

引用格式: 崔晓军, 赵俊芳, 曹云, 等. 面向“双碳”目标的森林植被固碳释氧生态功能气象评价等级标准化研究[J]. 标准化学报, 2026(10): 113–121.

CUI Xiaojun, ZHAO Junfang, CAO Yun, et al. Standardization Research on Meteorological Evaluation Grade of Ecological Function of Carbon Fixation and Oxygen Release of Forest Vegetation Towards the "Dual Carbon" Goal[J]. Journal of Standardization, 2026(10): 113–121.

面向“双碳”目标的森林植被固碳释氧生态功能气象评价等级标准化研究

崔晓军¹ 赵俊芳^{2*} 曹云³ 姜月清³ 李森³ 杨霏云¹

(1. 中国气象局气象干部培训学院; 2. 中国气象科学研究院灾害天气科学与技术全国重点实验室; 3. 国家气象中心)

摘要: 【目的】为响应“双碳”目标对生态气象服务的需求, 围绕气象行业标准QX/T 714—2024《森林植被固碳释氧生态功能气象评价等级》展开系统解析, 梳理其构建的科学、规范的森林植被固碳释氧生态功能气象评价技术体系, 为生态气象标准化建设提供支撑。【方法】该标准采用FORCCHN模型, 以森林净生态系统生产力(C_{NEP})为核心, 定量计算森林植被固碳释氧量; 通过对比当年气象条件下森林固碳释氧量与多年平均气候条件下对应值的相对距平, 构建气象评价指数, 运用自然断点法划分5级评价等级; 从全国尺度(与森林资源清查数据及已有研究对比)和站点尺度(通量站观测数据验证)开展模型有效性验证, 并对评价方法的不确定性来源与适用范围进行系统分析。【结果】全国尺度, 2011—2019年我国森林年平均 C_{NEP} 模拟值为0.199 PgC/a, 与清查数据及研究结论基本一致; 站点尺度, 模拟的 C_{NEP} 与观测值相关系数达0.85以上, 具有显著相关性; 该标准构建的5级评价等级可科学量化气象条件对森林植被固碳释氧生态功能的影响程度。【结论】该标准的评价体系科学可行、适配各级生态相关业务评估与多场景应用、助力生态气象规范化建设及“双碳”目标落地, 落地时需正视多项不确定性问题并依托配套优化举措减小结果偏差。

关键词: 森林植被; 固碳释氧; 气象评价等级; 标准化; FORCCHN模型; 净生态系统生产力; 不确定性

DOI编码: 10.3969/j.issn.2097-857X.2026.10.011

Standardization Research on Meteorological Evaluation Grade of Ecological Function of Carbon Fixation and Oxygen Release of Forest Vegetation Towards the “Dual Carbon” Goal

CUI Xiaojun¹ ZHAO Junfang^{2*} CAO Yun³ JIANG Yueqing³ LI Sen³ YANG Feiyun¹

(1. China Meteorological Administration Training Centre; 2. State Key Laboratory of Severe Weather Meteorological Science and Technology, Chinese Academy of Meteorological Sciences; 3. National Meteorological Centre)

Abstract: [Objective] To meet the requirements of ecological meteorological services in the context of the “Dual Carbon” goal, the systematic interpretation was conducted on the meteorological industry standard QX/T 714—2024, *Grade of meteorological assessment on ecological function of carbon fixation and oxygen release of forest vegetation*. The established scientific and standardized technical system for the meteorological assessment of the ecological function of carbon fixation

基金项目: 本文受国家自然科学基金项目“黄淮海冬小麦拔节孕穗期霜冻害灾变机理解析及精准判识”(项目编号: 42475197); 中国气象局水文气象重点开放实验室开放研究课题“长江流域生态系统调节服务功能演变及其气象影响研究”(项目编号: 23SWQXZ015); 中国气象局创新发展专项“重点生态区典型服务功能气象影响评估技术研发与业务应用”(项目编号: CXFZ2024J052)资助。

作者简介: 崔晓军, 硕士, 正高级工程师, 研究方向为气象标准化、气象教育培训理论与方法、气象科技管理等。

赵俊芳, 通信作者, 博士, 研究员, 研究方向为农业气象、生态气象、气候变化等。

and oxygen release of forest vegetation was sorted out, providing support for the construction of ecological meteorological standardization. [Methods] The forest net ecosystem productivity (C_{NEP}) was adopted as the core indicator. The carbon fixation and oxygen release capacity of forest vegetation was quantitatively calculated using the FORCCHN model. The meteorological evaluation index was constructed by comparing the relative changes in forest carbon sequestration and oxygen release between the current year and multiple years of meteorological conditions, and the five-level grading system was established using the natural breaks method. Model validity was verified at both the national scale (through comparison with forest resource inventory data and existing studies) and the site scale (through comparison with forest flux tower observation data). The uncertainty sources and applicability boundaries of the evaluation method were systematically analyzed. [Results] At the national scale, the simulated annual mean C_{NEP} of forests in China from 2011 to 2019 was estimated to be 0.199 PgC/a, which was found to be generally consistent with inventory data and previous research findings. At the site scale, the simulated C_{NEP} was significantly correlated with observed values, with the correlation coefficient exceeding 0.85. The five-level grading system constructed by this standard can be used to scientifically quantify the influences of meteorological conditions on the ecological function of carbon fixation and oxygen release of forest vegetation. [Conclusion] The evaluation system stipulated by this standard was proven to be scientifically robust and reliable, and was capable of meeting the assessment needs of multi-scale business services at both national and provincial scales. It can support scenario applications such as forestry carbon sequestration assessment and ecological compensation accounting, effectively enhancing the standardization level of ecological meteorological services and scientific support for the achievement of the “Dual Carbon” goals. In practical application, attention should be paid to uncertainty factors, including spatial heterogeneity of model parameters, regional accuracy differences of input data, and sensitivity of the classification method. Strategies such as establishing regionalized parameter libraries, multi-model ensemble simulation, and dynamic baseline updating are recommended to continuously reduce the uncertainty of evaluation results.

Keywords: forest vegetation; carbon fixation and oxygen release; meteorological evaluation grade; standardization; the FORCCHN model; net ecosystem productivity; uncertainty

0 引言

标准化是推动生态气象业务规范化、科学化发展的核心支撑。中国气象科学研究院牵头起草的气象行业标准QX/T 714—2024《森林植被固碳释氧生态功能气象评价等级》^[1], 经中国气象局批准于2024年6月20日发布, 2024年10月1日起实施。本文围绕该标准展开系统解析, 从标准化视角深入探讨森林植被固碳释氧生态功能气象评价的技术体系, 旨在为生态气象业务的标准化建设提供理论支撑与实践参考。

1 研究背景与意义

1.1 生态气象业务的标准化需求

全球气候变化对生态系统的扰动持续加剧,

以及我国生态文明建设的纵深推进对气象服务的支撑能力提出了更高要求。国家层面先后印发《“十三五”生态环境保护规划》《生态文明建设目标评价考核办法》等政策文件, 明确将生态建设气象保障服务纳入气象部门核心职责。中国气象局办公室印发的《生态气象业务服务能力建设实施方案(2020—2022年)》进一步细化了相关工作部署, 明确提出需要系统开展气象条件对生态系统功能变化的定量影响评价。

随着“双碳”目标的深入实施, 政策层面对标准化建设提出了更高要求。2022年10月, 市场监管总局、国家发展改革委等9部门联合印发《建立健全碳达峰碳中和标准计量体系实施方案》, 确立了“双碳”标准体系建设的顶层设计; 2023年4月, 国家标准委、国家发展改革委等11部门联合发布的《碳达峰碳中和标准体系建设指南》, 进一步将

森林固碳增汇评估标准和技术标准纳入国家“双碳”标准体系的碳清除标准子体系。以上举措从政策层面印证了生态气象标准具有前瞻性,也标志着生态气象业务已从单纯的生态监测向服务国家“双碳”大局延伸。

上述政策文件均从制度层面对生态系统功能气象评价工作的规范化、标准化提出了明确要求,相关要求在“十四五”生态气象服务相关工作部署中得到进一步延续和深化。统一的技术方法与评价标准已成为相关政策落地见效的核心技术支撑。在此背景下,QX/T 714—2024的出台是响应国家生态治理与“双碳”目标需求,提升生态气象服务供给能力的重要标准化成果。

1.2 森林生态系统固碳释氧的重要性

森林作为陆地生态系统的主体,在全球碳循环与气候调节中发挥着不可替代的作用。森林生态系统储存了陆地生态系统76%~98%的有机碳,其固碳释氧服务功能对减轻环境压力、削弱“温室效应”具有关键意义。气象条件是影响森林植被固碳释氧量变化的重要驱动因子,温度、降水等气象要素直接影响森林的光合作用与生长发育。因此,开展森林植被固碳释氧生态功能气象评价标准化研究,对于精准评估气象条件对生态系统的影响具有重要价值,而统一的评价标准则是实现相关研究成果向业务服务能力转化的核心前提。QX/T 714—2024的研制正是为了填补这一关键环节的技术空白。

1.3 现有标准梳理与研究定位

当前,国内围绕森林植被固碳释氧生态功能的相关研究仍处于多元探索阶段。在QX/T 714—2024发布前,气象行业尚未形成专门针对森林固碳释氧生态功能的气象评价标准。梳理现有国家标准与行业标准可知,与之相关的标准虽已形成一定基础,但在评价对象、核心指标及气象驱动机制的表征上存在显著差异。

(1) GB/T 38582—2020《森林生态系统服务功能评估规范》^[2]。该标准构建了全国统一的森林生态服务评估指标体系。其评估框架以生态系统

服务的总量核算为核心,但未将光照、温度、降水等气象要素对固碳释氧过程的核心驱动作用纳入评价框架,难以支撑气象条件对生态功能影响的定量归因评估。

(2) GB/T 34815—2017《植被生态质量气象评价指数》^[3]。该标准建立了“气象因子—植被响应—质量评价”的技术框架。然而该标准面向所有植被类型,属于通用性评价规范,未针对森林固碳释氧这一特定生态功能进行专门指标遴选与模型构建。

(3) QX/T 494—2019《陆地植被气象与生态质量监测评价等级》^[4-5]。该标准将卫星遥感数据与地面气象观测相结合,在评价方法的可操作性上有所提升,但其评价对象仍为广义的陆地植被生态质量,未聚焦森林植被固碳释氧功能。

(4) GB/T 42961—2023《植被生态质量的气候变化影响评价方法》^[6]。该标准从气候变化影响视角切入,但侧重于年际和年代际长期趋势评估,在服务“双碳”目标下森林碳汇年度核算与实时监测方面存在不足。

综合上述比较可知,现有标准存在一个共同的结构短板——缺乏专门针对森林植被固碳释氧生态功能、以气象要素为驱动核心的专项评价标准。针对上述行业痛点,气象部门组织研制了QX/T 714—2024《森林植被固碳释氧生态功能气象评价等级》^[1]。该标准的发布有效填补了该领域的标准空白,为科学开展森林植被固碳释氧生态功能的气象影响评估提供了重要的技术支撑和制度依据。

2 研究方法

2.1 评价模型的选择

森林植被固碳释氧量的主流评价方法包括森林定位清查法、涡度相关通量观测法和模型模拟法3类。森林定位清查法可直接估算森林有机碳和CO₂实际蓄积量,但需投入大量人力物力,且无法区分年际气候变化与大气CO₂浓度升高等

因素对净碳蓄积量的独立影响;涡度相关通量观测法是通量观测的常用手段,但观测结果易受地形、局地气象条件干扰;模型模拟法则通过数学模型定量描述生态系统碳循环过程及其与全球气候变化的响应关系。随着遥感、地理信息系统和计算机技术的发展,模型模拟法已成为森林碳循环研究的核心手段。

该标准选用中国森林生态系统碳收支模型 FORCCHN (FORest ecosystem Carbon budget model for China)^[7-9],通过计算森林植被净生态系统生产力(C_{NEP}),实现森林植被固碳释氧量的定量评价。该模型以植物生理学、森林生态学和土壤环境学的基本原理为基础,以个体为基本模拟单元,通过双时间步长运行(日步长模拟光合、呼吸、分配和凋落过程;年步长模拟林分动态更新),可动态模拟森林生态系统的碳循环全过程。

2.2 数据来源与预处理

该标准所采用的多源数据及其关键预处理参数如下:

(1) 气象数据。来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),覆盖全国2 423个地面气象站1981—2020年连续气象观测数据,包括日平均气温、日降水量、日照时数、日相对湿度等要素。在数据预处理中,对缺失率 $\leq 5\%$ 的站点序列采用线性插值法补全,对缺失率 $> 5\%$ 的站点予以剔除;异常值采用 3σ 原则进行识别与替换。

(2) CO_2 浓度数据。来源于美国国家海洋大气局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)的观测数据(<https://www.gml.noaa.gov/>),采用全球月平均 CO_2 浓度值经日尺度插值后输入模型。

(3) 土壤数据。来源于1:100万中华人民共和国土壤图,提取土壤质地、有机碳含量、土层厚度等参数。

(4) 森林植被数据。来源于全球陆地表面卫星数据集(Global Land Surface Satellite (GLASS) Dataset, <http://www.glass.umd.edu/>),提取植被类型分布与叶面积指数(LAI)时空数

据,空间分辨率为 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 。

(5) 验证数据。来源于国家生态数据中心共享数据集(2005—2015年)、全国690个森林样地实测资料及193篇文献记载的 C_{NPP}/C_{NEP} 实测值。

2.3 技术路线

该标准以森林植被净生态系统生产力(C_{NEP})为核心中间量,分3步开展固碳释氧量评价:

(1) 模型驱动与参数计算。依托全国2 423个地面气象站1981—2020年连续气象观测数据,结合土壤、植被类型等基础资料,通过FORCCHN模型计算单位面积森林植被的净初级生产力(C_{NPP})和净生态系统生产力(C_{NEP})。

(2) 模型有效性验证。从多维度验证FORCCHN的模拟精度:在全国尺度,对比模拟结果与森林资源清查数据、已有研究成果^[7-9];在站点尺度,结合国家生态数据中心共享数据集(2005—2015年)、全国690个森林样地及193篇文献记载的实测资料,开展典型生态系统 C_{NPP} 、 C_{NEP} 的点对点验证;分析全国尺度 C_{NPP} 、 C_{NEP} 的空间分布差异,确认模型的适用性与可靠性。

(3) 固碳释氧量定量评价。基于验证后的森林植被 C_{NEP} ,计算单位面积森林的固碳量与释氧量。

具体技术流程如图1所示。

2.4 森林植被固碳量与释氧量计算方法

2.4.1 森林植被固碳量计算方法

第*i*年单位面积森林植被固碳量按公式(1)计算。

$$C_i = C_{NEP,i} \times \frac{M_{CO_2}}{M_C} \quad (1)$$

式中: C_i 为第*i*年单位面积森林植被固碳量, $kgCO_2/(m^2 \cdot a)$; $C_{NEP,i}$ 为第*i*年单位面积森林净生态系统生产力, $kgC/(m^2 \cdot a)$; $\frac{M_{CO_2}}{M_C}$ 为光合作用转化为 CO_2 的系数,取值3.67。

多年平均气候条件下(1991—2020年气候平均值统计时段,下同)单位面积森林植被固碳量按公式(2)计算。

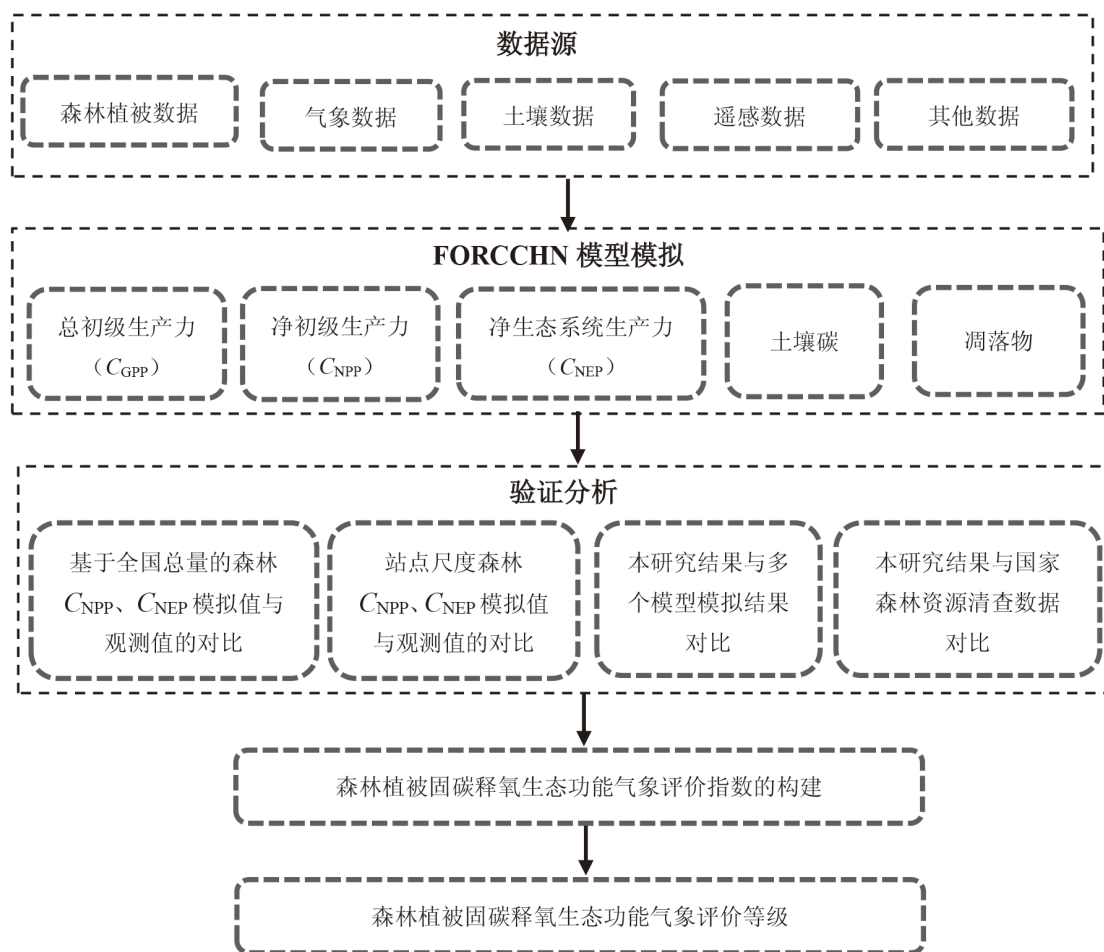


图1 森林植被固碳释氧生态功能气象评价技术流程

$$C_a = C_{NEP,a} \times \frac{M_{CO_2}}{M_C} \quad (2)$$

式中: C_a 为多年平均气候条件下单位面积森林植被固碳量, $\text{kgCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$; $C_{NEP,a}$ 为多年平均气候条件下单位面积森林净生态系统生产力, $\text{kgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$; $\frac{M_{CO_2}}{M_C}$ 为光合作用转化为 CO_2 的系数, 取值3.67。

2.4.2 森林植被释氧量计算方法

第 i 年单位面积森林植被释氧量按公式 (3) 计算。

$$O_i = C_{NEP,i} \times \frac{M_{O_2}}{M_C} \quad (3)$$

式中: O_i 为第 i 年单位面积森林植被释氧量, $\text{kgO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$; $C_{NEP,i}$ 为第 i 年单位面积森林净生态系统生产力, $\text{kgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$; $\frac{M_{O_2}}{M_C}$ 为光合作用转化为 O_2 的系数, 取值2.67。

多年平均气候条件下单位面积森林植被释氧量按公式 (4) 计算。

$$O_a = C_{NEP,a} \times \frac{M_{O_2}}{M_C} \quad (4)$$

式中: O_a 为多年平均气候条件下单位面积森林植被释氧量, $\text{kgO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$; $C_{NEP,a}$ 为多年平均气候条件下单位面积森林净生态系统生产力, $\text{kgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$; $\frac{M_{O_2}}{M_C}$ 为光合作用转化为 O_2 的系数, 取值2.67。

2.5 气象评价指数与等级划分

2.5.1 气象评价指数

该标准通过计算当年气象条件下森林植被固碳释氧量与多年平均气候条件下对应值的相对距平，构建森林植被固碳释氧生态功能气象评价指数。

第*i*年单位面积森林植被固碳功能气象评价指数按公式(5)计算。

$$F_c = \frac{C_i - C_a}{C_a} \tag{5}$$

式中：*F_c*为森林植被固碳功能气象评价指数；*C_i*为第*i*年单位面积森林植被固碳量，kgCO₂/(m²·a)；*C_a*为多年平均气候条件下单位面积森林植被固碳量，kgCO₂/(m²·a)。

第*i*年单位面积森林植被释氧功能气象评价指数按公式(6)计算。

$$F_o = \frac{O_i - O_a}{O_a} \tag{6}$$

式中：*F_o*为森林植被释氧功能气象评价指数；*O_i*为第*i*年单位面积森林植被释氧量，kgO₂/(m²·a)；*O_a*为多年平均气候条件下单位面积森林植被释氧量，kgO₂/(m²·a)。

2.5.2 气象评价等级的划分

该标准采用自然断点法结合生态气象业务需求，将森林植被固碳释氧生态功能气象评价等级划分为5级，具体判别指标见表1^[1]。当固碳功能与释氧功能评价指数处于不同等级时，选取两者中更低的等级作为最终评价等级。

表1 森林植被固碳释氧生态功能气象评价等级

等级	森林植被固碳 (<i>F_c</i>)、释氧 (<i>F_o</i>) 功能气象评价指数
很好	$F_c \geq 0.65$ 或 $F_o \geq 0.65$
较好	$0.35 \leq F_c < 0.65$ 或 $0.35 \leq F_o < 0.65$
正常	$-0.35 \leq F_c < 0.35$ 或 $-0.35 \leq F_o < 0.35$
较差	$-0.65 \leq F_c < -0.35$ 或 $-0.65 \leq F_o < -0.35$
很差	$F_c < -0.65$ 或 $F_o < -0.65$

3 标准技术方法的验证

3.1 全国尺度验证

采用FORCCHN模型模拟全国森林植被净生态系统生产力*C_{NEP}*的动态变化，并与国家森林资源清查数据及已有研究结果进行对比分析，详见表2。

根据已有研究，我国森林在1999—2012年表现为显著碳汇，*C_{NEP}*为0.187 PgC/a^[12]，1990—2007年*C_{NEP}*为0.159 PgC/a^[11]。另一研究结果显示，我国森林*C_{NEP}*从2003—2008年的0.152 PgC/a增加到2020—2050年的0.194 PgC/a^[13]。该标准对2011—2019年的模拟值(0.199 PgC/a)略高于此前研究，主要原因在于该标准充分考虑了我国大面积中幼龄人工林的快速生长效应。总体而言，模拟结果与已有研究结论基本一致，表明FORCCHN模型能够满足全国尺度森林植被固碳释氧量的业务评估要求。

3.2 站点尺度验证

基于国家生态数据中心资源共享服务平台提供的中国典型森林生态系统碳循环研究参照数据

表2 FORCCHN模型估算的*C_{NEP}*与国家森林资源清查数据及已有研究结果的对比

方法	研究时段	全国森林 <i>C_{NEP}</i> 值/(PgC·a ⁻¹)	文献来源
国家森林资源清查数据	1981—2000年	0.115 ~ 0.145	[10]
国家森林资源清查数据	1990—2007年	0.159	[11]
国家森林资源清查数据	1999—2012年	0.187	[12]
国家森林资源清查数据和模型模拟	2003—2008年	0.152	[13]
国家森林资源清查数据和模型模拟	2020—2050年	0.194	[13]
FORCCHN 模型模拟	2011—2019年	0.199	本文

集(2005—2015年)和全国690个森林样地及193篇文献记载的实测资料,选取湖北神农架、广东鼎湖山、云南西双版纳、江西千烟洲和吉林长白山5个生态系统通量站开展站点尺度验证。其中,云南西双版纳和湖北神农架站连续观测序列较长、数据质量较优,作为典型站点开展详细对比分析。对比分析2005—2015年云南西双版纳和湖北神农架2个站点森林植被 C_{NEP} 模拟值和观测值可知,FORCCHN模型可以很好地模拟出2个站点多年的森林净生态系统生产力(C_{NEP}),模拟的 C_{NEP} 与样地观测值的相关系数达到0.85以上,通过了0.01的显著性水平检验,具有显著相关性。这进一步表明,该标准的评价方法在站点尺度上具有较高的准确性,能够有效反映气象条件对森林植被固碳释氧功能的影响(见图2)。

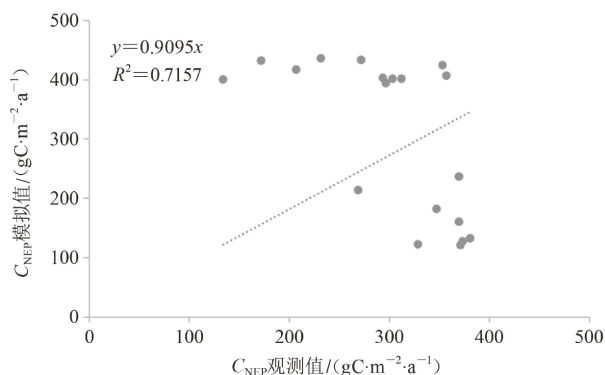


图2 2005—2015年云南西双版纳和湖北神农架站森林植被 C_{NEP} 模拟值与实测值对比

4 讨论

4.1 评价方法的模型不确定性分析

尽管FORCCHN模型在全国尺度和站点尺度均通过了有效性验证,但该方法仍存在多重不确定性,需在应用过程中予以关注。

(1) 模型参数的不确定性。FORCCHN模型涉及光合作用参数、呼吸作用参数和碳分配参数等多个参数集。这些参数的取值主要来源于文献整合与局地观测数据,在不同森林类型和气候区

之间存在显著的空间异质性。该标准采用的分树种参数化方案虽较已有研究进行了细化,但同一树种类型内部仍存在较大变异。参数取值的空间代表性不足是模拟结果不确定性的重要来源。

(2) 输入数据的不确定性。气象观测数据的空间插值误差(尤其是在站点稀疏的青藏高原和西部山区)、遥感植被参数(如LAI)的反演误差及土壤属性数据的空间分辨率限制,均会通过模型传播至最终评价结果。据估算,在气象站点密度低于每万平方千米1个站的区域, C_{NEP} 模拟值的不确定性可达 $\pm 20\% \sim \pm 30\%$ 。

(3) 模型结构的不确定性。FORCCHN模型未显式考虑氮循环对碳固定的限制作用,也未纳入森林病虫害、火灾等自然扰动和采伐等人为活动的动态影响。近年来研究表明,氮沉降对森林碳汇的贡献不容忽视^[14],而扰动事件可导致区域碳汇短期内转为碳源。模型结构的这些简化处理在一定程度上制约了评价结果的完整性。

(4) 等级划分方法的不确定性。该标准采用自然断点法(Jenks算法)确定5级评价等级的阈值。该方法通过最小化类内离差平方和实现最优分类,但当数据分布存在明显偏态或多峰特征时,断点可能集中在数据密集区而忽略实际生态意义的边界。此外,自然断点法对类别数(k 值)的选择较为敏感—— k 值过小会掩盖重要等级差异, k 值过大会引入噪声。该标准采用的5级划分方案在统计最优性与业务可操作性之间取得了平衡,但不同森林类型、不同气候区的最优分级方案可能存在差异,未来可结合区域实测数据开展分级方案的敏感性检验。

4.2 评价方法的适用性与局限性

该标准评价方法的适用性并非全域均质,在空间尺度、时间尺度和森林类型3个维度上均存在明确的边界条件与约束。

(1) 空间适用范围。该标准适用于全国尺度及省级尺度的森林植被固碳释氧功能气象评价,但不同区域的应用精度存在差异。在站点密集的东部季风区,气象数据插值精度高,模型模拟效

果较好(C_{NEP} 验证相关系数 >0.85);在站点稀疏的西部地区,数据支撑不足,建议加密气象观测或引入卫星遥感反演产品作为补充数据源。

(2) 时间适用范围。该标准采用的基准时段(1991—2020年)符合世界气象组织(WMO)关于气候平均值的推荐规范^[15]。但在气候变化加速背景下,基准时段的选择会显著影响评价指数的计算结果。若未来30年气候平均值发生系统性偏移,现行基准可能高估或低估气象条件的实际影响程度,建议每5年对基准时段进行滚动更新评估。

(3) 森林类型适用范围。FORCCHN模型参数针对天然林和人工林均有适配,但对人工林(尤其是速生丰产林)的模拟效果优于原始老龄林,原因在于老龄林的土壤呼吸过程更复杂、碳储量变化更为缓慢。建议在将模型应用于原始林和热带雨林等特殊森林类型时,适当调整相关参数并开展本地化验证。

5 标准实施应用建议

该标准可应用于以下领域:(1)对接气象部门生态气象监测评估常规业务,开展年度/季度森林固碳释氧功能气象影响评价;(2)林业部门森林生态服务功能价值核算,为生态补偿机制建立提供气象维度参考依据;(3)地方政府生态文明建设考核,支撑生态保护成效的科学评估;(4)

“双碳”目标下林业碳汇潜力评估,为碳汇交易项目提供基础技术支撑。基于前文的不确定性分析及标准推广应用的实际需求,在标准实施应用过程中建议从以下5个层面系统推进。

5.1 夯实多源数据底座,提升数据支撑能力

整合气象、林业、生态环境等部门的气象观测、森林清查、土壤理化数据,建立覆盖全国森林区的标准化基础数据库;推动跨部门数据共享平台建设,在站点稀疏的西部和青藏高原等重点生态区补充监测站点,加密观测网络。在此基础上,推进卫星遥感植被参数(叶面积指数、光合有效辐射吸收比等)与FORCCHN模型的数据同化

研究,通过集合卡尔曼滤波等数据同化方法实时优化模型状态变量,提升评价结果的时空精度与可靠性。同时,制定数据清洗与校验规范,建立年度动态更新机制,保障数据的时效性与准确性。

5.2 构建区域化参数库与多模型集成评价体系

鼓励各省级气象部门基于本地森林清查数据和通量观测资料,对FORCCHN模型的关键参数(如最大羧化速率、呼吸温度敏感性系数、根冠比等)开展本地化校准,逐步形成覆盖全国主要森林类型的区域化参数库。在条件允许的区域,可引入Biome-BGC、CENTURY等多个碳收支模型开展集合模拟,通过多模型均值降低单一模型的结构偏差,并利用模型间的离差范围量化评价结果的不确定性。

5.3 建立动态基准更新与不确定性报告制度

建议将基准时段的滑动窗口设置为30年,每5年进行一次滚动更新,以削弱气候变化背景下气候平均值系统性偏移对评价结果的影响;同时针对气候变化敏感区域(如北方森林过渡带、西南高山林区),增设极端气候年份的专项评估模块。在标准实施中,要求各级业务部门在发布评价结果时同步报告不确定性区间(如90%置信区间),避免将点估计值作为唯一决策依据,增强评价结果在碳汇交易、生态补偿等领域的可信度与决策参考价值。

5.4 分层分类开展技术培训与能力建设

针对省级及以上人员开展模型原理、误差分析与数据同化等深度培训,针对基层人员聚焦操作流程、结果解读与不确定性报告等实用技能开展培训;开发“理论+实操”一体化课程,搭建在线培训平台并建立考核机制;组建专家技术组,定期赴基层现场指导,形成“培训—实践—反馈”的能力提升闭环。

5.5 分区域梯度推进试点应用,建立标准动态优化机制

优先选取黑龙江(北方寒温带针叶林)、浙江(亚热带常绿阔叶林)、云南(热带与亚热带山地森林)等森林类型典型省份开展试点;制定试点实施方案,定期收集业务反馈,形成专项报告,为后续标

准修订提供支撑。结合气象行业标准管理要求,每3~5年开展一次标准实施效果评估,结合业务需求、技术进步及“双碳”等政策动态调整修订指标体系与评价方法;依托科研项目深化森林固碳机理与气候变化响应机制研究,推动科研成果向标准修订转化;跟踪IPCC评估报告及国际标准前沿,持续优化评价体系,提升标准的国际兼容性与影响力。

6 结论

本文围绕气象行业标准QX/T 714—2024开展系统解析,梳理了以 C_{NEP} 为核心指标、基于相对距平的气象评价指数体系和5级评价等级标准,形成了覆盖数据输入、模型模拟、等级划分、结果验证的完整技术流程。经全国尺度和站点尺度双重验证,

该评价体系科学可靠,能够满足全国及省级多尺度生态气象业务服务需求,有效弥补了现有评价标准中气象要素驱动效应体现不足的短板。

需要指出的是,该标准的评价方法仍存在多重不确定性来源,包括模型参数的空间异质性、输入数据的区域精度差异、模型结构对氮限制和扰动过程的简化处理,以及等级划分方法对数据分布的敏感性等。在推广应用过程中,应通过建立区域化参数库、构建多模型集成评价体系、动态更新基准时段及推进数据同化研究等方式,持续降低评价结果的不确定性。

该标准的推广应用将显著提升生态气象业务的规范化水平,为国家生态文明建设和“双碳”目标实现提供重要的气象科技支撑。未来需进一步加强多学科交叉融合,建立标准动态更新机制,不断提升生态气象标准化工作的科学性与适用性。

参考文献

- [1] QX/T 714—2024 森林植被固碳释氧生态功能气象评价等级[S].
- [2] GB/T 38582—2020 森林生态系统服务功能评估规范[S].
- [3] GB/T 34815—2017 植被生态质量气象评价指数[S].
- [4] QX/T 494—2019 陆地植被气象与生态质量监测评价等级[S].
- [5] 钱拴,崔晓军,姜月清. QX/T 494—2019《陆地植被气象与生态质量监测评价等级》解读[J]. 标准科学, 2022 (7): 88–93.
- [6] GB/T 42961—2023 植被生态质量的气候变化影响评价方法[S].
- [7] 延晓冬,赵俊芳. 基于个体的中国森林生态系统碳收支模型FORCCHN及模型验证[J]. 生态学报, 2007, 27 (7): 2684–2694.
- [8] Fang J, Shugart H H, Liu F, et al. FORCCHN V2.0: An individual-based model for predicting multiscale forest carbon dynamics [J]. Geoscientific Model Development, 2022, 15: 6863–6872.
- [9] Zhao J F, Liu D S, Cao Y, et al. An integrated remote sensing and model approach for assessing forest carbon fluxes in China [J]. Science of the Total Environment, 2022, 811: 152480.
- [10] Fang J, Chen A, Peng C, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J]. Science, 2001, 292: 2320–2322.
- [11] Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, et al. A large persistent carbon sink in the world's forests [J]. Science, 2011, 333: 988–993.
- [12] Fang J Y, Hang Y, Zhu J L, et al. Carbon budget of forest ecosystems and its driving forces [J]. China Basic Science, 2015, 3: 20–25.
- [13] Qiu Z X, Feng Z K, Song Y N, et al. Carbon sequestration potential of forest vegetation in China from 2003 to 2050: Predicting forest vegetation growth based on climate and the environment [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 252: 119715.
- [14] Yu G R, Zhu X J, Fu Y L, et al. Spatial patterns and climate drivers of carbon fluxes in terrestrial ecosystems of China[J]. Global Change Biology, 2013, 19(3): 798–810.
- [15] 崔晓军,王一飞,吴明亮,等. 气候变化研究中“气候平均值”等术语标准化问题探析[J]. 标准科学, 2022 (10): 80–88.