u)。如果 $y_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 是由模拟值与观测值线形拟合方程计算的值,则观测值与 y_i 之间的均方差就表示为模拟值与观测值之间的系统性偏差(计算见公式(L.3)),而模拟值与 y_i 之间的均方差就表示为模拟值与观测值之间的非系统性偏差(计算见公式(L.4))。

$$MSE_s = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - O_i)^2}{n} \dots\dots\dots (L.3)$$

$$MSE_u = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - p_i)^2}{n} \dots\dots\dots (L.4)$$

L.3 Nash-Sutcliffe 效率系数 (NS)

NS 是1减去均方差与观测值变异的比,按照公式(L.5)计算得到。

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \dots\dots\dots (L.5)$$

NS 的值从负的无穷大(表示模型效果差)到1(模型效果好)。如果模拟与观测之间的方差(分子)和观测方差(分母)一样大,则 $NS = 0$;如果模拟与观测之间的方差超过了观测方差,则 $NS < 0$;如果模拟与观测之间的方差趋近于0,则模型很好地模拟了观测值的变化, NS 趋近于1。

附录M
(资料性)
土壤含水量模拟方法

土壤水分 (MOS) 取决于降水 ($PRCP$) 注入的水量 WAT 和通过蒸散 (ET) 损失的量:

$$MOS_m = \min\{[MOS_{m-1} + WAT - ET], MOS_{sat}\} \dots\dots\dots (M. 1)$$

式中:

m ——计算的时间步长;

WAT ——总的输入水量, 包括降雨和雪水融化, 计算见公式 (M. 5);

ET ——总的输入水量, 包括降雨和雪水融化, 计算见公式 (M. 6);

MOS_{sat} ——土壤饱和含水量, 当土壤含水量比 $SMOS_{sat}$ 高时, 水就以径流的形式流失掉。

降雪和降水之间的区分 (Aber & Federer 1992) 见公式:

$$SNFC = \begin{cases} 0.0 & TEM \geq 2^\circ C \\ (TEM - 2.0)/(-7.0) & -5^\circ C < TEM < 2^\circ C \\ 1.0 & TEM \leq -5^\circ C \end{cases} \dots\dots\dots (M. 2)$$

式中:

$SNFC$ ——降雪形式的降水量;

TEM ——月平均温度, 根据Aber & Federer(1992)的研究, 当 TEM 大于 $1^\circ C$ 时雪开始融化, 此时雪量为最大值 $SNME = 15TEM$ 。

$SNME$ 为积雪融化进入土壤的水量, 这样, 进入土壤的水量则为:

$$WATI = PRCP(1 - SNFC) + SNME \dots\dots\dots (M. 3)$$

冠层对降水具有截留作用, 截留量的大小取决于叶面积指数的大小, 在CEVSA模型中, 规定了不同叶面积指数的穿透雨比例, 对冠层的降水截留作用用公式 (M. 4) 表示:

$$iterc = PRCP(1.0 - tf(lai)) \dots\dots\dots (M. 4)$$

式中:

$iterc$ ——冠层截留的降水量;

$tf(lai)$ ——叶面积指数为 lai 时, 穿透雨的比例, 取值见表J. 8。

因此, 最后进入土壤中的水量为:

$$WAT = WATI - iterc \dots\dots\dots (M. 5)$$

Penman-Monteith方程通过气孔阻抗与植物的光合同化过程联系在一起, 能够更好地模拟冠层水碳的耦合循环。冠层的蒸散计算见公式 (M. 6)。

$$ET = (sR_n + c_p \rho g_a D) / [\lambda(s + \gamma(1 + g_a/g_n))] \dots\dots\dots (M. 6)$$

式中:

s ——饱和水汽压差对温度的曲线斜率, 单位是帕每摄氏度 ($Pa \cdot ^\circ C^{-1}$);

R_n ——净辐射, 单位是瓦每平方米 ($W \cdot m^{-2}$);

c_p ——空气的比热, 单位是焦耳每克摄氏度 ($J \cdot g^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$);

ρ ——是空气密度, 单位是克每立方米 ($g \cdot m^{-3}$);

g_a ——边界层导度, 单位是米每秒 ($m \cdot s^{-1}$), 是冠层高度 h (m)的标准对数函数, 计算见公式 (M. 7);

D ——水汽压差, 单位是帕 (Pa);

λ ——是干湿表常数, 单位是焦耳每克 ($J \cdot g^{-1}$);

γ ——蒸发潜热, 单位是帕每摄氏度 ($Pa \cdot ^\circ C^{-1}$);

g_n ——冠层气孔导度, 计算见公式, 计算见公式 (M. 8)。

$$g_a = 3.39 / \ln^2 [(200 - 7h)/h] \dots\dots\dots (M. 7)$$

式中:

h ——冠层高度, 是叶面积指数 (LAI) 的一个简单函数, $h = 0.807LAI^{2.137}$ 。

g_n 是非摩尔气孔导度，与冠层导度相关，计算见公式(M. 8)：

$$g_n = 8.3144T_k g_c / (1000P_a) \dots\dots\dots (M. 8)$$

式中：

T_k ——绝对温度，单位为开尔文（K）；

g_c ——冠层导度，单位为毫摩尔每平方米秒（ $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ），在模型中是各层叶片气孔导度的加和；

P_a ——大气 CO_2 分压，单位为（Pa）。

全国团体标准信息平台

参 考 文 献

- [1] GB 15618—2018 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）
- [2] GB/T 21010—2017 土地利用现状分类
- [3] 于贵瑞,孙晓敏等著. 陆地生态系统通量观测的原理与方法[M]. 北京:高等教育出版社,2017
- [4] 于贵瑞,孙晓敏主编. 中国陆地生态系统碳通量观测技术及时空变化特征[M]. 北京:科学出版社,2008
- [5] 潘贤章,郭志英,潘凯. 陆地生态系统土壤观测指标与规范[M]. 北京:中国环境出版集团,2019
- [6] 吴冬秀,张琳,宋创业,张淑敏. 陆地生态系统生物观测指标与规范[M]. 北京:中国环境出版集团,2019
- [7] 田汉勤,刘明亮,张弛,等. 全球变化与陆地系统综合集成模拟-新一代陆地生态系统动态模型(DLEM)[J]. 地理学报,2010,65(9):1027-1047 [TIAN Han-qin, LIU Ming-liang, ZHANG Chi et al. The dynamic land ecosystem model (DLEM) for simulating terrestrial processes and interactions in the context of multifactor global change [J]. Acta. Geographica. Sinica, 2010, 65(9):1027-1047]
- [8] Bonan G B. Land-atmosphere CO₂ exchange simulated by a land surface process model coupled to an atmospheric general circulation model[J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100(2): 2817-2831
- [9] Cao M K, Woodward F I. Net primary and ecosystem production and carbon stocks of terrestrial ecosystems and their responses to climate change[J]. *Global Change Biology*, 1998, 4: 185-198
- [10] Chen W J, Chen J, Cihlar J. An integrated terrestrial ecosystem carbon-budget model based on changes in disturbance, climate, and atmospheric chemistry[J]. *Ecological modeling*, 2000, 135: 55-79
- [11] Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATs) version 1e as coupled to the NCAR community climate model. Technical note. [NCAR (National Center for Atmospheric Research)][R]. 1993, <http://www.osti.gov/energycitations/availability.jsp>
- [12] Friend A D. PGEN: an integrated model of leaf photosynthesis, transpiration, and conductance[J]. *Ecological modeling*, 1995, 77: 233-255
- [13] Friend A D, Stevens A K, Knox R G, et al. A process-based, terrestrial biosphere model of ecosystem dynamics (Hybrid v3.0)[J]. *Ecological modeling*, 1997, 95: 249-287
- [14] Ji J J. A climate-vegetation interaction model: simulating physical and biological processes at the surface[J]. *Journal of Biogeography*, 1995, 22: 445-451
- [15] Liu J, Chen J M, Cihlar J, et al. Net primary productivity distribution in the BOREAS region from a process model using satellite and surface data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(27): 735-754
- [16] Liu J X, Price D T, Chen J M. Nitrogen controls on ecosystem carbon sequestration: a model implementation and application to Saskatchewan, Canada[J]. *Ecological modeling*, 2005, 186:178-195
- [17] Oleson K W, Lawrence D M, Bonan G B, et al. Technical description of version 4.0 of the Community Land Model (CLM): NCAR/TN-478+STR NCAR TECHNICAL NOTE[R]. National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado. 2010, <http://www.ucar.edu/library/collections/technotes/technotes.jsp>
- [18] Prince S. 1991. Satellite remote sensing of primary production: Comparison of results for Sahelian grasslands 1981-1988. *International Journal of Remote Sensing*, 12(6):1301-1311

全国团体标准信息平台