北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

基于BBCH量表的红松果林物候期编码和描述

张建瑛 殷东生

Phenological coding and description of *Pinus koraiensis* nut-production forests based on the BBCH scale

Zhang Jianying, Yin Dongsheng

引用本文:
张建瑛, 殷东生. 基于BBCH量表的红松果林物候期编码和描述[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(10):111-123. doi: 10.12171/j.1000-1522.20250422
Zhang Jianying, Yin Dongsheng. Phenological coding and description of *Pinus koraiensis* nut-production forests based on the BBCH scale[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(10):111-123. doi: 10.12171/j.1000-1522.20250422

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20250422

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

基于卫星日光诱导叶绿素荧光的中国东部森林物候期估算
Estimation of forest phenology in eastern China based on satellite sunlight-induced chlorophyll fluorescence
北京林业大学学报, 2025, 47(5): 48-58. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20240344

红松种实性状及营养成分动态变化分析
Dynamic changes in seed, cone traits and nutritional components of *Pinus koraiensis*
北京林业大学学报, 2024, 46(7): 67-76. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20220148

天然混交林林分发育阶段划分方法的比较
Comparison of methods for dividing developmental stages of natural mixed forest stands
北京林业大学学报, 2024, 46(7): 139-152. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20230174

帽儿山天然硬阔叶林发育阶段划分及林分结构特征
Development stage division and stand structure characteristics of natural hard broadleaved forest in Maor Mountain, Heilongjiang Province of northeastern China
北京林业大学学报, 2025, 47(2): 10-22. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20240169

基于生长与木材性状的红松优良种源评价选择
Evaluation and selection of excellent provenances of *Pinus koraiensis* based on growth and wood properties
北京林业大学学报, 2022, 44(3): 12-23. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20210247

基于广义加性模型的红松树干纵向木材密度模型研建
Developing a longitudinal wood density model for *Pinus koraiensis* stems based on generalized additive models
北京林业大学学报, 2026, 48(7): 48-57. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20250465

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250422

基于 BBCH 量表的红松果林物候期编码和描述

张建瑛　殷东生
（黑龙江省林业科学研究所，黑龙江 哈尔滨 150081）

摘要:【目的】探究基于 BBCH 量表的红松全生育期标准化物候编码方案，筛选适用于红松营养生长和生殖生长阶段各器官发育进程的量化描述指标，以期为红松嫁接果林的精准管理提供统一、可靠的物候观测依据。**【方法】**以黑龙江省延寿县林业局实验林场 11 年生红松嫁接果林为研究对象，于 2022—2024 年连续 3 个生长季（3—10 月）定期观测芽、叶、枝、花、果等器官的形态变化，结合图像、测量数据及定量标准，依据 BBCH 量表划分主要与次级物候阶段，建立全生育期的物候编码体系。从 Climate AP v3.0 软件提取同期月最高温、月最低温、月均温及降水量数据，绘制物候−气候关系示意图。**【结果】**(1)营养生长过程包括营养芽发育（PGS 0）、针叶发育（PGS 1）、新梢发育（PGS 3）和休眠（PGS 9）4 个阶段，每个阶段具有独特的形态特征和可量化生长表现。(2)生殖生长过程包括花芽发育（PGS 5）、开花（PGS 6）、果实发育（PGS 7）和果实成熟（PGS 8）4 个阶段，每个阶段具有独特的形态特征，其中球果当年生长量有限，生长主要发生在第 2 年。(3)营养生长 4 个阶段的 BBCH 采用 2 位数编码记录方法，生殖生长的花芽发育、开花与球果成熟阶段的 BBCH 采用 3 位数编码记录方法，果实发育阶段采用 2 位数编码记录方法；在编码过程中，采用了以针叶长度发育指数（10%、20%、50%、70%、90%）、新梢长度发育指数（10%、30%、50%、90%）和球果体积发育指数（15%、30%、50%、70%、90%）作为各器官次级阶段划分的量化分级标准。(4)将 BBCH 物候编码与气候进行对应，BBCH 主要阶段与月均温、降水量呈时序同步关系。**【结论】**本研究构建了包含营养生长和生殖生长过程的 8 个主要生长阶段、50 个次级物候期的红松 BBCH 物候编码体系，BBCH 物候阶段的季节分布与气候因子的年际变化同步性明显。研究结果为指导红松果林的精准管理提供了标准化物候学依据。

关键词：红松；BBCH 编码；果林；发育阶段；物候期；物候−气候
中图分类号：S718.5　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000−1522(2026)10−0111−13
引文格式：张建瑛，殷东生. 基于 BBCH 量表的红松果林物候期编码和描述 [J]. 北京林业大学学报，2026，48(10)：111−123. Zhang Jianying, Yin Dongsheng. Phenological coding and description of *Pinus koraiensis* nut-production forests based on the BBCH scale[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(10): 111−123.

Phenological coding and description of *Pinus koraiensis* nut-production forests based on the BBCH scale

Zhang Jianying　Yin Dongsheng
(Forestry Research Institute of Heilongjiang Province, Harbin 150081, Heilongjiang, China)

Abstract: [**Objective**] This study aimed to establish a standardized phenological coding system for the entire growth cycle of *Pinus koraiensis* based on the BBCH scale, and to identify quantitative descriptive indicators applicable to the developmental processes of various organs during vegetative and reproductive growth, thereby providing a unified and reliable phenological observation framework for the precise management of grafted *P. koraiensis* nut-production forests. [**Method**] The study was conducted on an 11-year-old grafted *P. koraiensis* orchard at the Experimental Forest Farm of Yanshou County Forestry Bureau

收稿日期: 2025−10−29　**修回日期:** 2026−07−21
基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目（LH2024C111），黑龙江省省属科研院所科研业务费项目（CZKYF2026-A008、YB2024-07）。
第一作者: 张建瑛。主要研究方向：森林培育与生物技术。Email: zhangjianying1124@126.com　地址：150081 黑龙江省哈尔滨市哈平路 134 号黑龙江省林业科学研究所。
责任作者: 殷东生，研究员。主要研究方向：森林培育。Email: yindongsheng2004@126.com　地址：同上。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn; https://journal.bjfu.edu.cn

in Heilongjiang Province. Regular observations of morphological changes in buds, leaves, branches, flowers, and fruits were conducted over three consecutive growing seasons (March to October) from 2022 to 2024. By integrating images, measurement data and quantitative criteria, major and minor phenological stages were classified according to the BBCH scale.Monthly maximum, minimum and average temperature data, along with precipitation data for the corresponding period, were extracted from the Climate AP v3.0 software to generate a schematic illustration depicting the relationships between phenology and climate. [**Result**] (1) The vegetative growth process comprises four distinct stages: vegetative bud development (PGS 0), needle development (PGS 1), shoot development (PGS 3) and dormancy (PGS 9), with each stage exhibiting unique morphological traits and quantifiable growth manifestations. (2) The reproductive growth process encompasses four stages: flower bud development (PGS 5), flowering (PGS 6), fruit development (PGS 7) and fruit maturation (PGS 8), each characterized by distinct morphological features. Notably, cone growth is constrained in the current year, with the primary growth occurring in the subsequent year. (3) The BBCH coding system employs a two-digit recording method for the four stages of vegetative growth, whereas a three-digit recording method is utilized for the stages of floral bud development, flowering and cone maturation during reproductive growth. Additionally, the fruit development stage is recorded using a two-digit coding method. During the coding process, quantitative grading criteria for the secondary stage classification of each organ were established, utilizing the needle length development index (10%, 20%, 50%, 70%, 90%), the shoot length development index (10%, 30%, 50%, 90%), and the cone volume development index (15%, 30%, 50%, 70%, 90%). (4) The BBCH phenological coding exhibits a correlation with climatic conditions, with the principal BBCH stages demonstrating temporal synchrony with monthly mean temperatures and precipitation levels. [**Conclusion**] This study developed a phenological coding system for *P. koraiensis* utilizing the BBCH scale, which encompasses eight principal growth stages and fifty subsidiary phenological phases. The seasonal distribution of BBCH phenological stages exhibits a significant synchronicity with the interannual variations in climatic factors, providing a standardized phenological basis for guiding precise management of *P. koraiensis* nut-production forests.

Key words: *Pinus koraiensis*; BBCH code; nut-production forests; developmental stages; phenology; phenology-climate

物候是植物响应环境变化的重要特征，是理解植物对环境响应机制、预测气候变化生态效应的关键途径[1−2]。通过物候观测，可以直观掌握植物生命周期的变化规律（如萌芽、开花、结实、衰老等），为栽培管理提供重要的生物学依据，尤其对优化水肥管理、病虫害防控、经济植物的高产稳产以及品质提升等方面至关重要[1, 3]。

近年来，物候观测指标体系经历了从定性描述向定量编码的跨越式发展[4]。传统物候观测主要依赖于对关键物候阶段或物候事件进行文字性描述与记录，不同观测者之间在数据类型和数量上往往存在差异，降低了数据的可比性[5]。在此背景下，国际通用的 BBCH（biologische bundesanstalt, bundessortenamt chemische industrie）物候观测方法应运而生[6]。该方法通过两位数字标识不同发育阶段，可完整描述植物整个发育周期，兼具统一性和简洁性，显著提升了观测数据的可比性与共享性[7]。尽管 BBCH 量表作为一种标准化的物候编码系统，为育种、栽培管理和气候变化适应性评估提供了重要的科学依据，但其应用存在显著的不均衡性[8]。目前，BBCH 量表应用高度集中于农作物以及经济树种，如水稻（*Oryza sativa*）[6]、棉花（*Gossypium hirsutum*）[6]、柿（*Diospyros kaki*）[9]、榛子（*Corylus avellana*）[10]、山茶（*Camellia japonica* ）[11]、龙眼（*Dimocarpus longan*）[12]、无患子（*Sapindus mukorossi*）[13] 等。对于裸子植物，特别是针叶树，BBCH 量表方案仍为空白，且缺乏验证。尽管有个别研究尝试将其用于挪威云杉（*Picea abies*）等树种[14]，但也是仅关注叶片物候，缺乏对多个器官发育周期的同步物候观测。这种局限性不仅阻碍了跨树种研究之间的一致性比较，也制约了对针叶类关键树种物候机制的深入理解。

红松（*Pinus koraiensis*）是第三纪孑遗物种和我国东北地区珍贵的用材树种和食用坚果树种，是温带地带性顶极群落红松阔叶林的建群种，具有极高的经济价值和生态功能[15]。近年来，随着松籽市场需求激增和红松果林种植面积的不断扩大，红松已

成为东北地区重要的经济树种。植物的物候规律深受气候变化的影响[16]，多项研究指出气候变化已对红松物候产生显著影响。例如：王超等[17]研究发现，气候变暖导致红松春季萌芽期推迟、展叶期提前，秋季物候提前，生长季缩短；程春香等[18]进一步指出物候异步性可能是导致红松结实不稳定的关键因素。针对不同树木物候的研究[19]也表明，温度升高会显著影响树木的物候节律和繁殖成功率。然而，目前对红松物候的研究[20−22]仍主要集中在开花结实方面，缺乏系统性的全生育期物候编码体系，导致不同研究者之间的观测结果无法相互比较，难以量化气候因子对不同生育阶段的具体影响，无法开展区域尺度上的物候比较与预测，也无法为精准栽培和气候变化响应研究提供数据支撑。鉴于此，本研究以通过嫁接技术培育的 11 年生果用红松为研究对象，通过红松完整的年生育周期（芽、枝、针叶、花、球果的发育）定点观测，构建一套红松全生育期的标准化物候编码框架。研究结果将为具有类似物候特征的树种观测提供参考，还可为指导红松果林的精准管理（如授粉、施肥和采收）提供科学依据。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

黑龙江省延寿县林业局实验林场（45°27′53″N，128°20′14″E）位于张广才岭西坡，松花江支流蚂蚁河北岸，属中温带大陆性季风气候，海拔约 450 m，坡度 < 20°，年均气温 2.6 ℃，年降水量 500 ~ 700 mm，无霜期 128 d；该区土壤类型主要为暗棕壤。植物区系属于长白山植物区系，现有林分类型包括以阔叶为主的天然次生林和栽植的人工林。主要树种有山杨（*Populus davidiana*）、白桦（*Betula platyphylla*）、水曲柳（*Fraxinus mandshurica*）、红松、樟子松（*Pinus sylvestris* var. *mongolica*）等。

观测样地设在实验林场 32 林班 13 小班内的红松果林内。该果林于 2015 年春季营建，所用苗木为 4 年生“黑林 1 号”红松嫁接苗，栽植株行距为 2 m × 3 m。样地坡向东南，土壤为黑黄土，土层厚度约 50 cm。为维持林分健康与生产力，样地每年进行常规抚育管理，包括清除林下杂灌、杂草。林内红松植株生长良好，无明显病虫害。

1.2　研究方法

1.2.1　物候观测树木选择与标记

为获取红松果林全生育期各器官发育的连续、可靠物候数据，本研究在样地内选取生长良好、长势一致的红松嫁接单株 15 株作为固定观测对象，于 2022—2024 年连续 3 个生长季观测记录各发育阶段的营养生长期与生殖生长期数据。选取时兼顾树冠层次和方位代表性，以覆盖营养生长与生殖生长的全部器官类型。其中，枝条发育观测选取树冠中上部东西南北各 1 个枝条，雄球花发育观测选取树冠中下部东西南北各 1 个枝条，雌球花发育观测选择树冠顶端 1 个枝条的 2 ~ 3 个雌球花。

1.2.2　物候期观测与 BBCH 量表编码

在 2022—2024 年连续 3 个生长季开展物候观测，观测频率为 4—6 月每 3 d 1 次，7—11 月每周 1 次，12 月—翌年 3 月每月 1 次。每次观测时，对标记器官的形态、颜色、大小等进行详细记录和拍照，使用游标卡尺（精度 0.01 mm）测量芽长、新梢长、针叶长、球果长径与短径等指标。球果发育调查中，于 2022 年 6—8 月每 7 d 1 次，9 月 1 次，2023 年 4—9 月每 7 ~ 10 d 1 次，每次随机选取 10 个球果测量长度、直径，电子天平（精度 0.01 g）称量球果质量。球果成熟阶段采用破坏性取样法，剖开球果观察果轴、种胚、内腔等内部结构的时序变化。BBCH 各个阶段的发生日期，以至少 50% 标记单株达到相应形态特征的日期为准。

本研究以 Meier[7]的 BBCH 量表为基本框架进行构建。编码规则如下：采用 2 位数代码标识植物发育阶段，第 1 位数字（0 ~ 9）表示主要生长阶段（principal growth stage，PGS），按发育时序从营养生长启动至生殖生长再到休眠依次排列；第 2 位数字（0 ~ 9）表示主要阶段内部的次要生长阶段（secondary growth stage），按同一器官从启动到完成的形态变化进程依次编号。在此基础上，针对红松生物学特性，红松花芽发育、开花、球果成熟阶段采用 3 位数编码，第 3 位数字表示同一次要阶段的性状，范围为 0 ~ 9。

1.2.3　BBCH 物候编码–气候对应关系分析

为探索红松 BBCH 物候编码时序与主要气候因子之间的对应关系，为分析气候变化对物候生长的潜在影响提供数据基础，本研究依据地理坐标和海拔从 Climate AP v3.0 软件提取 2022—2024 年月最高气温、月最低气温、月平均气温和降水量，进而提取气候数据绘制物候–气候关系示意图，以直观展示各主要生长阶段（PGS 0 ~ 9）的发生时段与同期水热条件的匹配特征。

1.2.4　数据处理

为提高编码体系的客观性与可比性，并统一物候阶段的判定标准，本研究对针叶、新梢和球果的发育过程分别制定了量化标准。针叶发育以同株上一年生成熟针叶在生长停止后的最终长度为 100% 基准，将当年生针叶在各观测时期的实测长度换算为

长度发育指数(即某一时期实测值与基准值的比值),以达到 10%、20%、50%、70%、90% 为节点划分次级阶段。新梢发育以当年新梢 7 月上旬生长停止时的最终长度为 100% 基准,将各观测时期的新梢实测长度换算为长度发育指数(即某一时期实测值与基准值的比值),以达到 10%、30%、50%、90% 为节点划分次级阶段。球果发育则以样地内群体成熟时球果长度、直径、质量的平均值为 100% 基准,计算对应的发育指数;球果体积发育指数以长度发育指数与直径发育指数的乘积计算,以达到 15%、30%、50%、70%、90% 为节点划分次级阶段。

所有原始观测数据录入 Excel 2010 软件进行整理,计算针叶、新梢长度发育指数及球果发育指数。

2 结果与分析

2.1 营养生长阶段的编码与量化表征

2.1.1 营养芽发育阶段

红松的营养生长从“营养芽发育”开始,BBCH 编码为 PGS 0(图 1)。营养芽发育通常发生在 3—4 月。处于休眠(3 月下旬)的营养芽平均长度(3.5 ± 0.8)mm,呈卵圆形,先端尖,生长锥被鳞片包裹,鳞片呈褐色(编码 00,图 1a)。气温回升后,营养芽于 4 月下旬解除休眠,营养芽平均长度达(6.2 ± 1.1)mm,增长 77.1%,明显膨大,鳞片呈红褐色(编码 01,图 1b)。芽膨大后,芽鳞张开(编码 03,图 1c);随后营养芽基部开始伸长,露出绿色组织(编码 07,图 1d);芽鳞脱落后,内部绿色组织外露并包裹于生长锥周围;随着芽体继续伸长,叶原基逐渐显现(编码 09,图 1e),至此营养芽发育阶段结束。

2.1.2 针叶发育阶段

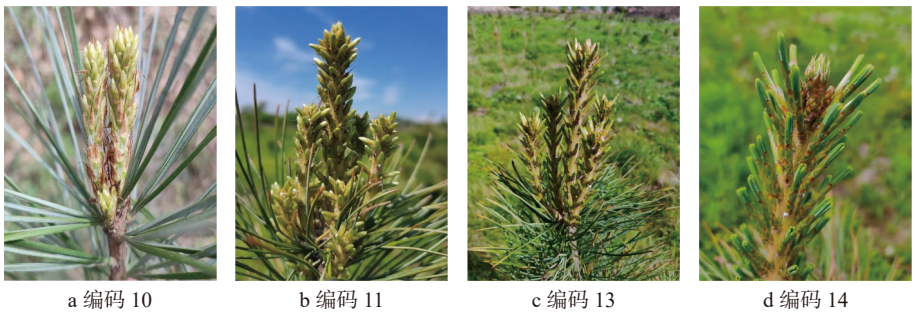
当营养芽内叶原基出现时进入“针叶发育阶段”,BBCH 编码为 PGS 1(图 2)。5 月中旬,叶原基伸长,但仍与枝条主轴紧密贴合(编码 10,图 2a);随后,针叶基部与小枝开始分离。当长度发育指数达到 10% 左右时,针叶开始独立生长(编码 11,图 2b)。进入 5 月下旬,幼叶伸出叶鞘并保持聚集成束,长度



a 编码 00 b 编码 01 c 编码 03 d 编码 07 e 编码 09

图 1 PGS 0:红松果林营养芽发育阶段

Fig. 1 PGS 0: vegetative bud development



a 编码 10 b 编码 11 c 编码 13 d 编码 14



e 编码 15 f 编码 17 g 编码 19

图 2 PGS 1:红松果林针叶发育阶段

Fig. 2 PGS 1: leaf development

发育指数约 20%（编码 13，图 2c）。6 月上旬针叶束逐渐展开，外观呈浅绿色，质地柔软（编码 14，图 2d）。6 月中旬，针叶快速伸长，长度发育指数约 50%，叶色转为翠绿（编码 15，图 2e）。至 6 月下旬，长度发育指数约 70%，叶色深绿，角质层明显增厚（编码 17，图 2f），此后缓慢生长到 7 月中旬，长度发育指数约 90% 以上（编码 19，图 2g）。

2.1.3　新梢发育阶段

枝条从启动伸长到完成伸长，该阶段为“新梢的发育”，BBCH 编码为 PGS 3（图 3）。4 月初萌芽后，主轴形成，新梢开始生长（编码 30，图 3a），此时长度不足最终长度的 5%。

随着生长加速，当新梢长度发育指数达到 10% 时，主轴明显形成，针叶原基开始出现（编码 31，图 3b）。进入 5 月，新梢进入快速伸长期，当长度发育指数达到 30% 时，新梢明显增粗，针叶已从基部分离并开始展开（编码 33，图 3c）。至 6 月上旬，长度发育指数达 50% 时，新梢主枝伸长过半，侧枝开始加速生长，叶色转为深绿（编码 37，图 3d）。7 月中旬以后生长速率显著减缓，当长度发育指数达 90% 以上时，基部颜色由绿色转为黄褐色，质地明显木质化，伸长生长基本结束（编码 39，图 3e）。新梢发育包括主枝和侧枝发育，主枝的快速伸长期集中于 4 月初—7 月中旬，而侧枝的生长启动稍晚（约 4 月中旬），且持续时间更长。

2.1.4　休眠阶段

10 月中旬后，随着气温下降，针叶虽保持绿色，但是红松高生长与径向生长停止，进入休眠，为“休眠”阶段，BBCH 编码为 PGS 9（编码 90，图 4）。此状态一直持续至翌年春季芽萌发前。与落叶树种相比，红松休眠期针叶不脱落、保持绿色，在量表中应强调描述。

2.2　生殖生长阶段的编码与量化表征

2.2.1　花芽发育阶段

红松生殖生长阶段从“花芽发育”开始，BBCH 编码为 PGS 5（图 5），其生殖物候的显著特征是雌雄花异步发育。红松雌雄花原基在第 1 年 6、7 月份形成（图 5）。雄花芽簇生枝条中下部（编码 500，图 5a），雌花芽位于枝条顶端（编码 510，图 5d），第 1 年 9 月中旬雄、雌花芽开始休眠（编码 501、511，图 5b、5e）。第 2 年的 5 月上旬雄花芽膨大萌动，芽鳞开裂，芽尖微红（编码 503，图 5c）；5 月中旬雌花芽膨大、伸长，呈绿色、小簇状（编码 513，图 5f），雄花芽早于雌花芽 5 ~ 7 d 启动。针对红松雌雄同株现象，采用 3 位数并行且独立的编码，描述针叶树特有雌雄花芽的形态、颜色变化，有别于阔叶树的“露白”等特征。

2.2.2　开花阶段

继花芽萌动之后，红松进入了“开花”阶段，BBCH 编码为 PGS 6（图 6）。雄球花（小孢子叶球）于 6 月上旬开放，呈粉紫色或黄绿色（编码 600，图 6a）。初花期为颜色转黄，小孢子叶球全部显露出来（编码 601，图 6b）。盛花期（编码 605，图 6c）时花粉大量散出，散粉持续 5 ~ 7 d。等到花粉基本散尽，花穗上的雄球花变为红褐色，进入末花期（编码 607，图 6d），最后呈枯萎状态并脱落，雄花期结束（编码 609，图 6e）。雌球花（大孢子叶球）在 6 月中旬开放，初花期呈直立小球果状（编码 610，图 6f），随后珠鳞逐渐张开，颜色由淡红加深至红色（编码 613、615、617，图 6g、图 6h、图 6i），珠鳞也从露出变为完全张开，以便授粉。授粉成功后，珠鳞包裹胚珠闭合形成球果，颜色转绿，雌花期结束（编码 619，图 6j）。

2.2.3　球果发育与成熟

红松球果从授粉到成熟需跨 2 个生长季，其长度、直径和质量的时序变化呈现明显的阶段性特征。据此，将“球果发育”编码为 PGS 7（图 7），“球果成熟”编码为 PGS 8（图 8）。

第 1 年 6 月中旬，授粉后珠鳞完全闭合形成幼果（编码 70，图 7a），随后进入生长初期。至 7 月底，球果平均长度和直径分别达到（2.90 ± 0.39）cm 和（1.83 ± 0.11）cm，体积约为成熟球果的 15%。8 月上旬起生长速率显著减缓，9 月中旬基本停滞，随后以



a 编码 30　　b 编码 31　　c 编码 33　　d 编码 37　　e 编码 39

图 3　PGS 3：红松果林新梢发育阶段

Fig. 3　PGS 3: shoot development



图 4 PGS 9: 红松果林休眠阶段(编码 90)

Fig. 4 PGS 9: beginning of dormancy

幼果形态休眠越冬(编码 72, 图 7c), 该休眠持续至翌年 4 月上旬。由表 1 可见, 第 1 年生长季内(6 月上旬—10 月中旬), 长度发育指数增幅仅为 7.5%, 表明当年球果生长量有限。第 2 年 5 月上旬球果恢复生长, 至 7 月初长度发育指数达 90% 以上(表 2), 外部形态基本定型(编码 79, 图 7g)。第 2 年 5 月中旬—6 月下旬为快速生长阶段, 长度发育指数的增量为第 1 年整个生长季增量的 5.7 倍。按照体积发育指数达到成熟球果的 15%、30%、50%、70%、90% 为划分节点, 分别对应“球果发育”的编码为 71、73、75、77、79(图 7b、7d、7e、7f、7g)。

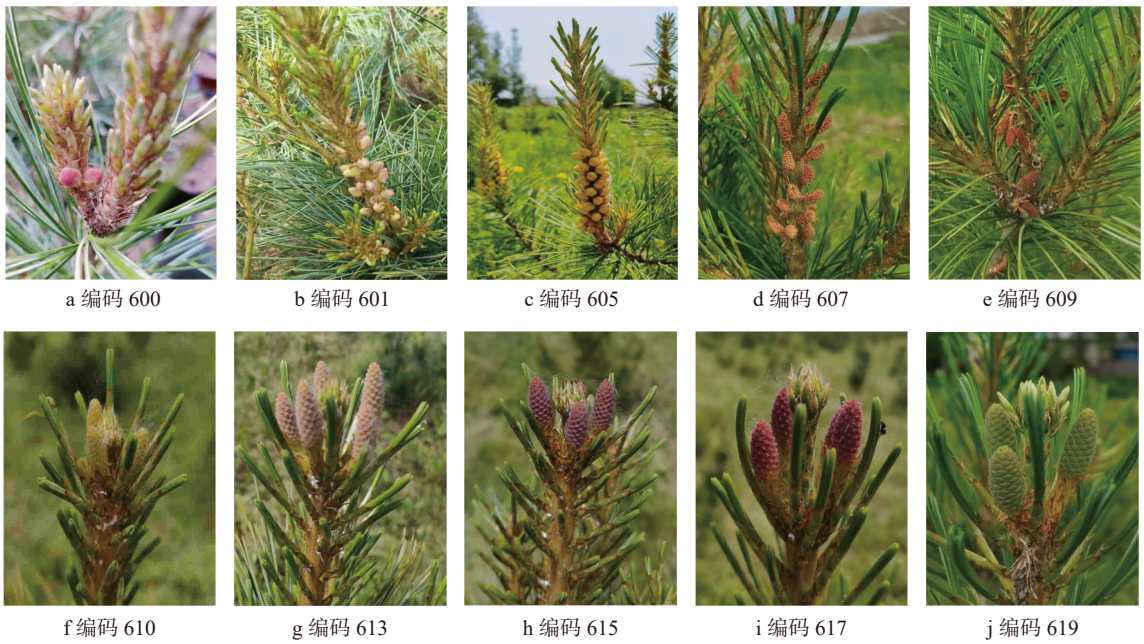
在“球果成熟”阶段, 球果外部形态(果色、鳞片开裂程度)与内部种仁充实程度在时序上呈现明显的异步性。在外部形态方面: 7 月中旬球果体积基本定型, 果皮绿色(编码 800, 图 8a); 8 月上旬果鳞转为深绿色, 水分减少, 部分球果果鳞开始开裂(编码 805, 图 8b); 8 月下旬果鳞渐转为黄绿色或灰绿色, 开裂明显(编码 807, 图 8c), 此时达商品化采收标准; 9 月中下旬果鳞转为深褐色并自然脱落(编码 809, 图 8d)。在内部种仁充实方面: 与外部形态的快速定型不同, 内部种仁的发育进程明显滞后。7 月中旬, 球果内部仅见白色内腔, 隐约可见种子轮廓(编码 810, 图 8e); 7 月下旬—8 月初, 内腔逐渐被种胚占据, 果轴隐约可见(编码 812, 图 8f); 8 月中旬, 果轴清晰, 种子排列明显, 种胚开始发育但尚未充实(编码 815, 图 8g); 8 月下旬—9 月上旬, 种胚迅速膨大



a 编码 500 b 编码 501 c 编码 503 d 编码 510 e 编码 511 f 编码 513

图 5 PGS 5: 红松果林花芽发育阶段

Fig. 5 PGS 5: inflorescence emergence



a 编码 600 b 编码 601 c 编码 605 d 编码 607 e 编码 609

f 编码 610 g 编码 613 h 编码 615 i 编码 617 j 编码 619

图 6 PGS 6: 红松果林开花阶段

Fig. 6 PGS 6: flowering



a 编码 70　b 编码 71　c 编码 72　d 编码 73　e 编码 75



f 编码 77　g 编码 79

图 7　PGS 7：红松果林球果发育阶段

Fig. 7　PGS 7: fruit development



a 编码 800　b 编码 805　c 编码 807　d 编码 809



e 编码 810　f 编码 812　g 编码 815　h 编码 817　i 编码 819

图 8　PGS 8：红松果林球果成熟阶段

Fig. 8　PGS 8: maturity of fruit

充实，胚乳完全硬化（编码 817、819，图 8h、8i），种子达生理成熟。对比外部形态与内部种仁的时序变化可以发现：球果外部形态在 7 月中旬已基本定型（体积达 90% 以上、果色转绿），而内部种仁的充实则滞后约 4～6 周，直至 8 月下旬—9 月上旬才完成，具有明显异步性。

2.3　红松 BBCH 物候编码体系

基于营养生长 4 个主要阶段（营养芽发育（0）、针叶生长（1）、新梢生长（3）和休眠（9））与生殖生长 4 个主要阶段（花芽发育（5）、开花（6）、球果生长（7）和球果成熟（8）），形成了红松全生育期 8 个主要阶段、50 个次级阶段的 BBCH 物候编码量表（表 3），量表中包含具有明确形态与数量指标的描述条目。其中，BBCH 通用量表中 PGS 2（侧枝形成）和 PGS 4（营养繁殖）不适用于红松的生物学特性，在本编码体系中予以省略。

2.4　基于 BBCH 编码的红松物候与气候关系

通过提取 2022—2024 年月最高温、月最低温、月均温和降水量数据，将 BBCH 主要生长阶段（PGS 0～PGS 9）的发生时段与同期水热条件进行匹配，绘制红松物候与气候对应模式图。结果（图 9）表明，红松各物候阶段的季节分布与当地气候因子的年际变化具有明显的时序同步性。3 月下旬—4 月，月均温稳定回升至 5 ℃ 以上，营养芽解除休眠（PGS 0）；5—6 月的月均温超过 10 ℃，新梢进入快速伸长期（PGS 3），有利于光合产物的分配与枝梢建成；开花

表 1 红松开花后第 1 年球果发育情况

Tab. 1 Cone development of *Pinus koraiensis* in the first year after flowering

日期(月-日)	长度		直径		质量	
	长度/cm	发育指数/%	直径/cm	发育指数/%	质量/g	发育指数/%
06-07	1.85 ± 0.23	13.1	0.62 ± 0.18	8.1	0.42 ± 0.33	0.4
06-15	2.10 ± 0.17	14.9	0.88 ± 0.12	11.5	0.66 ± 0.54	0.7
06-22	2.35 ± 0.43	16.6	1.22 ± 0.05	16.0	0.79 ± 0.25	0.8
06-29	2.48 ± 0.35	17.5	1.40 ± 0.14	18.3	1.22 ± 0.19	1.3
07-05	2.52 ± 0.54	17.8	1.47 ± 0.20	19.3	1.85 ± 0.43	2.0
07-12	2.68 ± 0.21	19.0	1.58 ± 0.22	20.7	2.18 ± 0.42	2.3
07-19	2.73 ± 0.33	19.3	1.76 ± 0.21	23.1	3.45 ± 0.22	3.7
07-25	2.90 ± 0.39	20.5	1.83 ± 0.11	24.0	4.36 ± 0.12	4.7
08-01	2.92 ± 0.38	20.7	2.00 ± 0.33	26.2	5.23 ± 0.31	5.6
08-08	2.94 ± 0.49	20.8	2.21 ± 0.16	29.0	5.89 ± 0.57	6.3
08-15	2.94 ± 0.54	20.8	2.35 ± 0.23	30.8	6.27 ± 0.44	6.7
08-22	2.95 ± 0.64	20.9	2.38 ± 0.36	31.2	6.26 ± 0.34	6.7
08-30	2.94 ± 0.31	20.8	2.38 ± 0.24	31.2	6.23 ± 0.76	6.7
09-10	2.93 ± 0.13	20.7	2.37 ± 0.31	31.1	6.09 ± 0.36	6.5
10-10	2.91 ± 0.48	20.6	2.35 ± 0.16	30.8	6.03 ± 0.51	6.5

表 2 红松开花后第 2 年球果发育情况

Tab. 2 Cone development of *P. koraiensis* in the second year after flowering

日期(月-日)	长度		直径		质量	
	长度/cm	发育指数/%	直径/cm	发育指数/%	质量/g	发育指数/%
04-15	3.32 ± 0.35	23.5	2.56 ± 0.38	33.6	8.97 ± 0.76	9.6
05-01	4.33 ± 0.43	30.6	3.17 ± 0.26	41.5	19.22 ± 1.37	20.6
05-08	4.57 ± 0.45	32.3	3.94 ± 0.34	51.6	20.13 ± 1.72	21.5
05-15	6.70 ± 0.62	47.4	4.97 ± 0.22	65.1	30.85 ± 2.10	33.0
06-01	9.26 ± 0.32	65.5	6.34 ± 0.28	83.1	39.82 ± 1.76	42.6
06-07	10.67 ± 0.83	75.5	6.58 ± 0.31	86.2	50.95 ± 2.36	54.5
06-15	12.11 ± 1.16	85.7	7.09 ± 0.16	92.9	76.12 ± 2.76	81.4
06-22	12.73 ± 1.45	90.1	7.39 ± 0.32	96.9	92.24 ± 4.52	98.7
06-29	13.15 ± 1.31	93.0	7.69 ± 0.24	100.8	113.56 ± 4.35	121.5
07-05	13.51 ± 1.37	95.6	7.73 ± 0.51	101.3	127.64 ± 8.34	136.6
07-12	13.73 ± 1.82	97.2	7.87 ± 0.36	103.1	143.98 ± 5.61	154.1
07-19	14.21 ± 1.34	100.6	7.90 ± 0.17	103.5	163.92 ± 9.56	175.4
07-25	14.39 ± 1.60	101.8	8.08 ± 0.27	105.9	166.65 ± 6.12	178.3
08-01	14.56 ± 1.55	103.0	8.08 ± 0.28	105.1	186.03 ± 12.26	199.0
08-08	14.68 ± 1.84	103.9	8.02 ± 0.34	104.6	176.84 ± 11.15	189.2
08-15	14.69 ± 1.24	103.9	7.98 ± 0.51	104.6	174.52 ± 12.34	186.7
08-22	14.61 ± 1.10	103.4	7.95 ± 0.39	104.2	169.33 ± 12.78	181.2
08-30	14.59 ± 1.19	103.3	7.93 ± 0.42	103.9	148.96 ± 6.56	159.4
09-10	14.13 ± 1.59	100.0	7.63 ± 0.38	100.0	93.45 ± 10.27	100.0

表 3　根据 BBCH 量表对红松的物候期的描述

Tab. 3　Description of BBCH stage applied for *P. koraiensis*

阶段	BBCH 编码	描述
PGS 0: 营养芽发育阶段(图1)	00	芽处于休眠状态, 棕色鳞片紧密闭合
	01	芽开始膨大
	03	芽停止膨大; 褐色鳞片开张
	07	芽开始伸长; 褐色鳞片脱落, 开始露出绿色原基组织
	09	芽停止伸长; 可见叶原基
PGS 1: 针叶发育阶段(图2)	10	叶原基出现, 仍与枝条主轴紧密贴合
	11	针叶基部开始与小枝分离, 长度达最终长度的10%
	13	幼叶伸出叶鞘并聚集成束, 呈嫩绿色, 长度达最终长度的20%
	14	针叶束逐渐展开, 呈浅绿色
	15	针叶束快速伸张, 叶色转为翠绿色, 长度达最终长度的50%
	17	叶色浓绿, 角质层增厚, 长度达最终长度的70%
	19	形态发育完成, 进入缓慢生长期, 长度达最终长度的90%以上
PGS 3: 新梢发育阶段(图3)	30	主轴形成, 新梢开始生长
	31	新梢开始生长, 达当年最终长度的10%
	33	枝条呈浅绿色, 更粗一些, 达当年最终长度的30%
	37	枝条明显伸长并增粗, 达当年最终长度的50%
	39	新梢伸长生长基本停止, 达当年最终长度的90%以上, 基部木质化
PGS 5: 花芽发育阶段(图5)	500	雄花芽形成, 黄褐色, 簇生枝条中下部
	501	雄花芽休眠越冬
	503	雄花芽膨大萌动, 芽鳞开裂, 芽尖微红
	510	雌花芽形成, 紫褐色, 枝条顶端
	511	雌花芽休眠越冬
	513	雌花芽膨大伸长, 绿色, 呈小簇状
PGS 6: 开花阶段(图6)	600	雄球花开放, 小孢子叶球呈粉紫色或黄绿色
	601	雄球花初花期: 小孢子叶球膨大, 颜色加深
	605	雄球花盛花期: 花粉囊开裂, 花粉大量释放
	607	雄球花末花期: 花粉基本散尽
	609	花穗枯萎, 脱落
	610	雌球花开放, 大孢子叶球露出, 呈直立小球果状, 黄绿色
	613	雌球花初花期: 芽鳞张开, 珠鳞露出, 淡红色
	615	雌球花盛花期: 珠鳞半开张, 红色
	617	雌球花末花期: 珠鳞完全开张, 深红色
	619	珠鳞闭合, 颜色转绿并增厚, 完成授粉
PGS 7: 球果发育阶段(图7)	70	球果形成, 授粉后, 珠鳞闭合形成幼果
	71	发育初期: 球果体积达成熟果实的15%
	72	发育停滞期: 停止明显生长、进入休眠状态, 持续至翌年春季
	73	快速生长期初: 球果体积达成熟果实的30%
	75	快速生长期中: 球果体积达成熟果实的50%
	77	快速生长期末: 球果体积达成熟果实的70%
	79	发育末期: 球果体积达成熟果实大小的90%以上, 外部形态基本定型
PGS 8: 球果成熟阶段(图8)	800	球果开始成熟。果鳞浅绿色, 粗糙
	805	果鳞深绿色, 水分减少, 部分球果的果鳞开裂
	807	果鳞黄绿色或黄褐色, 果鳞明显开裂, 可以采摘(商品化采收)
	809	果鳞深褐色, 开始自然脱落
	810	球果内部内腔形成, 隐约可见少量种子
	812	白色内腔充满, 果轴隐约可见
	815	果轴清晰位于中央, 种子排列明显可见, 种胚开始发育但尚未充实
	817	内腔和果轴开始褐变, 种胚膨大、充实, 种皮颜色加深
	819	内腔和果轴褐变加深, 隔膜上出现褐色凹坑; 种子形态饱满, 胚乳硬化
PGS 9: 休眠阶段(图4)	90	针叶仍然绿色, 停止生长

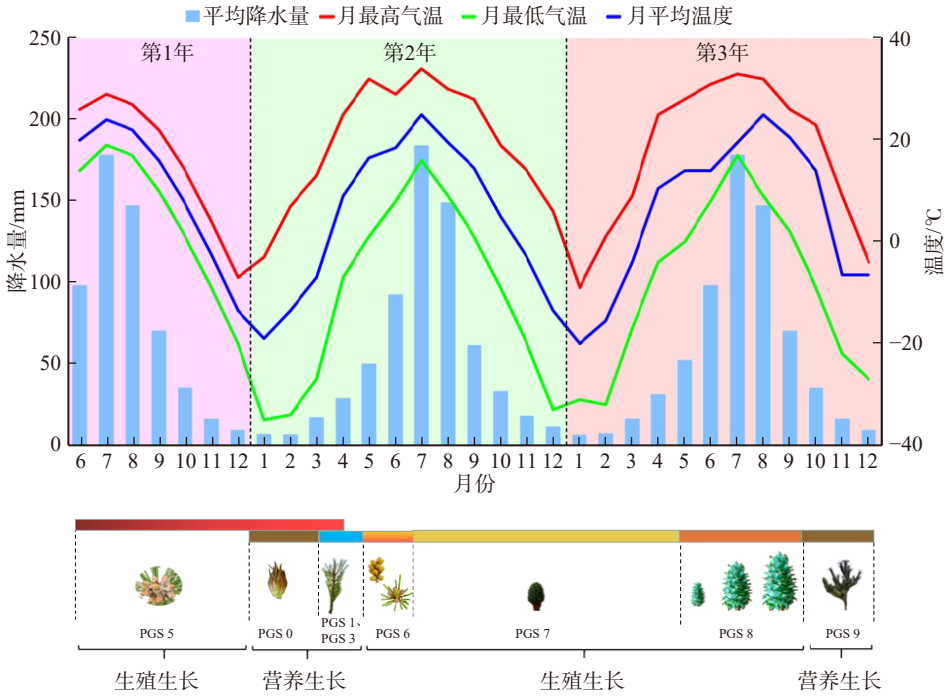


图 9 基于 BBCH 编码的物候与气候关系示意图

Fig. 9 Schematic illustration of the relationship between phenology and climate based on BBCH coding

阶段(PGS 6)集中在 6 月上旬—中旬，期间日照充足，日均温稳定在 15～20 ℃，为授粉成功提供了适宜环境；球果发育期(PGS 7)跨越 2 年，球果成熟期(PGS 8)则对应次年 5—9 月，期间高温与充沛的降水有利于干物质积累与种仁充实；10 月后月均温降至 5 ℃以下，植株进入休眠状态(PGS 9)。

3 讨 论

3.1 红松标准化物候体系填补了针叶树 BBCH 量表的空白

目前，BBCH 量表已在全球数 10 种经济植物中得到成功应用，但裸子植物尤其是针叶树种的系统性 BBCH 构建仍属空白，多个器官发育周期的同步描述尤为缺乏。红松作为我国东北地区重要的生态经济树种，长期以来的物候观测多依赖定性描述，缺乏统一的量化编码体系，制约了跨区域、跨研究者间数据的整合与比较，也限制了红松精准栽培和气候变化的适用性。本研究首次构建了一套涵盖红松营养生长与生殖生长全过程的 BBCH 物候代码体系(8 个主要阶段、50 个次级阶段)，其细化程度与黄蜀葵(*Abelmoschus manihot*)[23]、扁桃(*Prunus dulcis*)[24]、栗子(*Castanea* spp.)[25]和波斯核桃(*Juglans regia*)[26]等相一致。其中，花芽、开花、球果成熟过程采用 3 位数编码，有效解决了生殖发育中异步性的描述难题。该体系的建立为红松物候观测提供了科学、统一且可量化的技术标准，填补了 BBCH 量表在针叶树种中的应用空白。

3.2 红松物候的异步发育与 BBCH 编码策略

红松作为常绿针叶树种，其物候节律在营养生长资源配置、繁殖器官发育时序及球果成熟策略等方面均表现出鲜明的物种特异性，这些特征在其 BBCH 编码体系中得到了有效体现。营养器官发育存在时序异步性，营养芽从萌动(01)到叶原基出现(09)历时约 25～30 d，而针叶从叶原基出现(10)到形态发育完成(19)持续约 50 d，与新梢快速伸长期(4 月初—7 月中旬)部分重叠。这种时序配置与栎属(*Quercus*)植物的 BBCH 描述框架一致[27]，体现了温带木本植物春季生长的集中爆发特征，也意味着花期前后营养器官与生殖器官间存在潜在的资源竞争[28]。为在编码中量化这种异步性，以长度发育指数分级量化各器官进程，使同一器官的发育差异在编码层面可以区分和比较。在确定针叶长度发育指数的基准时，于针叶阶段(PGS1)对针叶大小进行定量比较后，发现当年生针叶小于 1 年生针叶，这与马尾松(*Pinus massoniana*)和红松不同年龄针叶形态特征一致[29−30]，表明针叶在完全展开后的第 1 个生长季内仍在进行物质积累与形态微调。相比之下，1 年生针叶已完成了形态构建，处于生理功能活跃的稳定期，能代表当年生针叶发育的成熟目标状态。而 2 年生及以上针叶可能已进入衰老阶段，其形态易受环境损耗影响，不宜作为衡量发育进程的稳定基准。编码选择一年生针叶作为基准，更能确保针叶发育阶段分级的准确性和可比性。

红松生殖发育的异步性是本研究中最为突出的

编码特征之一。从发育时序上看，红松雌雄球花表现出明显的发育异步性。雄花芽于第 1 年 6 — 7 月形成（500），翌年 5 月上旬萌动开放（503）；而雌花芽虽在同一时期形成（510），但萌动时间滞后约 5 ~ 7 d（513），且雌球花的开放与雄球花散粉在时间上仅有短暂重叠。这种“雄先熟”现象在松属植物中普遍存在，被广泛解释为一种促进异交授粉、避免自交衰退的进化适应策略[31−32]。其驱动机制涉及外部环境与内部生理生化差异。外部受春季积温调控，雄花芽因阈值较低而率先启动[33]。内部则受激素调控，雌球花着生的顶端分生组织富集 IAA 和 ZR，致使雌球花原基分化更为复杂、耗时更长[34−35]，而 GA 和 ABA 信号通路的差异表达也参与延缓了雌球花的发育进程[36]。上述雌雄异步成因的解析，也验证了采用 3 位数并行编码的科学性，与两性花常规 BBCH 编码[37]不同，该策略能够有效区分同一主要阶段内雌、雄球花各自独立的发育轨迹。

跨 2 个生长季的球果发育、成熟也是红松区别于大多数被子植物的重要物候特征，这种呈现“慢—停滞—快”的阶段性特征与云杉（*Picea abies*）规律基本一致[38]，但红松第 1 年的生长比例（约 15% ~ 20%）低于云杉（约 20% ~ 25%），可能与其球果体型更大、种胚发育时间更长有关[39]。同时，本研究发现球果外部形态定型与内部种仁充实之间存在时序脱节。7 月中旬外部体积已达成熟状态的 90% 以上，内部种胚仍处水渍状，8 月下旬—9 月上旬种仁达到生理成熟。该发现从物候学角度证实了球果形态建成后仍持续进行干物质积累的生理特征[40]，印证了区分“外部形态成熟”与“内部种子成熟”的必要性，也确保了 BBCH 编码具有客观的量化阈值。这与火龙果（*Hylocereus undatus*）[41]和皂荚（*Gleditsia sinensis*）[42]中兼顾外观与内部品质的果实发育 BBCH 描述相类似。

3.3　红松 BBCH 量表的局限与展望

本研究构建的红松 BBCH 物候编码体系，首次实现了对该树种全生育期物候事件的标准化与量化描述，为果林的精准管理提供了统一的物候学标尺。然而，本体系目前仅基于黑龙江省单一试验点的观测数据，不同种源、不同林龄及不同生态区的适用性尚需进一步验证。未来应该在不同生态区和不同种源间开展对比观测以完善编码体系，并结合高分辨率气候数据进行体系校准，以提升体系的普适性与精准性。此外，鉴于本研究在秋季异常暖湿年份观察到部分个体出现“二次生长”现象，建议在实际应用中标准化记录 BBCH 代码的同时，对此类非典型物候事件进行补充备注，使本体系不仅能描述常态物候节律，还能有效捕获生长阈值的偏离，从而更精准地服务于红松响应气候变化的长期监测和适应性管理。

4　结　　论

针对红松系统性 BBCH 量表仍为空白这一现状，本研究通过连续 3 个生长季的定点观测与定量测量，构建了适用于红松果林的 BBCH 编码体系。主要结论如下。

（1）构建了包含 8 个主要生长阶段和 50 个次级物候期的红松 BBCH 编码体系，完整覆盖了营养生长与生殖生长的全部发育事件，填补了红松系统性物候编码的空白。

（2）在花芽发育、开花、球果成熟阶段采用 3 位数编码，清晰刻画了雄花先熟的异步特征，揭示了球果外部定型与内部生理成熟之间的时序脱节现象。

（3）确立了以一年生针叶和新梢最终生长量为基准的发育指数作为量化标准，并以球果体积发育指数作为分级依据，使关键物候阶段的判别从经验描述转向客观量化，提升了观测数据的可比性与可重复性。

（4）BBCH 各主要生长阶段的发生时段与月均温、降水量的季节变化具有时序同步性，二者的结合不仅能够描述物候现象，还可反映各发育阶段对温度与水分条件的响应关系，这为气候变化情景下预测红松物候进程提供了重要参考。

参　考　文　献

[1] 代武君, 金慧颖, 张玉红, 等. 植物物候学研究进展 [J]. 生态学报, 2020, 40(19): 6705−6719.
Dai W J, Jin H Y, Zhang Y H, et al. Advances in plant phenology [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(19): 6705−6719.

[2] Menzel A. Phenology: its importance to the global change community [J]. Climatic Change, 2002, 54(4): 379−385.

[3] Chmielewski F M, Rötzer T. Response of tree phenology to climate change across Europe [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 108(2): 101−112.

[4] Koch E, Bruns E, Chmielewski F M, et al. Guidelines for plant phenological observations [J]. World Climate Data and Monitoring Programme, 2007, 1484: 1−41.

[5] Denny E G, Gerst K L, Miller-Rushing A J, et al. Standardized phenology monitoring methods to track plant and animal activity for science and resource management applications [J]. International Journal of Biometeorology, 2014, 58(4): 591−601.

[6] Meier U, Bleiholder H, Buhr L, et al. The BBCH system to coding the phenological growth stages of plants- history and publications [J]. Journal fur Kulturpflanzen, 2009, 61(2): 41−52.

[7] Meier U. Growth stages of mono- and dicotyledonous plants: BBCH monograph [M]. Federal Biological Research Centre for

Agriculture and Forestry, 2018.

[8] Santos R F, Chagas P C, Moura E A, et al. Phenological growth stages based on the BBCH scale and thermal requirements of *Spondias dulcis* Parkinson [J]. Applied Fruit Science, 2025, 67: 1−9.

[9] 车庆辉. 柿不同发育期描述规范及炭疽病抗性分类探究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
Che Q H. The description of different developmental stages of persimmon and the classification of anthracnose resistance [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021.

[10] Paradinas A, Ramade L, Mulot-Greffeuille C, et al. Phenological growth stages of 'Barcelona' hazelnut (*Corylus avellana* L.) described using an extended BBCH scale [J]. Scientia Horticulturae, 2022, 296: 110902.

[11] Vela P, Salinero C, Sainz M J. Phenological growth stages of *Camellia japonica* [J]. Annals of Applied Biology, 2013, 162(2): 182−190.

[12] Pham V T, Herrero M, Hormaza J I. Phenological growth stages of longan (*Dimocarpus longan*) according to the BBCH scale [J]. Scientia Horticulturae, 2015, 189: 201−207.

[13] Zhao G, Gao Y, Gao S, et al. The phenological growth stages of *Sapindus mukorossi* according to BBCH scale [J]. Forests, 2019, 10(6): 462.

[14] Kraus C, Zang C, Menzel A. Elevational response in leaf and xylem phenology reveals different prolongation of growing period of common beech and Norway spruce under warming conditions in the Bavarian Alps [J]. European Journal of Forest Research, 2016, 135: 1011−1023.

[15] 刘迪, 张鹏, 沈海龙. 红松坚果林培育现状与展望 [J]. 福建林业科技, 2012, 39(3): 181−185.
Liu D, Zhang P, Shen H L. Current research situation and prospect of nut silviculture of *Pinus koraiensis* [J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2012, 39(3): 181−185.

[16] Belmega I, Khrutba V, Motruk M, et al. Climatogenic influence and prediction of seasonal rhythm changes in the main forest-forming species of the Northeastern Carpathians [J]. Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 2024, 20(2): 108−123.

[17] 王超, 贾翔, 金慧, 等. 红松对气候变化响应的研究进展 [J]. 北华大学学报 (自然科学版), 2018, 19(6): 728−731.
Wang C, Jia X, Jin H, et al. Advances of *Pinus koraiensis* response to climate change [J]. Journal of Beihua University (Natural Science), 2018, 19(6): 728−731.

[18] 程春香, 孙鹏飞. 五营林区红松物候特征及趋势分析 [J]. 黑龙江气象, 2013, 30(2): 25, 36.
Cheng C X, Sun P F. Phenological characteristics and trend analysis of *Pinus koraiensis* in Wuying forest region [J]. Heilongjiang meteorology, 2013, 30(2): 25, 36.

[19] 葛全胜, 戴君虎, 郑景云. 物候学研究进展及中国现代物候学面临的挑战 [J]. 中国科学院院刊, 2010, 25(3): 310−316.
Ge Q S, Dai J H, Zheng J Y. The progress of phenology studies and challenges to modern phenology research in China [J]. Journal of the Chinese Academy of Sciences, 2010, 25(3): 310−316.

[20] 张秦徽, 李蕊, 赵曦阳, 等. 红松开花结实研究进展 [J]. 分子植物育种, 2019, 17(4): 1364−1372.
Zhang Q H, Li R, Zhao X Y, et al. Research progress on flowering and fruiting of *Pinus koraiensis* [J]. Molecular Plant Breeding, 2019, 17(4): 1364−1372.

[21] 侯丹. 红松无性系花芽分化与花果发育的研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2024.
Hou D. A study on differentiation of flower bud and development of strobilus and cone of *Pinus koraiensis* clones [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2024.

[22] 赵明辉. 红松花芽分化过程及赤霉素诱导成花机理研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2025.
Zhao M H. Study on the development of flower bud differentiation process and the mechanism of gibberellin-induced flower formation in *Pinus koraiensis* [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2025.

[23] Qian W, Hu Y, Lin X, et al. Phenological growth stages of *Abelmoschus manihot*: codification and description according to the BBCH scale [J]. Agronomy, 2023, 13(5): 1328.

[24] Sakar E H, El Yamani M, Boussakouran A, et al. Codification and description of almond (*Prunus dulcis*) vegetative and reproductive phenology according to the extended BBCH scale [J]. Scientia Horticulturae, 2019, 247: 224−234.

[25] Larue C, Barreneche T, Petit R J. Efficient monitoring of phenology in chestnuts [J]. Scientia Horticulturae, 2021, 281: 109958.

[26] Robin J, Bernard A, Albouy L, et al. Description of phenological events of persian walnut (*Juglans regia* L.) according to the extended BBCH scale and historical scales [J]. Horticulturae, 2024, 10(4): 402.

[27] Migaskó H S, Ecseri K. Phenological differences of *Quercus taxa* [J]. Gradus, 2020, 7(2): 135−140.

[28] Wu H B, Zhang J Y, Rodríguez-Calcerrada J, et al. Large investment of stored nitrogen and phosphorus in female cones is consistent with infrequent reproduction events of *Pinus koraiensis*, a high value woody oil crop in Northeast Asia [J]. Frontiers of Plant Science, 2023, 13: 1084043.

[29] 安宁, 李洪果, 赵总, 等. 马尾松产脂量与针叶形态特征的关系 [J]. 西北林学院学报, 2020, 35(1): 108−111.
An N, Li H G, Zhao Z, et al. Relationship between the resin yield and needle morphology characteristics of *Pinus massoniana* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(1): 108−111.

[30] 王朋阳, 吴海波, 姚莉, 等. 红松营养枝和生殖枝不同叶龄针叶形态解剖结构和光合特性 [J]. 应用生态学报, 2025, 36(1): 77−85.
Wang P Y, Wu H B, Yao L, et al. Morphological anatomical structure and photosynthetic characteristics of needles with different ages on vegetative and reproductive branches of *Pinus koraiensis* trees [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(1): 77−85.

[31] 毛金燕, 陈赢男, 尹佟明. 林木花芽分化与花期调控研究进展 [J]. 植物生理学报, 2025, 61(2): 111−122.
Mao J Y, Chen Y N, Yin T M. Research progress on the floral bud differentiation and flowering time regulation in forest trees [J]. Plant Physiology Journal, 2025, 61(2): 111−122.

[32] Álvarez-Cansino L, Díaz-Barradas M C, Zunzunegui M, et al. Gender-specific variation in physiology in the dioecious shrub *Corema album* throughout its distributional range [J]. Functional Plant Biology, 2012, 39(12): 968−978.

[33] 王振宇, 刘文欢, 谢伟, 等. 红松开花结实与气象因子相关规律的研究 [J]. 东北林业大学学报, 1992(S1): 118−120.
Wang Z Y, Liu W H, Xie W, et al. Study on the correlation between flowering and fruiting and meteorological factors of *Pinus koraiensis* [J]. Journal of Northeast Forestry University, 1992(S1): 118−120.

[34] 史绍林. 红松营养生长与生殖生长转换中植物激素动态研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2020.
Shi S L. Plant hormone dynamics during transition from vegetative growth to reproductive growth of Korean pine [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2020.

[35] Mendez-Lopez A Y, Lagunes-Espinoza L D C, González-Esquinca A R, et al. Phenological characterization of chipilín (*Crotalaria longirostrata* Hook. & Arn.) and relationship between the phenological stage and chemical composition of leaves [J]. South African Journal of Botany, 2023, 154: 140−148.

[36] 孙佳彤, 杨会侠, 李虹谕, 等. 红松雌球花原基分化的转录组分析 [J]. 沈阳农业大学学报, 2025, 56(3): 51−60.
Sun J T, Yang H X, Li H Y, et al. Transcriptome sequencing analysis of female cone primordial differentiation of *Pinus koraiensis* [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2025, 56(3): 51−60.

[37] Taghavi T, Rahemi A, Suarez E. Development of a uniform phenology scale (BBCH) in hazelnuts [J]. Scientia Horticulturae, 2022, 296: 110837.

[38] Škvareninová J, Mrekaj I. Impact of climate change on Norway spruce flowering in the southern part of the western Carpathians [J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 2022, 10: 1−14.

[39] 徐玉金, 李翔, 李岩, 等. 红松种实性状及营养成分动态变化分析 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(7): 67−76.
Xu Y J, Li X, Li Y, et al. Dynamic changes in seed, cone traits and nutritional components of *Pinus koraiensis* [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(7): 67−76.

[40] 殷东生, 吴海波, 张建瑛, 等. 环剥和去叶对红松雌球果和枝生长及不同组织和器官中养分含量的影响 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(11): 3671−3680.
Yin D S, Wu H B, Zhang J Y, et al. Effects of girdling and defoliation on the growth of female cones and branches and nutrient content in different tissues and organs of *Pinus koraiensis* [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(11): 3671−3680.

[41] Kundan K. Phenological growth stages of dragon fruit (*Hylocereus undatus*) according to the extended BBCH-scale [J]. Scientia Horticulturae, 2016, 213(14): 294−302.

[42] Liu Q, Yang J, Liu Y, et al. Phenological growth stages of *Gleditsia sinensis* Lam. (Fabaceae) using the extended BBCH scale [J]. Annals of Applied Biology, 2023, 183(3): 320−332.

（责任编辑　赵田芸
责任编委　马履一）