

钱拴,毛留喜,侯英雨,等.生态气象业务服务技术进展与展望[J].气象研究与应用,2022,43(4):01-06.  
Qian Shuan,Mao Liuxi,Hou Yingyu,et al. Progress and prospect of eco-meteorological operational technology[J]. Journal of Meteorological Research and Application,2022,43(4):01-06.

生态气象业务服务技术进展与展望

钱拴,毛留喜,侯英雨,延昊,吴门新,曹云,徐玲玲,  
孙应龙,何亮,程路,张蕾,张立生,徐辉  
(国家气象中心,北京 100081)

**摘要:**国家级生态气象业务起步于 2004 年,经过近 20a 的不断发展,建立了以生态机理模型为核心的系列化生态气象业务技术体系,支持国家级和省级业务单位开展生态气象服务。未来 15a,将围绕国家生态保护和修复重大工程、促进绿水青山变为金山银山等对气象服务的需求,研发“监测精密、预报精准、服务精细”的生态气象业务技术,建立全国“三精”生态气象监测-预报预警-评估一体化业务技术体系,服务生态文明建设,助力建设美丽中国。  
**关键词:**生态气象;业务服务技术;进展与展望  
**中图分类号:** P4      **文献标识码:** A      **doi:** 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2022.4.01

引言

光、温、水等气象要素是影响生态系统和生态环境最活跃、最易变的自然因子,中国气象局高度重视生态文明建设气象保障工作。在中国气象局的领导下,中央气象台 2004 年成立农业与生态气象室,拓展生态气象领域,从无到有、从少到多、自创加引进,从气象角度,研究了多项系列化生态气象业务技术。其中,针对全国陆地植被,研究形成了植被生长气象条件监测评价和植被净初级生产力、覆盖度、生态质量监测评价技术体系;针对森林、草原、农田、荒漠等生态系统特点,研究形成了从气象条件优劣评价到反映生态系统生产力、固碳量、生态质量优劣的特色监测评估技术体系;针对保障生态安全关注的重大气象灾害、气候和气候变化影响,研发了全国空间分辨率为 1km、重点区域空间分辨率为 250m 的重大气象灾害对生态影响评估、气候和气候变化对生态影响评估、生态服务功能气象监测评估、生态保护成效气象影响评估等业务技术。建立了数十种模型支撑的全国生态气象监测评价业务技术体系,支持国省开展生态气象业务服务。本文总结了中央气象台

发展的主要生态气象业务技术,分析了主要不足和未来发展方向。

1 发展的主要生态气象业务技术

1.1 植被生态质量气象监测评估技术

植被是反映地表生态好坏的重要指示器,中央气象台针对缺少植被定量监测评价技术,陆续发展了植被生长气象条件评价模型、净初级生产力(net primary productivity,简称 NPP)、覆盖度、生态质量指数及生态改善指数等动态监测评估技术<sup>[1-3]</sup>。

1.1.1 植被生长气象条件优劣定量评价技术

2005 年中央气象台根据植被生长气候适应性原理和自然生态系统最小限制性原理,从无到有,构建了影响天然草原(地)植被生长的光、温、水单要素和气象条件综合评价模型<sup>[2,4]</sup>,之后扩展到整个植被,形成了植被生长气象条件评价模型<sup>[5]</sup>,评价气象条件对植被生长的优劣影响。

$$I_{ij}=\min(Ip_{ij},It_{ij},Is_{ij}) \tag{1}$$

式中: $I_{ij}$  为第  $i$  年第  $j$  旬植被生长气象条件指数, $Ip_{ij}$ 、 $It_{ij}$ 、 $Is_{ij}$  分别为第  $i$  年第  $j$  旬植被生长水分、热量、日照条件指数。全年或生长季植被生长气象条件

收稿日期: 2022-11-09  
基金项目: 中国气象局保障生态文明建设气象监测与评估能力示范项目(ZQH2017263)、草原监测与监督管理(2019042026)  
作者简介: 钱拴,主要从事生态和农业气象业务服务与研究。E-mail: qians@cma.gov.cn

指数为其时段内逐旬气象条件指数的算术平均。某一时段植被生长气象条件指数越大,说明该时段气象条件越利于植被生长;否则光、温、水中任意一个值低,总体气象条件对植被生长有利程度也低。

### 1.1.2 植被净初级生产力估算技术

植被净初级生产力是衡量植被生产能力和固碳能力以及供给能力的主要标量之一,估测方法有多种<sup>[4-5]</sup>,其中植被生态机理模型和光能利用率模型是最主要的估测模型。中央气象台 2005 年以来,基于全国所有长序列气象站逐日气象观测资料和全国长序列气象卫星逐月归一化差值植被指数 (NDVI) 合成数据,发展了可用于估测全国森林、草原、农田、荒漠等所有陆地植被净初级生产力的两大类机理模型,支持生态气象业务产品的制作<sup>[4-14]</sup>。

#### 1.1.2.1 基于纯气象要素驱动的生态机理模型的植被 NPP 估测技术

利用逐日气温、降水、空气相对湿度、云量(辐射、日照时数)、风速等气象要素,驱动反映植被光合、呼吸、干物质分配以及凋落等生理生态过程的机理模型,估算逐日植被净初级生产力<sup>[4-9]</sup>,见式(2),全年或生长季植被 NPP 由逐日植被 NPP 累计得到。其中 2008—2017 年,中央气象台实现全国森林、草原植被 NPP 逐日估算;2018 年之后实现全国植被 NPP 逐日估算。

$$NPP = GPP - RM - RG \quad (2)$$

式中: $NPP$  为日植被净初级生产力, $GPP$  为日植被通过光合作用所固定的碳量, $RM$  为日植被维持呼吸所消耗的碳量, $RG$  为日植被生长呼吸所消耗的碳量,单位均为克碳每平方米( $gC \cdot m^{-2}$ )。

#### 1.1.2.2 基于光能利用率原理的植被 NPP 估测技术

基于植被光能利用原理,利用 NOAA/AVHRR、EOS/MODIS 等卫星月合成 NDVI 和地面气象观测资料,研发了植被月 NPP 估算模型<sup>[3-5,10-14]</sup>,见式(3),四季、生长季、全年陆地植被 NPP 由月植被 NPP 累计得到。估算的空间分辨率由 2017 年前的全国 8km 提高到 2018 年以后的全国 1km、重点区域 250m;估算模型由大叶模型发展到双叶模型。

$$NPP = \varepsilon \times \sigma \times FPAR \times PAR \times (1 - R_g) \times (1 - R_m) \quad (3)$$

式中: $NPP$  为月植被净初级生产力,单位为克碳每平方米 ( $gC \cdot m^{-2}$ ); $\varepsilon$  为植被所吸收的光合有效辐射转化为有机物的转化率,即光能转化率,单位为克碳每兆焦 ( $gC \cdot (MJ)^{-1}$ ); $\sigma$  为影响光能转化率的因子,反映温度、水分等因子对光合作用的影响,无量纲;

$FPAR$  为植被吸收光合有效辐射的比例,无量纲; $PAR$  为入射光合有效辐射,单位为兆焦每平方米 ( $MJ \cdot m^{-2}$ ); $R_g$  为植被生长呼吸消耗系数,无量纲; $R_m$  为植被维持呼吸消耗系数,无量纲。

### 1.1.3 植被覆盖度估测技术

植被覆盖度估测方法有多种<sup>[4]</sup>,业务中通过 NOAA/AVHRR、EOS/MODIS、FY-3 等卫星月 NDVI 合成数据,根据混合像元分解法计算月植被覆盖度<sup>[3-5]</sup>,见式(4)。全年植被覆盖状况用 12 个月平均植被覆盖度反映。

$$FVC_{ij} = (NDVI_{ij} - NDVI_s) / (NDVI_v - NDVI_s) \quad (4)$$

式中: $FVC_{ij}$  为第  $i$  行第  $j$  列像元的植被覆盖度; $NDVI_{ij}$  为第  $i$  行第  $j$  列的 NDVI 值; $NDVI_s$  为像元为纯土壤时的值,接近 0; $NDVI_v$  为像元为纯植被时的值,接近于 1。根据我国陆地植被特点, $NDVI_v = 0.95$ , $NDVI_s = 0.05$ 。

### 1.1.4 植被生态质量指数估算技术

植被 NPP、覆盖度为反映植被生态质量的两个关键特征量,中央气象台 2005—2006 年建立了基于植被 NPP 评价生态环境优劣的生态气象评价指标<sup>[10-11,15]</sup>。2015—2017 年根据植被 NPP 和覆盖度对陆地生态系统的重要性,创建植被综合生态质量指数模型<sup>[3-5]</sup>,实现植被生态质量从 0 至 100 的定量监测评价,见式(5)。

$$Q_i = 100 \times \left( f_1 \times C_i + f_2 \times \frac{NPP_i}{NPP_{\max}} \right) \quad (5)$$

式中: $Q_i$  为第  $i$  年全年或生长季植被生态质量指数; $C_i$  为第  $i$  年该时段平均植被覆盖度,数值在 0~1 之间; $f_1$  为植被覆盖度的权重系数; $NPP_i$  为第  $i$  年该时段植被净初级生产力; $NPP_{\max}$  为该时段历年同期植被净初级生产力的最大值,即当地最好气象条件下的植被 NPP,进行植被生态质量的空间对比时, $NPP_{\max}$  为该空间区域范围内最好气象条件下的植被 NPP; $f_2$  为植被 NPP 的权重系数。其中,用基于气象卫星资料估测的植被 NPP 和覆盖度计算植被生态质量指数,反映植被实际生态质量高低;用纯气象要素驱动生态机理模型估测的植被 NPP 和覆盖度计算植被生态质量指数,反映潜在植被生态质量高低。

## 1.2 重大生态气象灾害监测评估技术

气象灾害对生态环境质量影响很大,中央气象台围绕国家保障生态安全的需求,研究了干旱、暴雨、台风以及山洪地质灾害等对生态影响的评估技术<sup>[16-19]</sup>。

### 1.2.1 陆地植被干旱监测评估技术

针对森林、草原、荒漠等自然生态系统,研究了自然植被干旱监测评估模型<sup>[16]</sup>;同时对于大农业,采用中央气象台研究的农业干旱综合指数<sup>[20]</sup>。后者综合了全国土壤水分、作物水分亏缺、遥感监测等技术,与自然植被干旱监测评估技术一起,实现对全国陆地植被干旱的综合监测评估,干旱等级分为正常、轻旱、中旱、重旱、特旱五个等级。

#### 1.2.1.1 自然植被干旱监测评估技术

利用全国长序列气象站逐日气象观测资料,以降水量与潜在蒸散量差值距平百分率( $VDI_{i,j}$ ),监测评估任意时段自然植被干旱。

$$VDI_{i,j} = \frac{VWD_{i,j} - \overline{VWD}_j}{\overline{VWD}_j} \times 100\% \quad (6)$$

$$VWD_{i,j} = P_{i,j} - ET_{i,j} \quad (7)$$

式中: $VDI_{i,j}$ 为第*i*年第*j*时段植被干旱指数; $VWD_{i,j}$ 为第*i*年第*j*时段水分盈亏量。

$VWD_{i,j}$ 大于0,表示水分盈余;小于0,表示水分亏缺。 $\overline{VWD}_j$ 为第*j*时段水分盈亏量的多年平均值。 $P_{i,j}$ 、 $ET_{i,j}$ 分别为第*i*年第*j*时段的降水量和潜在蒸散量( $mm$ ),其中 $ET_{i,j}$ 由Penman-Monteith计算。利用 $VDI_{i,j}$ 监测评估植被任意时段相当于正常年份的水分亏缺和受旱程度。

#### 1.2.1.2 农业干旱综合指数

$$AD = Rsm \times \lambda_{Rsm} + CWDI_a \times \lambda_{CWDI_a} + Pa \times \lambda_{Pa} + RS \times \lambda_{RS} \quad (8)$$

式中: $AD$ 为农业干旱综合指数, $Rsm$ 为土壤相对湿度指数, $CWDI_a$ 为作物水分亏缺距平指数, $Pa$ 为降水距平百分率, $RS$ 为遥感干旱监测指数, $\lambda$ 为各指数的权重系数,且 $\lambda_{Rsm} + \lambda_{CWDI_a} + \lambda_{Pa} + \lambda_{RS} = 1$ ,不同指数间权重系数值依据不同气候、土壤和植被类型而确定<sup>[20]</sup>。

### 1.2.2 台风对生态影响评估技术

台风对生态环境造成的影响主要为狂风和暴雨造成的树木折断、房屋倒塌、洪涝等<sup>[19]</sup>,对生态影响的评估模型由台风致灾因子( $H_{tp}$ )和地表生态变化量( $E_{var}$ )构成,见式(9)和(10)。其中,前者由台风过境时的强降水和大风决定,生态环境受影响程度由台风过境前后的地表生态环境质量变化确定。

$$H_{tp} = 0.5H_{pre} + 0.5H_{wind} \quad (9)$$

$$E_{var} = E_{after} - E_{before} \quad (10)$$

式中: $H_{pre}$ 为暴雨洪涝致灾因子, $H_{wind}$ 为大风致灾因子; $E_{after}$ 为台风过境后的地表生态质量指数, $E_{before}$ 为台风过境前的地表生态质量指数。评估台风

影响等级分为轻度破坏、中度破坏、重度破坏、严重破坏、极严重破坏五个等级。

### 1.2.3 山洪地质灾害对生态影响的风险评估技术

暴雨引发的山洪地质灾害易造成人员伤亡、财产损失,也易给局地生态环境造成重创。2018年以来中央气象台在山洪地质灾害预测预警技术研发的基础上<sup>[18]</sup>,进一步研究了基于山洪地质灾害的生态风险预警评估技术。计算山洪地质灾害生态风险评价指数,见式(11),评估强降水诱发的山洪地质灾害对生态影响的风险大小,评估等级分为无风险、低风险、中风险、高风险、极高风险五个等级。

$$R = H \times V \quad (11)$$

式中: $R$ 为山洪和地质灾害生态风险评价指数,值越大表明风险越高; $H$ 为风险源危险性,风险源主要为强降水诱发的山洪、地质灾害; $V$ 为生态系统易损性,主要考虑土壤可蚀性、地形和植被覆盖度等因子。

## 1.3 生态服务功能气象监测评估技术

生态系统为人类提供固碳释氧、防风固沙、涵养水源、保持土壤等多种生态服务功能,2017年以来中央气象台陆续研发了植被固碳释氧、防风固沙等服务功能气象监测评估技术<sup>[21-22]</sup>,同时引进中国科学院生态环境研究中心水源涵养、土壤保持量估算技术<sup>[23-24]</sup>,形成气象监测评估业务服务能力。

### 1.3.1 固碳释氧功能气象监测评估技术

植被进行光合作用,吸收二氧化碳( $CO_2$ )和释放氧气( $O_2$ )。在估算植被NPP基础上,估算植被固定 $CO_2$ 和释放 $O_2$ 的物质质量<sup>[21,25-26]</sup>,分析全国固碳释氧量时空变化,评估气象条件影响。

$$C_i = f_c \times NPP_i \quad (12)$$

$$O_i = f_o \times NPP_i \quad (13)$$

式中: $C_i$ 为第*i*年植被固定的 $CO_2$ 量,单位为 $g \cdot m^{-2}$ ;  $f_c$ 为单位植被NPP固定的 $CO_2$ 量,单位为 $g \cdot (gC)^{-1}$ ;  $O_i$ 为第*i*年植被释放的 $O_2$ 量,单位为 $g \cdot m^{-2}$ ;  $f_o$ 为单位植被NPP释放的 $O_2$ 量,单位为 $g \cdot (gC)^{-1}$ ;  $NPP_i$ 为第*i*年植被净初级生产力,单位为 $gC \cdot m^{-2}$ 。

### 1.3.2 防风固沙功能气象监测评估技术

我国是世界上受沙漠化危害最严重的国家之一,植被可以增加地表空气阻力,降低风速、改变风向,减轻大风对表层土壤的风蚀作用。中央气象台建立地表易起沙尘指数,见式(14),评估植被覆盖度、大风日数、湿润指数、坡度和土壤表层砂粒含量等5个因子对地表不同空间单元易起沙尘程度的影响<sup>[22]</sup>。

易起沙尘指数值越大,表明地表越容易起沙尘;值越小,表明地表越不易起沙尘。

$$D_j = \sum A(i, j) K_{ij} \quad (14)$$

式中: $D_j$ 为第 $j$ 空间单元地表易起沙尘指数; $A(i, j)$ 为第 $j$ 空间单元第 $i$ 个土地沙化敏感性评价因子(植被覆盖度、大风日数、湿润指数、坡度、土壤表层砂粒含量)的等级值( $i=5$ ), $K_{ij}$ 为 $j$ 空间单元第 $i$ 个土地沙化敏感性评价因子的权重,依据层次分析法(AHP)确定<sup>[22]</sup>。

### 1.3.3 水源涵养功能气象监测评估技术

生态系统具有涵养水源的能力,中央气象台2018年业务化了基于InVEST模型中的水源涵养量估算模型<sup>[23]</sup>,见式(15),实现对不同植被类型水源涵养量的估算和气象监测评估。

$$EWC = \sum_{m=1}^{12} (PRE_m - QF_m - AET_m) \quad (15)$$

式中:EWC为年水源涵养量, $PRE_m$ 为逐月降水量, $QF_m$ 为逐月水分地表径流损失, $AET_m$ 为逐月水分蒸散损失,单位为 $mm$ ;  $m$ 代表月份。

### 1.3.4 土壤保持功能气象监测评估技术

土壤侵蚀是全球性环境问题之一,严重威胁国家与区域生态安全。基于InVEST模型中土壤保持量估算模型<sup>[24]</sup>,见式(16),中央气象台实现对不同植被类型土壤保持量的估算和气象监测评估。

$$SC = R \cdot K \cdot LS \cdot (1 - C) \quad (16)$$

式中:SC为土壤保持量( $thm^2a^{-1}$ ), $R$ 为降雨侵蚀力因子( $MJmmhm^{-2}h^{-1}a^{-1}$ ), $K$ 为土壤可蚀性因子( $thm^2hbm^{-2}MJ^{-1}mm^{-1}$ ); $L$ 为坡长因子, $S$ 为坡度因子, $C$ 为植被覆盖因子。

## 1.4 生态气象预测预报技术

利用历史和实时气象观测数据,结合未来逐日气象要素预报结果,预测生态系统关键生态状况要素的未来情况,对于提前了解气象条件、气象灾害以及气候变化对生态的可能影响、指导生态保护和修复、保障生态安全具有重要的意义。中央气象台2006年以来持续发展生态气象预测预报技术,实现对植被NPP、产草量和牲畜承载力等的气象预测预报。

### 1.4.1 植被NPP预报技术

利用未来逐日天气要素预报结果,驱动草原、森林等植被生态模型,见式(2),预测到未来某一天结束时的植被NPP,预评估到未来某一天结束时的气象条件对植被NPP的影响,开展植被NPP预报及气象影响预评估服务。

### 1.4.2 草原产草量和牲畜承载力预测技术

产草量和牲畜承载力是草原生态保护和修复以及畜牧业生产关注的重点,中央气象台2005年以来持续研究气象估测预测技术,建立了多模型支撑的草原生态气象业务技术体系,主要有产草量遥感估测模型<sup>[27-30]</sup>、产草量气象预测模型<sup>[15,31-32]</sup>、草原植被NPP光能利用率估测模型<sup>[10-13]</sup>、纯气象观测资料驱动的草原植被NPP估算模型<sup>[7-9]</sup>。各种模型计算结果,通过草原植被NPP、生物量、地上生物量、产草量之间的定量转换关系<sup>[9]</sup>,见式(17)至(19),预测草原植被各种形式的生产力,开展预报服务。

$$BMS = NPP \times 10 / 0.45 \quad (17)$$

$$ABMS = BMS / (1 + r) \quad (18)$$

$$GP = f \cdot ABMS \quad (19)$$

式中:NPP为草原植被全年或生长季净初级生产力( $gC \cdot m^{-2}$ ); $BMS$ 为草原植被生物量( $kg \cdot hm^{-2}$ ); $ABMS$ 为草原植被地上生物量( $kg \cdot hm^{-2}$ ); $GP$ 为草原产草量( $kg \cdot hm^{-2}$ ); $r$ 为草地植被地下生物量与地上生物量的比,即根冠比; $f$ 为草地植被地上生物量中可食牧草的比重。在估测产草量的基础上,进一步计算草原可载牲畜的数量<sup>[9,15,28-29]</sup>。

### 1.5 气候和气候变化对生态影响评估技术

气候和气候变化对生态系统影响很大,中央气象台根据国家需求,研究了气候和气候变化对森林、草原、荒漠等生态系统关键生态要素和整个陆地植被NPP、覆盖度、生态质量变化以及重大生态工程建设影响的评估方法,回答国家关切<sup>[9,33-36]</sup>。

## 2 现有业务技术主要优点和不足

中央气象台发展的上述技术已推广到了省级气象部门,成为国省开展生态气象业务服务的主要技术支撑。业务技术不仅支持制作中国气象局《全国生态气象公报》和《全国草原生态气象监测预测服务专报》《北方荒漠生态气象监测预测服务专报》《六大重点生态功能区气象监测评估专报》以及省级生态气象服务产品,还针对热点、重点问题制作重大生态气象决策服务报告,为国家生态文明建设提供科学依据,产品得到国家领导、相关部委和地方政府以及社会公众的肯定,生态气象服务保障已成为国家重点生态工程的重点建设内容。面对生态文明建设对气象服务的多、高、细的需求,目前生态气象业务技术还存在三方面不足:(1)业务服务技术种类有限,目前生态气象业务技术只是解决了普遍关注的主要生

环境质量气象影响问题, 还没有解决生态文明建设需求的更多气象保障, 如: 近几年国家需要气象部门做好生态保护红线严守气象影响评估和气象条件贡献评价工作; “碳达峰、碳中和”的实现需要评估气象条件对植树种草、国土绿化等的影响, 但目前业务中缺少此类技术, 难以支撑服务的开展。(2) 预报预警技术缺乏, 生态文明建设需要提前预知未来气象条件对生态的可能影响, 但目前生态气象业务预报技术还缺少业务化的植被覆盖度、生态服务功能等要素的气象影响预报; 对于气象灾害, 目前主要侧重于重大气象灾害对生态影响的评估技术研发, 预报预警技术较少, 难以开展生态气象灾害预报预警服务。(3) 技术精细化支撑能力不足, 目前全国生态气象服务主要以生态气象模型支撑业务运行, 全国生态气象观测站点稀少、观测要素不足, 特别是国家关注的“三区四带”重点生态保护修复区、气候敏感和生态脆弱区缺少必要的生态气象观测站, 难以给生态气象业务模型提供精细化的参数和验证数据, 制约了业务技术的精细化发展。

### 3 未来发展方向

未来 15a, 中央气象台将围绕《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035 年)》及其 9 项专项规划等对气象服务的需求以及中国气象局《“十四五”生态气象服务保障规划》, 针对存在的上述不足, 不断拓展生态气象业务服务技术种类, 加强生态气象预报预警技术研发, 建立监测精密、预报精准、服务精细的全国“三精”生态气象业务服务技术体系。力争使生态气象业务技术形成的全国产品空间分辨率从现在的公里级达到未来的百米级, 时间分辨率由现在的逐月气象监测评估精细化到未来逐日滚动的一体化气象监测—预报预警—评估; 同时, 针对“三区四带”等重点区域, 研发百米至米级分辨率的精细化针对性生态气象业务技术, 助力解决具体生态保护修复的痛点。实现对全国所有生态系统的气象精密监测、精准评估预测、精细化服务, 支持国、省、地、县开展面向不同需求的生态气象服务。

#### 参考文献:

- [1] 毕宝贵, 毛留喜, 王建林. 中国生态与农业气象业务技术进展[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [2] 钱拴, 毛留喜, 张艳红. 中国天然草地植被生长气象条件

评价模型[J]. 生态学杂志, 2007, 26(9): 1499–1504.

- [3] 钱拴, 延昊, 吴门新, 等. 植被综合生态质量时空变化动态监测评价模型[J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6573–6583.
- [4] 钱拴, 吴门新, 伏洋, 等. GB/T 34814–2017, 草地气象监测评价方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [5] 钱拴, 曹云, 延昊, 等. QXT 494–2019, 陆地植被气象与生态质量监测评价等级[S]. 北京: 气象出版社, 2019.
- [6] 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.
- [7] Ji J J. A climate–vegetation interaction model: Simulating physical and biological processes at the surface[J]. Journal of Biogeography, 1995(22): 445–451.
- [8] Dan L, Ji J J, He Y. Use of ISLSCP II data to intercompare and validate the terrestrial net primary production in a land surface model coupled to a general circulation model[J]. Journal of Geophysical Research, 2007(112): 1–18.
- [9] Qian S, Wang L Y, Gong X F. Climate change and its effects on grassland productivity and carrying livestock in the main grassland in China[J]. The Rangeland Journal, 2012, 34(4): 341–347.
- [10] 毛留喜, 李朝生, 侯英雨, 等. 2006 年上半年全国生态气象监测与评估研究[J]. 气象, 2006, 32(12): 88–95.
- [11] 毛留喜, 钱拴, 侯英雨, 等. 2006 年夏季川渝高温干旱的生态气象监测与评估[J]. 气象, 2007, 33(3): 83–88.
- [12] 侯英雨, 柳钦火, 延昊, 等. 我国陆地植被净初级生产力变化规律及其对气候的响应[J]. 应用生态学报, 2007, 18(7): 1546–1553.
- [13] 侯英雨, 毛留喜, 李朝生, 等. 中国植被净初级生产力变化的时空格局[J]. 生态学杂志, 2008, 27(9): 1455–1460.
- [14] Yan H, Wang S Q, Billesbach D, et al. Improved global simulations of gross primary product based on a new definition of water stress factor and a separate treatment of C3 and C4 plants [J]. Ecological Modelling, 2015(297): 42–59.
- [15] 钱拴, 毛留喜, 侯英雨, 等. 北方草地生态气象综合监测预测技术及其应用[J]. 气象, 2008, 34(11): 62–68.
- [16] Qian S, Pan F F, Wu M X, et al. Appropriated protection time and region for Qinghai–Tibet Plateau grassland[J]. Open Geosciences, 2022(14): 706–716.
- [17] 王秀荣, 张立生, 李维邦. 台风灾害综合等级评判模型改进及应用分析[J]. 气象, 2018, 44(2): 304–312.
- [18] 徐辉, 曹勇, 曾子悦. 基于 FFPI 的山洪灾害风险预警方法[J]. 灾害学, 2020, 35(3): 90–95.
- [19] 杨绚, 张立生, 杨棍, 等. 台风大风低矮房屋易损性及智能网格预报的应用[J]. 气象, 2020, 46(3): 429–440.
- [20] 吕厚荃, 张玉书, 李茂松, 等. GB/T 32136—2015, 农业干旱等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.

- [21] 赵俊芳,曹云,马建勇,等.基于遥感和 FORCCHN 的中国森林生态系统 NPP 及生态服务功能评估[J].生态环境学报, 2018,27(9):1585–1592.
- [22] 徐玲玲,延昊,钱拴.基于 MODIS-NDVI 的 2000–2018 年我国北方土地沙化敏感性时空变化[J].自然资源学报, 2020,35(4):925–936.
- [23] 龚诗涵,肖洋,郑华,等.中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素[J].生态学报,2017,37(7):2455–2462.
- [24] 饶恩明,肖燧,欧阳志云,等.海南岛生态系统土壤保持功能空间特征及影响因素[J].生态学报,2013,33(3):746–755.
- [25] 王兵,杨锋伟,郭浩,等.LY/T 1721—2008,森林生态系统服务功能评估规范[S/OL].[2008-03-31].
- [26] 刘宪锋,任志远,林志慧.青藏高原生态系统固碳释氧价值动态测评[J].地理研究, 2013,32(4):663–670.
- [27] 侯英雨,毛留喜,钱拴,等.青海省牧草产量的遥感估算及其时空分布规律[J].生态学杂志,2006,25(11):1–7.
- [28] 钱拴,毛留喜,侯英雨,等.青藏高原天然草地载畜能力和草畜平衡问题研究[J].自然资源学报,2007,22(3):389–396.
- [29] 毛留喜,侯英雨,钱拴,等.牧草产量的遥感估算与载畜能力研究[J].农业工程学报,2008,24(8):147–151.
- [30] 吴门新,钱拴,侯英雨,等.利用 NDVI 资料估算中国北方草原区牧草产量[J].农业工程学报,2009,25(S2):149–155.
- [31] 钱拴.中国主要天然草地产草量气象预测方法[J].生态学杂志,2009,28(6):1201–1205.
- [32] 徐玲玲,钱拴.内蒙古天然草场牧草产量的气象估算模型[J].中国草地学报, 2011,33(1): 54–58.
- [33] 李朝生,丁一汇,李泽椿,等.气候变化对库布齐沙漠生态环境的影响及其适应性对策初探[J].沙漠与绿洲气象,2007,1(5):1–5.
- [34] 李泽椿,郭安红,延昊,等.气候变化对生态保护工程的影响[J].气候变化研究进展,2015,11(3):179–184.
- [35] Qian S, Fu Y, Pan F F. Climate change tendency and grassland vegetation response during the growth season in the Three-Rivers source region[J]. Science China: Earth Sciences,2010,53(10):1506–1512.
- [36] 曹云,钱永兰,孙应龙,等.基于 MODIS NDVI 的西南森林植被时空变化特征及其气候响应分析[J].生态环境学报,2020,9(5):857–865.

## Progress and prospect of eco-meteorological operational technology

Qian Shuan, Mao Liuxi, Hou Yingyu, Yan Hao, Wu Menxin, Cao Yun, Xu Lingling,  
Sun Yinglong, He Liang, Cheng Lu, Zhang Lei, Zhang Lisheng, Xu Hui  
(National Meteorological Center, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The national ecological meteorological operation was launched in 2004, and after nearly 20 years of continuous development, a series of ecological meteorological operation technology systems with an ecological mechanism model as their core has been established to support the national and provincial departments to carry out ecological meteorological services. In the next 15 years, we will develop “precise monitoring, accurate forecast, and fine service” ecological meteorological operation technology according to the demand for meteorological services including national ecological protection and restoration projects, and promoting the transformation of clear waters and green mountains into valuable assets. A national integrated “three-precision” technology system for ecological meteorological monitoring, forecasting and early warning, and evaluation will be established to further serve the construction of ecological civilization and help build a beautiful China.

**Key words:** Ecological meteorology; operational service technology; progress and prospect