

doi:10.16779/j.cnki.1003-5508.2016.03.010

都江堰市银杏物候时序特征的数码相机 监测与分析

廖韵¹,董奎²,付静静³,曹钦⁴,王韵⁵,廖邦洪⁵

(1. 四川省森林旅游服务中心,四川成都 610081;2. 四川省林业勘察设计研究院,四川成都 610081;
3. 四川农业大学都江堰校区学生工作部,四川都江堰 611830;4. 北京地林伟业科技股份有限公司西南(成都)
分公司,四川成都 610081;5. 四川农业大学建筑与城乡规划学院,四川都江堰 611830)

摘要:红叶树种秋天呈现的色彩是由树种的遗传基因决定的,而在一年中不同季节的颜色表现和变换是由叶片内含的叶绿素、花青素和叶黄素数量及其比例消长制约的;环境气候条件和季节的变化则起着空间和时间上的驱动和引导作用。采用可见光-红外数码相机延时摄影方法得到四川都江堰市银杏2014年的物候时序图像数据,用ENVI/IDL编程进行图像分析提取其NDVI、Gcc、ExG 3种植被指数的时序数据;利用TIMESAT拟合建立双逻辑斯蒂曲线模型,用1/2最大值法计算得到都江堰市银杏2014年的关键物候期(年序日):生长季开始期(SOS)、生长最大值时期(MOE)、生长季结束期(EOS)和生长期(LOS)。然后,对银杏秋季的NDVI、Gcc、ExG 3种植被指数曲线模型的下降速率(百分率)进行分析,表明:下降百分率在50%~90%区间所对应的物候年序日,与同年四川省四期红叶指数的发布时间(反映全省红叶景区的观赏适宜时期)有良好的响应关系,其中由NDVI植被指数得到的时间最为接近。基于数码相机植被颜色指数的树木物候遥感监测方法,在森林生态旅游研究中具有巨大的应用潜力。

关键词:银杏;物候;时序特征;数码相机;植被指数;遥感监测;生态旅游;都江堰市

中图分类号:S792.95 文献标识码:A 文章编号:1003-5508(2016)03-0054-08

Digital Lapse Photography-based Monitoring of Foliage Phenological Time Variance of *Ginkgo biloba* in Dujiangyan

LIAO Yun¹ DONG Kui² FU Jing-jing³ CAO Qing⁴ WANG Yun⁵ LIAO Bang-hong⁵

(1. Forest Tourism Service Center, Chengdu 610081, China; 2. Sichuan Forestry Inventory and Planning Institute, Chengdu 610081, China; 3. Dujiangyan Campus, Sichuan Agricultural University, Dujiangyan 611830, China; 4. Chengdu Company, Beijing Dilinweiye Scientific and Technology Co. Ltd, Chengdu 610081, China; 5. College of Architecture, Urban and Rural Planning, Sichuan Agricultural University, Dujiangyan 611830, China)

Abstract: Favored foliage colors in autumn are genetically determined by the genes of tree species, different seasonal colors and transition are theoretically controlled by the pigments (chlorophyll, anthocyanidin, xanthophyll etc.) in leaves, and the transitions of geographical environment and seasons drive and model them in time and space. In 2014, digital lapse photography was used to collect the phenological image time series of *Ginkgo biloba* growing in Dujiangyan Campus, then ENVI programming was used to calculate temporal changes of three vegetation indices, NDVI, Gcc and ExG. A computer program, TIMESAT, was applied to fit the double logistic function of a time series data of NDVI, Gcc and ExG of *Ginkgo biloba* in Dujiangyan. The maximum value method of the half curve was used to calculate the key phenological date (the serial days of a year) of *G. biloba*: the start date of growing season (SOS), the end date of growing

收稿日期:2016-03-31

基金项目:四川红叶观赏指数发布。

作者简介:廖韵(1983-),女,汉族,四川省都江堰市人,工程师,从事生态旅游专项工作。

season(EOS), the maximum of growing and the length of season. Analysis was made of decline percentage in fall along the curves of NDVI, Gcc and ExG respectively, and the results showed the percentage (the serial days of a year) between 50% and 90% had a good response to the released time of four red leaf tourism guide index in the same year of Sichuan Province, especially DOY from the NDVI curve was almost the same. The result showed the phenological monitoring method by digital camera-based remote sensing was a potential tool for forest tourism research.

Key words: *Ginkgo biloba*, Phenology time variance, Digital camera, Vegetation/color index, Remote sensing, Ectourism, Dujiangyan City

在一年中相应的季节,应时观赏自然界植物大规模的叶、花、果所构成的美景已经成为我国及四川生态旅游实践的新常态。2006年,四川省率先研究发布了红叶观赏指数,迄今已经连续9年,成为四川生态旅游的响亮“名片”。

根据植物色彩的观赏期可以将观赏植物划分为常色叶、春色叶和秋色叶植物三大类。彩叶植物亦称色叶植物,是那些在自然界中存在或经人工栽培选育,其叶片在整个生长季节或生长季节的某些阶段表现出与自然绿色明显不同的色彩,有较高观赏价值的植物总称。在生态旅游中,红叶树种或红叶主要指树木叶片在秋季变成红、黄、橙等艳丽色彩的秋色叶树种及其树叶,当它们在自然界形成较大规模的群体,随着自然物候变化而改变色彩时就形成了美轮美奂、撼动人心的美景。红叶是一种自然物候现象,一种人与大自然之间互动交流的媒介^[1]。

前人对红(秋色)叶树种在年生长进程中叶片变色与色素、可溶性糖等内含物含量的变化以及叶片光合特性的变化之间的关系进行了比较深入的研究^[2-6]。植物物候学是研究植物受生物因子与非生物因子如气候、水文、土壤等影响而出现的以年为周期的自然现象的学科。植物的发芽、展叶、开花、结果、叶变色、落叶等物候现象,不仅反映当地、当时的环境条件,而且反映过去一段时间内环境条件的积累,是气候与自然环境变化最直观、敏感的综合指示器和“诊断指纹”^[7-8]。因此,研究红叶树种秋叶物候色谱的时序特征及其地理空间变化,对于今后进行红叶观赏指数的精细预报发布、引导公众参与红叶观赏,以及深入研究气候变化对观赏红叶等生态旅游行为的影响^[9-10]都具有很重要的意义。

齐全,气候环境变化多样,红(彩)叶树种资源十分丰富。按照四川森林类型的水平和垂直地带分异,全省划分为四川盆地及边缘常绿阔叶林地带、川西亚高山暗针叶林地带和川西北高原灌丛、草原地带。在每个地带内,按照各森林类型优势树种区系组合的变化,进一步划分为3个森林区和24个森林小区^[11-12]。在盆地内部马尾松林、柏木疏林林区(Ia):典型的是银杏(*Ginkgo*)、水杉(*Metasequoia*)等树种,代表性景区为成都地区各风景区(如青城山天师洞、大邑白云寺等);在盆地北缘山地含有常绿栎类的落叶阔叶林林区(Ib):典型的是水青冈(*Fagus*)等树种,代表性景区为米仓山国家森林公园(南江县);在盆地西缘山地湿性常绿樟、栎林林区及川西亚高山暗针叶林地带(Ic、IIa):主要是槭树(*Acer*)、落叶松(*Larix*)、桦木(*Betula*)等树种,代表性景区分别为泸定燕子沟风景区、理县米亚罗自然保护区、黑水达古冰山风景区。这些树种的色彩,开始变色、结束变色的时间和持续时间各不相同,因而,构成了四川红(彩)叶旅游从高山到平原(河谷)、从北到南观赏时间此起彼伏、持续时间长的鲜明特点(图1)。

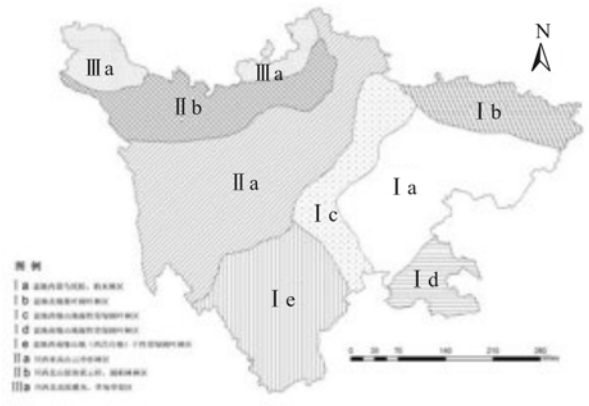


图1 四川森林的地理分区

Fig. 1 Geographical regions of forest types in Sichuan Province

1 研究地点概况与数据获取

1.1 研究地点与研究对象选择

四川省山地海拔高差大,平原、丘陵、山地地貌

四川农业大学都江堰校区位于 E103° 37'

12. 05", N31°00'25. 85", 地处川西高山峡谷区 - 成都平原的交会之地, 紧邻都江堰 - 青城山世界文化遗产都江堰景区, 由四川省灵岩山森林公园 (四川农业大学管理) 和教学园区两部分组成。灵岩山森林公园所辖森林经营历史悠久, 1916 年成为四川高等农业学校设置的灌县灵岩山试验林场, 1941 年属原国立四川大学农学院实习农场灌县灵岩山森林分场, 1953 年 ~ 2001 年为原四川省林业学校实习林场, 从 2001 年起为四川农业大学教学科研实习基地, 面积约 80 hm²。教学园区经过 60 多年的发展, 园内大树参天、绿树成荫、环境优美, 被誉为都江堰市的“城北公园”。

根据从天地图·成都 (<http://www.tianditucd.cn/>) 获取的灵岩山森林公园 (集水区) 范围的最新高分卫星影像, 在 ArcGIS 等软件的支持下, 对影像进行镶嵌、地理配置等预处理。根据高分影像, 对乔木层林冠进行影像分类、识别提取出各个乔木树种的树冠覆盖斑块; 然后, 分别在落叶树种与常绿树种斑块界线 (季相) 分明的春、秋两季, 选择晴朗天气, 现场调查并拍摄树冠数码照片进行验证, 形成灵岩山森林公园 (集水区) 优势树种斑块分布图。对灵岩山森林公园 (集水区) 共解译出 357 个树种斑块, 95 个优势树种, 主要树种有水杉、银杏、栎类、桉木、柳杉、楠木等。按照该图进行统计, 落叶针叶林面积为 0. 21 km², 占 7. 96%; 落叶阔叶林面积为 1. 01 km², 占 38. 80%; 常绿针叶林面积 0. 38 km², 占 14. 47%; 常绿阔叶林面积 36. 40 km², 占 36. 40%, 其它 (竹林、灌木等) 面积为 0. 06 km², 占 2. 37%。银杏、水杉在森林公园 (集水区) 内占的面积比重为 11. 29%。在教学园区, 根据 2012 年 12 月实地核实统计调查, 共有乔木 (或小乔木) 树 2073 株, 隶属于 62 个科、139 个属、222 个种; 樟科、木犀科、木兰科、银杏科、蔷薇科树木的株数比例较大, 占校园树木总数的 51. 8%。其中, 银杏、水杉占的株数比重为 11%, 无论株数还是树木年龄和体量, 它们都是名副其实的“标志性”树种。在四川省评选的“十大千年树王”中, 都江堰市的千年古银杏就占了其中两席。生长在灵岩山森林公园和教学园区的银杏和水杉, 尤其是深秋时节银杏、水杉的绚丽秋叶, 更是四川农业大学都江堰校区的标志性美景之一, 成为都江堰市对外微博推荐的著名风景, 见图 2 和图 3。

1.2 银杏物候变化时序图像数据的获取

近 10 多年以来, 随着数码相机的普及以及计算机软硬件在图像处理方面的快速发展, 数码相机自

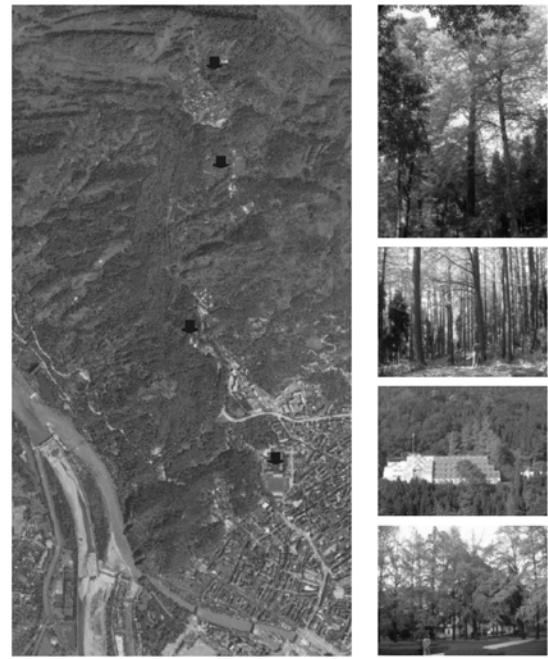


图 2 都江堰市灵岩山 QuickBird 卫星影像及灵岩山森林公园不同地点生长的银杏 [a 灵岩寺 (海拔 1 160 m), b 上林场管理处附近 (海拔 1 000 m), c 成都市国土资源培训中心 (海拔 800 m), d 校园中心区 (海拔 720 m) (按照照片顺序从上至下)]

Fig. 2 *Ginkgo biloba* trees in various sites of Lingyanshan Forest Park, Dujiangyan City

动拍照和数据网络传输的新观测技术被应用到植物物候观测中^[13-16]。Crimmins 等^[17]人利用数码相机重复拍摄亚利桑那州图森郊区的植物, 发现数码相机重复拍摄 (延时摄影技术) 是一种可靠的物候监测方法, 且可以存档数码照片, 供以后进一步分析研究。Ide 等^[18]人利用数码相机对 7 个日本国家公园的常绿阔叶林、落叶阔叶林及湿地进行长达 8 年的监测, 通过计算植被绿色补偿指数 (ExG) 来确定植物物候期, 结果证明 ExG 时间序列能够很好地反映各植被类型的物候变化。Zhao Junbin 等^[19]利用数码相机监测研究了云南热带季雨林和山地常绿阔叶林代表树种的物候变化。

根据前人的研究方法, 选择四川农业大学都江堰校区校园内的银杏、水杉作为四川盆地西缘山地红 (秋色) 叶树种的代表, 对其进行物候色谱时序特征的精细监测分析。考虑监测对象要具有代表性, 监测系统要易于安装和管理, 将物候监测相机设置在校区第二教学楼五楼 (楼高约 16 m 处)。监测银杏、水杉样树为 20 世纪初栽植、树龄 60 多年的大树, 银杏树高约 25 m, 胸径约为 50 cm; 水杉树高约 28 m, 胸径约 46 cm; 监测部位为树冠上部, 拍摄角度垂直于树干。



图3 四川农业大学都江堰校区校园中心地带银杏、水杉不同季节景观

Fig.3 *Ginkgo biloba*, *Metasequoia* in the center of Dujianyan Campus, SICAU

监测系统包括:IP Camera 两台,PC 机两台,PC 操作系统为 Windows XP,相机与电脑通过网线连接。监测管理软件为在海康威视摄像机管理软件开发包 SDK 基础上开发的《数码相机监测自动管理系统》,该软件可按照预先设定好的时间定时拍摄,并且将照片自动保存到 PC 机。监测系统和相机参数见图 4 和表 1。每天从上午 6:40 到下午 6:00 采集

34 张图像,图像格式为 JPEG,分辨率为 $2560 * 1920$,物候照片自动按照拍摄时间进行文件名的命名。从 2014 年 4 月 16 日到 2014 年 12 月 16 日,除去停电及仪器故障等原因以外,共获取 RGB 图像 7604 幅,红外图像 7158 幅。

表 1 监测数码相机参数表

Tab.1 The information of digital camera

型号	DS-2CD883F-E	DS-2CD8283F-EI
名称	枪型 IP Camera	日夜型枪型 IP Camera
传感器类型	CMOS	CMOS
镜头	MF0814M-5MP	内置
光圈	DC 驱动自动光圈	DC 驱动自动光圈
焦距	8 mm	3.5 ~ 9 mm
分辨率	500 万	500 万
图像最大尺寸	2560 × 1920	2560 × 1920
日夜转换模式	ICR 红外滤片式	ICR 红外滤片式



图4 监测系统及采用的 IP Camera 技术参数

Fig.4 The digital camera monitoring system and parameters

3 数据分析

3.1 银杏颜色指数计算

采用 IDL 程序语言自编“植物图像分析工具”

进行计算分析。确定银杏图像的分析区域,即感兴趣区(region of interest, ROI),然后通过“数码照片处理”工具进行批量分析,获得每帧银杏图像 ROI 的平均 R、G、B 值。

在利用数码相机图像分析植物物候时,提取的是图像的 R、G、B 通道值。由于通道之间存在高度相关性,加上受到太阳光线的影响,需要将 R、G、B 值进行线性或非线性转换^[20~21]。近年来,由于数码相机在地面及进地面植物物候研究中不断应用,证实了相对绿度指数 Gcc、绝对绿度指数 ExG 等基于数码相机传感器的植被颜色指数表征植物物候变化的有效性^[22~23]。

$$RGB = DN_{green} + DN_{red} + DN_{blue} \quad (1)$$

$$Rcc = DN_{red} / (DN_{green} + DN_{red} + DN_{blue}) \quad (2)$$

$$Bcc = DN_{blue} / (DN_{green} + DN_{red} + DN_{blue}) \quad (3)$$

$$Gcc = DN_{green} / (DN_{green} + DN_{red} + DN_{blue}) \quad (4)$$

$$ExG = 2 * DN_{green} - (DN_{red} + DN_{blue}) \quad (5)$$

$$NDVI = (DN_{nir} - DN_{red}) / (DN_{nir} + DN_{red}) \quad (6)$$

式中: DN_{green} 、 DN_{red} 、 DN_{blue} 、 DN_{nir} 分别表示 ROI 绿、红、蓝波段和红外波段的平均通道值, $NDVI$ 为归一化植被指数。

3.2 银杏物候时序变化曲线拟合与关键物候特征提取

采用已有研究中用于数码相机物候数据平滑最常用的 Logistic 函数拟合法,使用 Jönsson P 和 Ek-lundh L^[24~25] 共同开发的 TIMESAT 软件包中双 Lo-

gistic 模块对数据进行平滑处理,以去除时间序列曲线中的噪音。利用动态阈值法,采用李明等^[26] 提取以 1/2 最大值作为物候转变关键点来提取物候关键期。物候关键期参数定义如下:

(1) 生长季开始期(SOS): 植被生长阶段, 植被指数从最小值开始, 增长到与最大值之间 50% 的时刻。

(2) 生长季结束期(EOS): 植被衰老阶段, 植被指数从年中最大值开始, 下降到与最小值之间 50% 的时刻。

(3) 生长季长度(LOS): 从生长季开始期到生长结束期之间的时间长度。

(4) 生长最大值(MOE): 植被指数达到年内最大值的时刻。

利用 TIMESAT 软件中双 Logistic 函数分别对选定的能够表征森林物候变化趋势的植物颜色指数进行拟合。拟合后的物候时间序列植物颜色指数曲线滤除了噪音, 变得平滑, 较好地反映了植物物候变化过程, 见图 5。为了更加精细地反映银杏物候变化过程, 获得银杏在一个生长季内各个重要物候节点的信息, 进一步计算银杏在春季芽萌动、展叶生长期内各种植物颜色指数上升 10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90% 与达到最大值时的天数(年序日), 以及秋季树木叶片变色衰老期内各种植物颜色指数下降 10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90% 的天数(年序日)^[27~28], 见表 2。

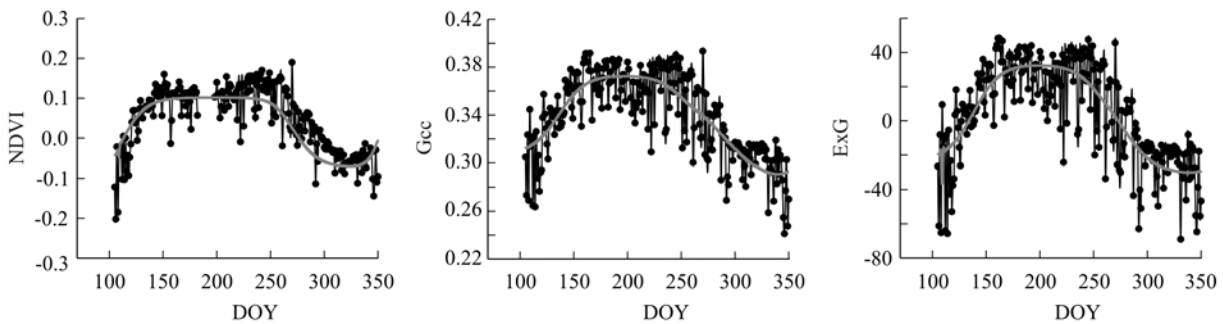


图 5 拟合后银杏颜色指数时间序列曲线

Fig. 5 The VI time series curve of index time series after fitting

拟合曲线表达的银杏叶色物候时序变化特征: 在冬季和初春季节, 银杏冠层无绿叶, 处于休眠期; 随着春季到来, 气温逐渐升高, 银杏冠层芽开始萌动继而出现绿色, 进入变绿期; 随着温度上升、雨季到来, 银杏生长发育逐渐加速, 冠层叶面积及绿色程度逐渐达到最大值, 进入生长成熟期; 随着温度下降, 银杏冠层叶片开始变黄并开始凋落, 进入变色衰老

期; 随着叶片变黄逐渐加快, 银杏生理活动逐渐降至最低, 叶片全部凋落, 重新进入休眠期。

从拟合的叶色物候时序曲线中提取银杏的物候关键期生长季开始期(SOS)、生长季结束期(EOS)、生长季长度(LOS)和生长季最大值日期(MOE), 见表 3。可以看出, 基于数码相机的 NDVI、Gcc 与 ExG 获得的银杏物候关键期近似。生长季开始期在 130 d

表 2 银杏植被指数不同变化率发生天数(单位:年序日)

Tab. 2 The phenological onset under different rates of *Ginkgo biloba* (unit:DOY)

季节	变化率 (%)	植被指数		
		NDVI	Gcc	ExG
生长期(芽萌动-展叶定形期,SOS-MOE)	10	112	111	115
	20	117	117	121
	30	119	121	125
	40	122	125	128
	50	124	129	131
	60	126	132	134
	70	129	136	137
	80	132	141	141
	90	137	147	147
	最大值	176	182	183
变色衰老期(展叶定形、生长旺盛-落叶结束,MOE-EOS)	10	261	243	245
	20	271	257	256
	30	277	267	264
	40	283	275	270
	50	287	283	281
	60	292	291	283
	70	297	298	288
	80	304	307	295
	90	313	318	307

左右;生长季结束期在 280 d 左右;生长季长度在 150 d 左右;生长最大值日期在 180 d 左右。ExG 和 Gcc 得出物候关键期偏差较小,最大偏差在 4 d 之内。而从 NDVI 得到的 SOS 及 MOE 早于 ExG 和 Gcc, EOS 晚于 ExG 和 Gcc;基于 NDVI 的银杏 LOS 长于 ExG 和 Gcc,其中 NDVI 与 ExG 和 Gcc 得出的物候关键期最大偏差达 13 d。

表 3 数码相机监测银杏关键物候时序节点(初日)(单位:年序日)

Tab. 3 The phenological onset dates based digital camera (unit:DOY)

植被指数	SOS	EOS	LOS	MOE
NDVI	124	287	163	176
Gcc	129	283	154	182
ExG	131	281	150	183

3.3 银杏秋叶变色物候期精细监测与“红叶观赏指数”的关系

在赏秋旅游中,美国天气频道(<http://www.weather.com>)把秋色叶的变色程度定义为 5 级^[29]:无变化(变色 10% 以下)、斑块状变色(变色 10% ~ 50%)、变色接近峰值(变色 50% ~ 75%)、变色达到峰值(变色 75% ~ 100%)、变色峰值后期;秋叶观赏网(The Foliage Network,<http://www.foliagenetwork.net>)定义为 6 级:无变色(little/no change),少量变

色(low color),中度变色(moderate color),大量变色(high color),变色高峰期(peak color),变色高峰后期(post-peak color)。加拿大按照红叶树种在秋季色彩变化全程中主色调变化的差异,分为黄色、橘红色和红色 3 个波峰期(wave),分别对应初秋、中秋和晚秋 3 个时期^[30]。芬兰的季节变化监测网(<http://virtual.vtt.fi/virtual/proj2/envimon/season.htm>)则定义为 5 级:树木叶色(大小)正常态(Leave full sized),树叶开始变黄(红)(Yellowing starts),树木开始落叶(Leaves start falling),树叶完全变黄(红)(Leaves yellowed),树木完全落叶(Leaves fallen)^[31]。

《四川省红叶指数发布管理办法》制定了指导四川省红叶旅游的红叶指数,将它定义为落叶树种树叶受气温影响,叶绿素合成受阻,使其叶片变为红黄、橙红等艳丽色彩程度的指标¹⁾。根据四川省内各主要红叶景区所处的地理位置、环境气候条件以及树叶变色的程度等,将“红叶指数”分为Ⅲ级:“Ⅰ级红叶指数”代表叶子变色率为 10% ~ 35% 之间,处于叶片发黄状态,较适宜出游观赏;“Ⅱ级红叶指数”代表叶片变色率为 35% ~ 60% 之间,处于红黄与橙红之间,适宜观赏;“Ⅲ级红叶指数”代表叶片变色率为 60% ~ 95% 之间,全部是深红、暗红或紫红色,是观赏红叶的最佳时期。

将前述都江堰市银杏在 2014 年秋季变色衰老期中颜色指数变化率下降发生天数的年序日(表 4)进行变换,用习惯的月-日时间表示,结果见表 5。

表 4 2014 年银杏颜色指数变化率下降发生天数(单位:年序日)

Tab. 4 The phenological onset under different rates of *Ginkgo biloba* (unit:DOY)

季节	颜色指数下降 变化率(%)	颜色指数		
		NDVI	Gcc	ExG
	最大值	176	182	183
	10	261	243	245
	20	271	257	256
	30	277	267	264
变色衰老期(展叶定形、生长旺盛-落叶结束,MOE-EOS)	40	283	275	270
	50	287	283	281
	60	292	291	283
	70	297	298	288
	80	304	307	295
	90	313	318	307

1) 四川省森林旅游服务中心. 四川省红叶指数发布管理办法, 2006-09-20.

表5 2014年银杏颜色指数变化率(%)下降对应的日期(月-日)

Tab.5 The phenological onset under different rates of *Ginkgo biloba* (unit:DOY)

季节	颜色指数下降 变化率(%)	颜色指数		
		NDVI	Gcc	ExG
变色衰老期(展 叶定形、生长旺 盛-落叶结束, MOE-EOS)	最大值	6月25日	7月1日	7月2日
	10	9月18日	8月31日	9月2日
	20	9月28日	9月14日	9月13日
	30	10月4日	9月24日	9月21日
	40	10月10日	10月2日	9月27日
	50	10月14日	10月10日	10月8日
	60	10月19日	10月18日	10月10日
	70	10月24日	10月25日	10月15日
	80	10月31日	11月1日	10月22日
	90	11月8日	11月13日	11月3日

从表5可以看出,基于Gcc、ExG、NDVI颜色指数下降变化率在50%~90%之间时,反映的各个关键物候期的时间,与四川省2014年一至四期红叶指数发布的时间存在着基本一致的对应关系。当银杏颜色指数下降率到50%左右时,全省大部分红叶景区红叶指数为I级,进入“较适宜出游观赏”阶段;下降率达到60%~70%左右时,大部分景区红叶指数为II级,进入“适宜观赏”阶段;下降率达到80%左右时,大部分景区红叶指数为III或II级,处于“最佳观赏或适宜观赏”阶段;下降率到90%左右时,不少景区的红叶进入凋落状态,红叶指数回复到II或I,为“适宜观赏或较适宜观赏”状态。这说明,用本文方法从理论上计算的时间,可以揭示全省红叶变色程度发展过程的时间趋势。但是,由于本文监测研究的对象是银杏,而全省目前发布红叶指数的代表性景区的红叶树种主要是桦木、落叶松、槭树、水青冈等,彼此的生物生态学特性和环境气候条件都存在显著的差异,因此,这些景区红叶树种颜色指数的下降变化率与其红叶变色程度及变色率等之间的关系,还需要继续研究。

4 结论与讨论

(1)采用数码相机延时摄影获得四川省都江堰市银杏2014年的物候时序图像,用ENVI编程分析提取其NDVI、Gcc、ExG3种遥感指数的时序数据,建立了它们的双逻辑斯蒂曲线模型;利用TIMESAT软件工具计算分析获得了都江堰市银杏2014年关键物候期的时序特征:生长季开始期(SOS)、生长最大值时期(MOE)、生长季结束期(EOS)和生长期

(LOS);

(2)对银杏NDVI、Gcc、ExG3种指数在2004年双逻辑斯蒂曲线模型进行下降百分率的精细分析,表明它们的下降百分率在50%~90%区间时所对应的物候特征年序日,与同年四川省四期红叶指数发布时间反映的全省红叶景区的观赏适宜时期均有良好的响应,其中NDVI指数的表现更为接近。

红(秋色)叶树种及其组成的森林植被由于其显著的年生长周期变化,形成了叶片内叶绿素、水分、干物质等含量及其波谱吸收特性的年变化,并显著区别于常绿树种及其组成的植被。植被指数是一种无量纲指数,是植被在两个或多个波段的光谱反射率的比值、线性或非线性组合,主要用来诊断植被生长状态、绿色植被活力以及反演各种植被参数。数码相机作为一种R、G、B3通道遥感传感器,近年来越来越多地应用于植物/植被物候与生长的地面(近地面)遥感监测,形成了一套基于数码相机植被颜色指数的遥感方法。在以树木或植被物候特征变化为基础,以大规模的树木叶、花、果为主要观赏(品尝)对象的森林生态旅游研究中,基于数码相机和卫星天地一体的遥感技术必将进一步发挥其巨大的作用^[32~34]。

参考文献:

- [1] 李小英,胡涌,段安安. 红叶文化赏析[J]. 北京林业大学学报(社会科学版),2006,5(2):20~23.
- [2] 丁廷发,谢必武,张凤龙. 重庆市5种彩叶植物色素和色彩变化规律研究[J]. 重庆三峡学院学报,2006,22(3):78~80.
- [3] 聂庆娟,史宝胜,孟朝,等. 不同叶色红栎叶片中色素含量、酶活性及内含物差异的研究[J]. 植物研究,2008,28(5):599~602.
- [4] 胡静静,沈向,李雪飞. 黄连木秋季叶色变化与可溶性糖和矿物质元素的关系[J]. 林业科学,2010,46(2):80~86.
- [5] 姜卫兵,庄猛,韩浩章,等. 彩叶植物呈色机理及光合特性研究进展[J]. 园艺学报,2005,32(2):352~358.
- [6] 葛雨萱,王亮生,周肖红,等. 香山黄栌叶色和色素组成的相互关系及时空变化[J]. 林业科学,2011,47(4):38~42.
- [7] 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]. 中国科学院院报,2010,25(3):311.
- [8] 杨国栋,陈效速. 木本植物物候相组合分类研究[J]. 林业科学,2000,36(2):40.
- [9] 徐雨晴,陆佩玲,于强. 气候变化对植物物候影响的研究进展[J]. 资源科学,2004,2(1):2~4.
- [10] 李慧湘. 气候变化对本溪县主要植物物候的影响[D]. 吉林:东北师范大学,2008.
- [11] 李承彪. 四川森林地理分区的研究之一——四川森林地理分

- 区总论. 四川省林业科学研究院:四川森林生态研究,295 - 307[M]. 四川科学技术出版社,1990,成都.
- [12] 李承彪. 四川森林地理分区的研究之二——四川森林地理分区各论. 四川省林业科学研究院:四川森林生态研究,309 - 359[M]. 四川科学技术出版社,1990,成都.
- [13] Richardson A D, Jenkins J P, Braswell B H, et al. Use of digital webcam images to track spring green-up in a deciduous broadleaf forest[J]. *Oecologia*,2007,152:323 ~ 334
- [14] Michael A C and Theresa M C. Monitoring Plant Phenology Using Digital Repeat Photography [J]. *Environmental Management*, 2008,41(6):949 ~ 958.
- [15] Sonnentag O, Hufkens K, Teshera-Sterne C, et al. Digital repeat photography for phenological research in forest ecosystems [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*,2012,152(1):159 ~ 177.
- [16] Caroline A. Polgar, Richard B. Primack. 温带森林展叶物候学. 生物多样性,2013,21(1):111 ~ 116.
- [17] Crimmins M. A. , Crimmins T. M. Monitoring plant phenology using digital repeat photography [J]. *Environmental Management*, 2008,41(6):949 ~ 958.
- [18] Reiko Ide, Hiroyuki Oguma. Use of digital cameras for phenological observations [J]. *Ecological Informatics*, 2010,5(5):339 ~ 347.
- [19] Junbin Z, Yiping Z, Zhenghong T, et al. Using digital cameras for comparative phenological monitoring in an evergreen broad-leaved forest and a seasonal rain forest [J]. *Ecological Informatics*,2012,10(7):15 ~ 23.
- [20] Cheng H D, Jiang X H, Sun Y, et al. Color image segmentation: advances and prospects. *Pattern Recognition*,2001,34(12):2259 ~ 2281.
- [21] Woebbecke D M, Meyer G E, Von Bargen K, et al. Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions. *Transactions of the ASAE*,1995,38(1):259 ~ 269.
- [22] Richardson A D, Braswell B H, Hollinger D Y, et al. Near-surface remote sensing of spatial and temporal variation in canopy phenology [J]. *Ecological Applications*,2009,19(6):1417 ~ 1428.
- [23] Ahrends H E, Brügger R, Stöckli R, et al. Quantitative phenological observations of a mixed beech forest in northern Switzerland with digital photography. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*,113,G04004:1 ~ 11.
- [24] Jönsson P, Eklundh L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*,2002,40(8):1824 ~ 1832.
- [25] Jönsson P, Eklundh L. TIMESAT-A program for analyzing time-series of satellite sensor data [J]. *Computers & Geosciences*, 2004,30(8):833 ~ 845.
- [26] 李明,吴正方,杜海波,等. 基于遥感方法的长白山地区植被物候期变化趋势研究 [J]. *地理科学*,2011,31(10):1242 ~ 1248.
- [27] Zhou Lei, He Honglin, Sun Xiaomin et al. Species- and Community-Scale Simulation of the Phenology of a Temperate Forest in Changbai Mountain Based on Digital Camera Images [J]. *Journal of Resources and Ecology*,2013,4(4):317 ~ 326.
- [28] 董奎,廖韵,付静静,等. 基于数码相机延时摄影与 MODIS 卫星遥感的美国马萨诸塞州温带落叶林物候监测. 刘兆军等主编:第 19 届中国遥感大会论文集(下册),第 1272 ~ 1283 页.
- [29] Fall Foliage. <https://weather.com/maps/fall-foliage>,2016/02/22.
- [30] Catching the Fall Color Wave: Autumn Leaf Color Changes in Three Primary Waves. <http://forestry.about.com/cs/fallcolor/a/fallwave.htm>,2016/02/22.
- [31] ENVIMON Research Project:Season monitoring application. <http://virtual.vtt.fi/virtual/proj2/envimon/season.htm>,2016/02/22.
- [32] Zhang X, Friedl M A, Schaaf C B, et al. Monitoring vegetation phenology using MODIS [J]. *Remote sensing of Environment*, 2003,84(3):471 ~ 475.
- [33] Zhang X. , Goldberg M. D. Monitoring fall foliage coloration dynamics using time-series satellite data [J]. *Remote Sensing of Environment*,2011,115(2):382 ~ 391.
- [34] Zhang X. , Goldberg M. D. , Yu Y. Prototype for monitoring and forecasting fall foliage coloration in real time from satellite data [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*,2012,158 ~ 159(6):21 ~ 29.