生物多样性　2017, **25** (4): 372–381
doi: 10.17520/biods.2016257
Biodiversity Science
http: //www.biodiversity-science.net

•研究报告•

中国森林破碎化多尺度评价

李　瑶[1]　肖向明[1,2*]　李香萍[1]　马　俊[1]　陈帮乾[1]
秦元伟[2]　董金玮[3]　赵　斌[1]

1 (生物多样性与生态工程教育部重点实验室，复旦大学生物多样性科学研究所，上海 200438，中国)
2 (Department of Microbiology and Plant Biology, Center for Spatial Analysis, University of Oklahoma, Norman, OK 73019, USA)
3 (中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室，中国科学院地理科学与资源研究所，北京 100101，中国)

摘要：基于2010年50 m空间分辨率森林分布图，我们利用森林破碎化模型制作了中国森林6个不同破碎化类型(内部森林、孔洞森林、边缘森林、斑块森林、过渡森林和未确定森林)的空间分布图。然后结合2010年中国行政区划图，对比分析了不同尺度行政区域的森林破碎化情况。结果表明：在国家尺度上，斑块森林的比例最大(49.05%)，内部森林的比例最小(3.40%)；在区域尺度上，东北地区森林破碎化程度最低，西南地区森林破碎化程度次之，华北平原、华中地区、山东半岛、黄淮海平原的森林破碎化程度最高；在省级尺度上，上海市森林破碎化程度最高，天津市次之，云南省及黑龙江省森林破碎化程度较低；在县级尺度上，陕西省所属的县森林破碎化程度最低。由此可知，总体上我国森林破碎化情况较为严重，但不同森林破碎化类型的空间分布存在较大差异。本研究可为各级林业部门管理森林资源以及优化林业生产和森林空间格局中提供数据支持，提高森林的生态系统服务功能和生物多样性保护功能。

关键词：中国；森林破碎化；破碎化模型；多尺度；比例分布

Multi-scale assessments of forest fragmentation in China

Yao Li[1], Xiangming Xiao[1,2*], Xiangping Li[1], Jun Ma[1], Bangqian Chen[1], Yuanwei Qin[2], Jinwei Dong[3], Bin Zhao[1]

1 *Ministry of Education Key Laboratory for Biodiversity Science and Ecological Engineering, Institute of Biodiversity Science, Fudan University, Shanghai 200438, China*
2 *Department of Microbiology and Plant Biology, Center for Spatial Analysis, University of Oklahoma, Norman, OK 73019, USA*
3 *Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Science and Natural Resource Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*

Abstract: We used the forest fragmentation model to assess forest fragmentation in China based on a 50-m forest cover map in 2010. Six different fragmentation types including interior forest, perforated forest, edge forest, patch forest, transitional forest and undetermined were obtained. We reported the forest fragmentation status in different administration scales (by country, province, and county) based on Chinese administration boundary map of 2010, At the national scale, the patch forest accounted for the largest proportion (49.05%), while the interior forest was the smallest (3.40%). At the regional scale, Northeast China had the lowest forest fragmentation, while Southwest China had moderate forest fragmentation. The highest forest fragmentation areas were mainly distributed in the North China Plain, Central China, Shandong Peninsula and the Huang-Huai-Hai Plain. At the provincial scale, the highest forest fragmentation was located in Shanghai and Tianjin, and the lowest forest fragmentation was located in Yunnan Province and Heilongjiang Province. At the county scale, the lowest forest fragmentation was located in counties in Shaanxi Province. Overall, our results have clearly shown that forest fragmentation occurs extensively and varies substantially over China in 2010. Our study will provide data support for the forestry administrative sector to conduct better forest management and to optimize forestry production and forest spatial patterns, which can improve forest ecosystem

收稿日期: 2016-09-12；接受日期: 2017-03-29
基金项目：国家自然科学基金(41571408)
* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: xiangming.xiao@ou.edu

services and biodiversity conservation.
Key words: China; forest fragmentation; fragmentation model; multi-scale; distribution ratio

据联合国粮食及农业组织(FAO)估计，世界森林面积约为4.0 × 10^7 km^2，占全球陆地总面积的31% (Qin et al, 2015)。森林提供了许多重要的生态服务功能，不仅产生了地球上一半的净初级生产量(Groombridge & Jenkins, 2002)，还在全球碳(Bonan, 2008; Pan et al, 2011; Fang et al, 2014)以及水、热循环(Pongratz et al, 2010)，生物多样性保护和水土保持(Achard & Hansen, 2012)等方面发挥着重要作用。然而，为应对日益增加的粮食需求，全球约40%的森林已转换为农田、牧场或其他人工建筑等土地覆盖类型(Achard & Hansen, 2012)。

森林面积减少和质量退化可能影响生态系统服务并可能导致一系列生态灾难。森林景观破碎化是集中连片的森林被分割为较小的独立斑块的过程，主要表现为斑块数量增加、面积减小、形状趋于不规则、彼此隔离继而形成孤立的森林岛屿，生境面积缩小和廊道被截断(杨国靖和肖笃宁, 2003)。

从生态功能角度看，森林破碎化将导致区域生物多样性降低、水土流失加剧、外来物种入侵风险加大和森林生态系统内部物质流和能量流减缓等多种负面效应(刘建锋等，2005；赵安玖等，2006)。Laurence等(2002)研究表明，在破碎化的亚马逊森林中物种丰富度与斑块大小呈正比，原始森林中的物种数量比破碎化森林更多，一些对生境面积敏感的物种在破碎化森林中消失。在60%的栖息地丧失后，剩余斑块可能因隔离程度太大而阻碍了物种间的交流(O’Neill et al, 1992)。当森林中的栖息地丧失在80%以上时，物种将会突然灭绝(Andrén，1994)。大西洋沿岸的森林破碎化导致10种食果鸟类消失(Ribon et al, 2003)。李义明和李典谟(1994)指出，自然栖息地面积减小和破碎化会导致动物濒危、分布范围缩小和数量下降。Baur和Erhardt (1995)发现景观破碎导致其中的种群分离成小的亚种群，进而使物种的丰富度降低。陈利顶等(1999)在卧龙自然保护区的研究表明，大熊猫的生境存在许多无法利用的孤立小斑块，这不利于各栖息地中大熊猫的迁移与交换而降低其遗传多样性。总的来说，森林破碎化会改变森林生态系统中动植物的可利用生境，从而减少其物种及种群数量，潜在物种丰富度与森林破碎化程度在空间上具有一致性(Dong et al, 2014)。

近年来，遥感驱动的森林分布图已成为森林破碎化评价的主要数据源。例如，孙飞等(2011)根据GlobCover数据(300 m空间分辨率)和中国大陆遥感影像地图(中国地图网制作)，分析了2006年中国大陆省级尺度森林破碎化情况；沈文娟等(2013)利用2005年和2009年的GlobCover数据(300 m空间分辨率)，分析了中国东北、西南和南方林区的森林破碎化、干扰模式，以及森林与其他土地利用类型在空间上交互变化的特征；孙力(2014)①利用与沈文娟等(2013)相同的数据源，对安徽省森林的景观格局与破碎化情况进行了分析。还有一些研究者通过景观指数分析方法，结合森林资源调查和遥感影像，评价了市县级尺度上的森林破碎化情况，如任引和王大睿(2012)对厦门市和史京京等(2015)对重庆市云阳县的森林破碎化研究。还有在小区域尺度上的一些研究，例如南京市紫金山风景区(李金臣等，2014)、湖南省林科院试验林场(方晰等，2008)、黄土高原子午岭(索安宁等，2007)、三峡库区(张煜星等, 2013)、秦岭菜子坪林区(王志彬等, 2011)和祁连山西水自然保护区(杨国靖和肖笃宁, 2003)。

上述大部分研究主要是基于低分辨率的森林数据集，对局部区域进行的森林破碎化分析。我们将在这些研究的基础上，采用更高空间分辨率的森林分布数据，重新对中国境内森林破碎化的整体情况进行分析，这一方面有助于我们更细致地理解森林破碎化的空间格局，另一方面大尺度分析可为保护生物多样性和栖息地规划，监测森林退化等林业管理实践提供更全面的决策支持。

1　材料与方法

1.1　数据来源

森林分布数据来源于美国俄克拉荷马大学和中国复旦大学共同制作的中国2010年高精度森林

① 孙力 (2014) 基于Globcover数据的安徽省森林景观格局及森林破碎化动态分析. 硕士学位论文, 南京林业大学, 南京.

空间分布图(50 m空间分辨率) (Qin et al, 2015; 秦元伟等, 2015)。该分布图基于JAXA (日本宇航研究开发机构)的ALOS PALSAR数据(50 m空间分辨率)和250 m MODIS NDVI数据，基于决策树分类方法制作而成。利用全球野外照片数据库和谷歌高清卫星影像对森林空间分布图进行随机验证，整体精度达96.2%。此外，该分布图与2010年3个基于遥感的森林数据集(JAXA F/NF、MCD12Q1和NLCD-China)和两个基于数据列表的森林数据集(FAO FRA和NFI- China)进行了面积和空间分布的比较，具有高度一致性(Qin et al, 2015; 秦元伟等, 2015)。本研究使用的中国行政边界图来源于国家测绘地理信息局(http://bzdt.nasg.gov.cn/)。

1.2 森林破碎化模型

利用土地覆盖图的森林像元及其邻近像元的边界，Riitters等(2002)定量研究了森林破碎化的空间分布模式，并依此构建了森林破碎化模型。他们将像元分为自然干扰因子和人为干扰因子，并采用移动窗口算法建立森林破碎化模型。该模型被有的研究(Dong et al, 2014)所借鉴，揭示了较大尺度下森林破碎化的空间分布及其驱动因子。

在我们的研究中，首先将森林/非森林地图进行二值化处理(森林 = 1，非森林 = 0)，然后计算森林破碎化。在森林破碎化模型中我们采用了两个指标，即一定“窗口”或“景观”下的森林密度(P_f)和森林连接度(P_{ff})。一般地，大窗口(如101 × 101像元)可减少不确定性，小窗口(如9 × 9像元)可增加结果的精度(Dong et al, 2014)。根据数据源的优势，我们选择精度更高的9 × 9像元窗口进行分析。P_f是指在一个特定森林像元(如9 × 9)的窗口中的森林像元(N_f)与像元总数(N_w)之比；P_{ff}是主方向包括至少一个森林像元的像元对数目(D_{ff})与两个相邻森林像元的像元对数目(D_f)的比值。这两个指标的计算公式如下:

$$P_f = \frac{N_f}{N_w} \tag{1}$$

$$P_{ff} = \frac{D_{ff}}{D_f} \tag{2}$$

渗透理论(Stauffer, 1985)定义了P_f的阈值。假设一个由像元组成的完整森林景观，当$P_f < 0.4$时，非森林像元会形成一个跨窗口的连续路径，但对非常小的森林来说森林的边缘和孔洞意义不大；当$P_f >$ 0.6时，森林像元形成一个相似的路径，森林边缘与孔洞可用于确定破碎化森林中的斑块森林和过渡森林的阈值；$P_f - P_{ff}$表征从边缘森林到孔洞森林的梯度(Riitters et al, 2000)。上述阈值均取自于前人的研究(Riitters et al, 2000)。

该模型将森林像元分为6种类型：斑块森林(patch forest)、过渡森林(transitional forest)、孔洞森林(perforated forest)、未确定森林(undetermined)、边缘森林(edge forest)和内部森林(interior forest)。不同破碎化类型的判定标准如表1。当$P_{ff} > P_f$时，该区域森林斑块分布紧凑，窗口中邻近土地覆盖像元识别为森林的可能性高于平均水平；当$P_{ff} < P_f$时，该区域森林斑块分布松散，表现为非森林斑块密集分布；当$P_{ff} = P_f$时，模型无法区分该窗口的破碎化类型，视为未确定类型；当$P_f = 1$时，表示该窗口全部为森林像元所覆盖，即内部森林，同时该窗口的P_{ff}也等于1。

1.3 森林破碎化多尺度分析(国家级、省级和县级)

我们采用上述模型对2010年中国森林空间分布图进行分析，得到了中国森林破碎化分布图，并将其与省级和县级矢量边界图空间叠加，分别计

表 1 各森林破碎化类型判定标准
Table 1 Criteria for forest fragmentation types

类型 Type	判定标准 Criterion	说明 Description
斑块森林 Patch forest	$P_f < 0.4$	森林密度小于 40% Forest density is less than 40%
过渡森林 Transitional forest	$0.4 < P_f < 0.6$	森林密度介于 40–60%之间 Forest density is between 40% and 60%
孔洞森林 Perforated forest	$P_f > 0.6, P_f - P_{ff} > 0$	森林密度大于 60%且森林密度大于森林连接度 Forest density is greater than 60%, and forest density is greater than forest connectivity
未确定 Undetermined	$P_f > 0.6, P_f = P_{ff}$	森林密度大于 60%且森林密度等于森林连接度 Forest density is greater than 60%, and forest density is equal to forest connectivity
边缘森林 Edge forest	$P_f > 0.6, P_f - P_{ff} < 0$	森林密度大于 60%且森林密度小于森林连接度 Forest density is greater than 60%, and forest density is less than forest connectivity
内部森林 Interior forest	$P_f = 1$	森林密度为 100%，亦可称作完整森林 Forest density is 100%, and also can be known as complete forest

算省级和县级尺度的不同破碎化类型的森林面积及其所占比例，同时计算不同破碎化类型的空间分布和频率分布，在此基础上分析各省市县森林破碎化情况。

2　结果

2.1　全国森林面积及破碎化情况分析

图1显示，我国东北地区(大兴安岭、小兴安岭、长白山等)斑块化的森林比例最小，破碎化程度最低；西南地区斑块化森林比例处于中等水平，边缘森林和过渡森林比例较高，森林破碎化程度中等；华北平原、华中地区、山东半岛、黄淮海平原的斑块化森林比例较高，森林破碎化程度高。

由图2可以看出，P_f指数介于[0, 1]之内，越接近0和1端值，频率越高，而越趋近于中间值0.5，则频率越小；P_{ff}除了个别峰值之外，其余区间趋近平缓，均值为0.4%。除去未确定类型，中国森林中斑块森林的比例最大，为49.05%；内部森林比例最小，为

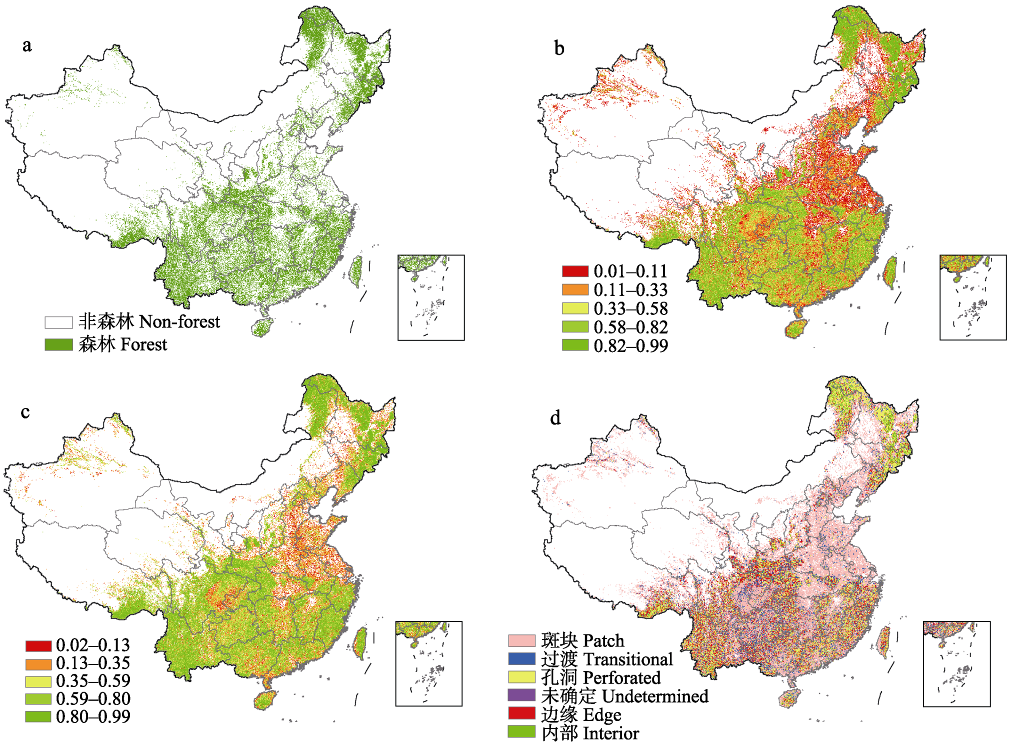

图1　中国森林破碎化分析流程。(a)森林空间分布图; (b)森林密度(P_f)图; (c)森林连接度(P_{ff})图; (d)森林破碎化分布图。
Fig. 1　The workflow for analyzing forest fragmentation of China. (a) Distribution of forest; (b) Forest density (P_f); (c) Forest connectivity (P_{ff}); (d) Distribution of forest fragmentation.

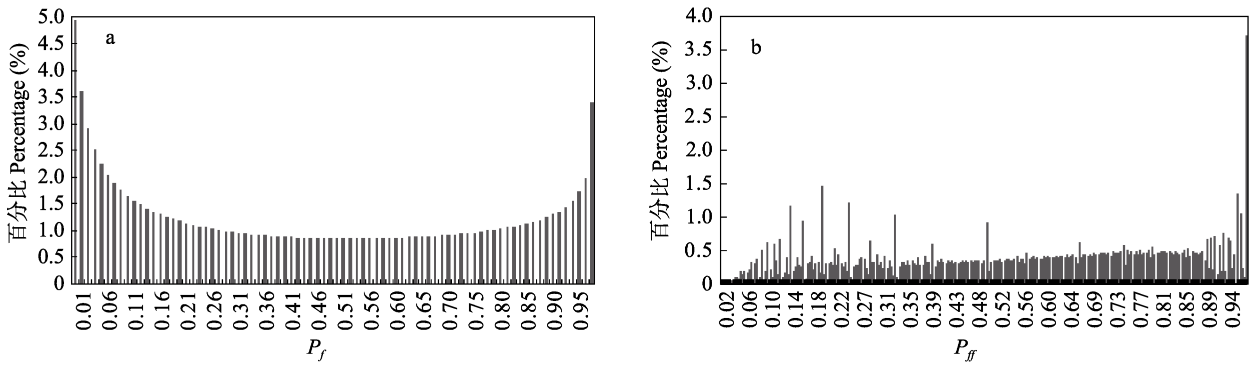

图2　森林破碎化模型参数森林密度(P_f)和森林连接度(P_{ff})频率分布
Fig. 2　Frequency of forest density (P_f) and forest connectivity (P_{ff}) in the forest fragmentation model

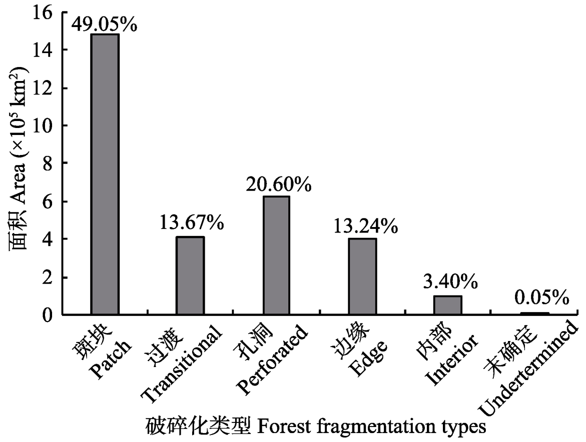

图3 中国森林各破碎化类型面积及其百分比
Fig. 3 The areas and percentages of various forest fragmentation types in China

3.40%; 内部森林面积为1.02×10^5 km^2, 斑块森林面积为1.48×10^6 km^2 (图3)。

2.2 省级森林面积及破碎化情况分析

我们按照中国的行政区划对33个省市自治区直辖市(以下简称为省/市; 不包括澳门特别行政区)的森林破碎化情况进行分析, 得出省级不同破碎化类型百分比及该省森林总面积(表2)。

表2显示, 上海市和天津市斑块森林比例高, 过渡森林、孔洞森林、边缘森林和内部森林的比例低, 森林破碎化程度大; 福建省、云南省、黑龙江的孔洞森林、边缘森林和内部森林比例高, 斑块森林比例较低, 森林破碎化程度较小。

图4显示了我国省级不同森林破碎化类型频率

表2 各省森林面积及各破碎化类型百分比
Table 2 Forest area and percentage of forest fragmentation types at provincial scale

省/区名 Province/region	森林面积 Forest area (km^2)	斑块 Patch (%)	过渡 Transitional (%)	孔洞 Perforated (%)	未确定 Undetermined (%)	边缘 Edge (%)	内部 Interior (%)
黑龙江 Heilongjiang	278,034.73	38.37	8.75	36.66	0.03	6.72	9.47
四川 Sichuan	248,583.13	44.11	17.64	16.43	0.05	19.31	2.45
云南 Yunnan	230,131.73	26.36	16.97	28.85	0.08	23.68	4.07
内蒙古 Inner Mongolia	203,160.96	40.83	8.23	29.78	0.03	9.31	11.82
广西 Guangxi	143,319.58	35.14	21.25	23.28	0.07	19.36	0.90
湖南 Hunan	129,880.06	45.96	18.98	18.73	0.06	15.47	0.80
西藏 Tibet	129,673.51	46.02	12.04	20.13	0.05	17.61	4.16
湖北 Hubei	112,266.81	48.38	14.23	19.61	0.06	16.29	1.43
吉林 Jilin	110,053.89	40.54	8.88	30.63	0.03	8.40	11.53
贵州 Guizhou	108,704.03	42.62	23.62	15.04	0.06	18.25	0.41
广东 Guangdong	104,709.11	42.96	17.26	23.52	0.05	14.57	1.64
河北 Hebei	100,720.87	80.48	10.36	4.26	0.01	4.79	0.09
江西 Jiangxi	99,898.31	41.00	16.86	26.79	0.06	14.06	1.22
河南 Henan	94,811.72	78.71	9.11	6.68	0.02	5.20	0.28
陕西 Shaanxi	94,132.33	37.28	15.27	23.91	0.08	21.16	2.30
新疆 Xinjiang	92,699.24	82.77	9.09	3.21	0.01	4.69	0.23
辽宁 Liaoning	92,018.43	63.95	12.83	13.19	0.03	8.41	1.59
山东 Shandong	87,139.80	86.88	8.34	2.66	0.01	1.97	0.14
安徽 Anhui	82,906.74	64.96	11.50	15.03	0.03	7.91	0.56
福建 Fujian	75,164.76	23.26	17.66	34.36	0.10	22.32	2.30
甘肃 Gansu	65,808.05	64.72	11.12	10.43	0.04	12.62	1.07
浙江 Zhejiang	63,367.31	33.64	16.58	28.96	0.09	19.58	1.15
山西 Shanxi	60,692.29	69.90	10.23	9.75	0.03	9.05	1.04
江苏 Jiangsu	54,259.88	91.24	5.78	2.08	0.00	0.80	0.09
重庆 Chongqing	52,634.41	48.84	18.81	14.60	0.06	16.83	0.86
青海 Qinghai	31,309.74	88.00	5.87	1.92	0.01	4.07	0.14
台湾 Taiwan	21,229.70	29.32	12.55	32.94	0.07	19.56	5.55
海南 Hainan	19,339.76	39.06	16.26	30.83	0.05	9.98	3.81
北京 Beijing	11,312.26	58.65	15.41	11.62	0.04	13.48	0.80
宁夏 Ningxia	5,206.68	89.40	4.68	2.74	0.00	2.98	0.19
天津 Tianjin	4,805.12	92.54	4.41	1.59	0.00	1.39	0.08
上海 Shanghai	3,421.85	93.68	5.66	0.63	0.00	0.03	0.00
香港 Hong Kong	627.35	38.25	16.37	18.79	0.00	20.27	6.33

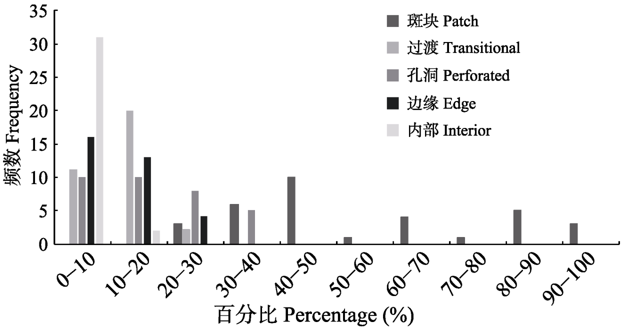

图4　省级各森林破碎化类型频率分布
Fig. 4　Frequency of various forest fragmentation types at provincial scale

分布。各省市的斑块森林百分比均大于20%, 过渡森林和边缘森林集中在30%以内, 孔洞森林集中在40%以内, 内部森林仅在12%以内。总的来说, 斑块森林是我国森林中最主要的破碎化类型, 斑块森林比例大于50%的省市有14个, 接近1/2, 而大部分省市内部森林比例都在10%以内。

分析我国省级斑块森林、过渡森林、孔洞森林、边缘森林以及内部森林百分比的空间分布(图5a–e)发现: 新疆、青海、宁夏和华北部分地区斑块森林比例非常高, 而云南、福建及台湾斑块森林比例较低(图5a); 大部分省市过渡森林比例较高, 而西北地区、华北地区和东北地区过渡森林比例处于较低水平(图5b); 黑龙江、吉林、内蒙古、云南、浙江、福建、海南和台湾的孔洞森林处于26.8–36.7%之间, 属于较高的分布水平(图5c); 西南地区、华中地区、华南地区、华东部分地区、甘肃和陕西边缘森林比例较高(图5d); 内部森林比例较大的3个省份为黑龙江、吉林和内蒙古, 说明这3个省份的森林较为完整(图5e)。

2.3　县级森林面积及破碎化情况分析

在对全国2,365个县进行分析时, 发现有45个县全部被斑块森林所覆盖(比例高达100%), 另外还有许多县缺失过渡、孔洞、边缘和内部森林(比例为0), 这样的数据不便于进行深入分析。因此, 下面的分析中仅考虑斑块森林比例最低的10个县以及过渡、孔洞、边缘和内部森林比例最高的10个县(表3)。可惜, 由于数值比较分散, 无法确定破碎化程度最低的县, 但可以看出中国各县森林破碎化程度有较大差异。各破碎化类型位列前3位的县中, 有4个属于陕西省; 黑龙江、安徽和四川省各有2个县位列前10名。从县级尺度来看, 陕西省相较来说破碎化程度最低。

从县级不同森林破碎化类型频率分布(图6)来看, 大部分县的内部森林比例集中于20%内, 过渡森林和边缘森林集中于30%以内, 孔洞森林集中在50%以内。除斑块森林和未确定森林外的其他4个破碎化类型集中在10%内的频数最高, 而斑块森林在90–100%频数最高。

从县级斑块、过渡、孔洞、边缘和内部森林空间分布(图5f–j)来看, 新疆、西藏、内蒙古、华北平原及山东半岛地区部分县市斑块森林比例较高, 而大兴安岭地区、长白山脉、西双版纳及福建省部分县市斑块森林比例较低(图5f); 四川和贵州等省的部分县市过渡森林分布较多, 西部地区过渡森林比例较低(图5g); 除大兴安岭地区、长白山脉和南部地区之外, 大部分地区的孔洞森林比例较低(图5h); 西部地区边缘森林比例较低, 东部地区比例较高(图5i); 内部森林的比例普遍较低, 大兴安岭、小兴安岭地区、长白山脉及西双版纳地区比例相对较高(图5j)。

3　讨论

3.1　森林破碎化模型的优点及不确定性分析

传统基于景观指数的景观破碎化分析所得出的结果一般为抽象的数值, 例如斑块密度、斑块面积、斑块比例、景观形状指数和面积变异指数等, 缺乏明确的空间特征, 难以直接指导规划。另外, 景观指数极其繁杂, 适用范围多变, 不同研究者根据不同景观指数所获得的结果可比性不强。我们所采用的森林破碎化模型, 可生成具象的地图, 与传统破碎化分析方法相比更直观, 还可进行跨尺度的分析。

本研究采用的空间分辨率为50 m, 模型采用了9 × 9像元(450 m × 450 m)的计算窗口, 得出各省市的内部森林占全国总森林面积的比例全都小于12%, 斑块森林比例在20–94%之间, 森林破碎化程度严重。而孙飞等(2011)基于300 m空间分辨率的数据采用3 × 3像元(900 m × 900 m)的窗口所进行的类似分析, 得出内部森林的比例处于10–70%之间, 斑块森林比例均小于30%, 森林破碎化程度较低。出现这个差异的首要原因是底图的空间分辨率, 相比之下我们所采用的数据空间分辨率更高, 而且高精度的森林空间分布图在评估森林破碎化时可以提供更有效

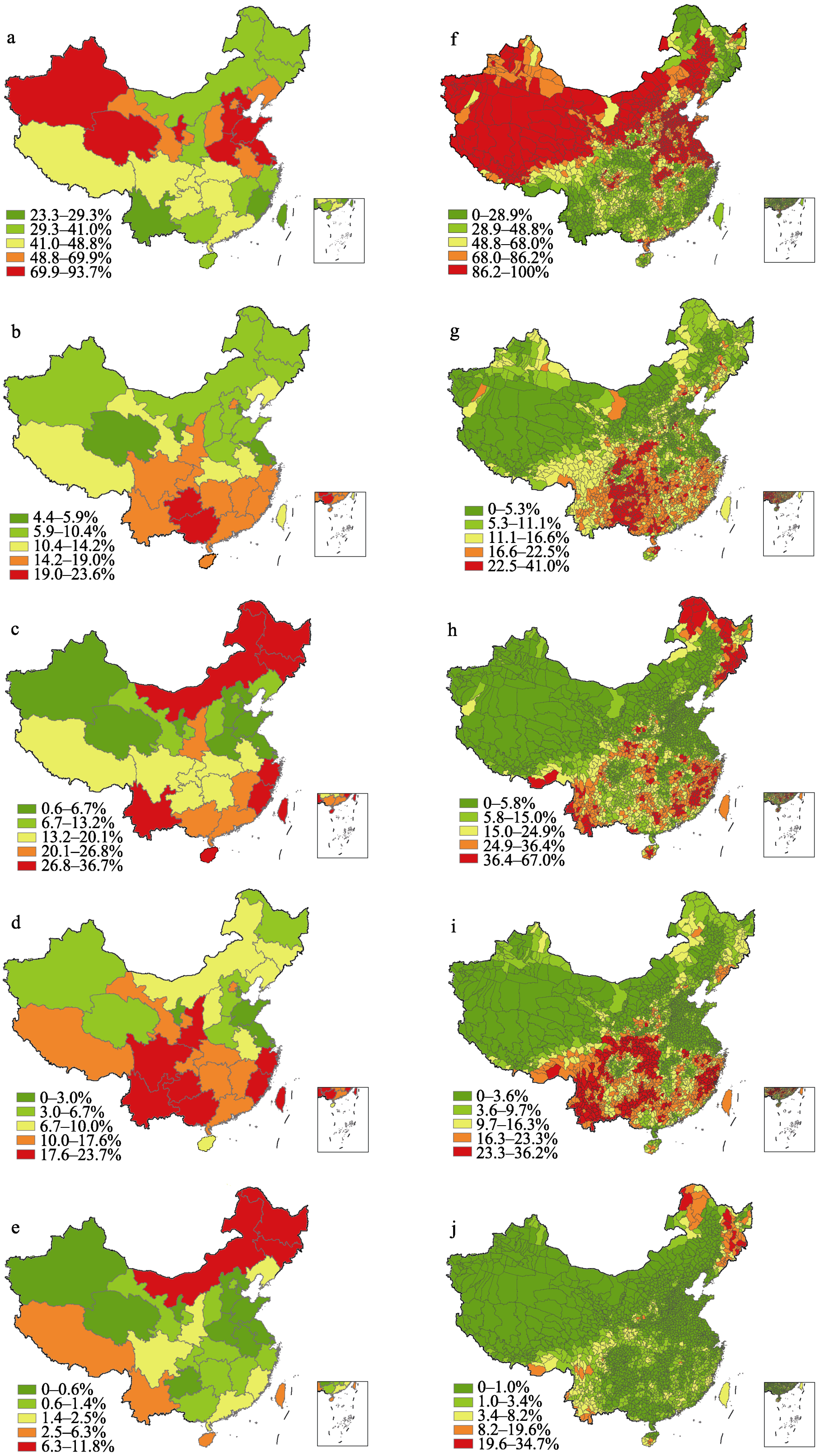

图5 省级县级各破碎化类型百分比空间分布。省级: **(a)**斑块; **(b)**过渡; **(c)**孔洞; **(d)**边缘; **(e)**内部。县级: **(f)**斑块; **(g)**过渡; **(h)**孔洞; **(i)**边缘; **(j)**内部。

Fig. 5 Percentage distribution of forest fragmentation types at provincial and county scale. Province: (a) Patch; (b) Transitional; (c) Perforated; (d) Edge; (e) Interior. County: (f) Patch; (g) Transitional; (h) Perforated; (i) Edge; (j) Interior.

表3 县级各森林破碎化类型百分比(排序依据: 斑块森林比例最小的10个县, 其他森林类型比例最大的10个县)

Table 3 Percentage of forest fragmentation types at county scale. The 10 counties with patch forests are ranked by the lowest percentage, while the other 40 counties are ranked by the highest percentage.

县/市名 County/city	百分比 %
斑块森林 Patch forest	
陕西省留坝县 Liuba, Shaanxi	3.80
陕西省佛坪县 Foping, Shaanxi	3.93
海南省琼中黎族苗族自治县 Qiongzhong, Hainan	4.41
云南省勐腊县 Mengla, Yunnan	5.52
黑龙江省伊春市市辖区 Yichun, Heilongjiang	5.62
陕西省宁陕县 Ningshan, Shaanxi	6.43
云南省江城哈尼族彝族自治县 Jiangcheng, Yunnan	6.45
海南省五指山市 Wuzhishan, Hainan	6.73
陕西省镇坪县 Zhenping, Shaanxi	6.85
云南省普洱哈尼族彝族自治县 Puer, Yunnan	7.27
过渡森林 Transitional forest	
四川省简阳市 Jianyang, Sichuan	41.01
四川省乐至县 Lezhi, Sichuan	40.89
安徽省砀山县 Dangshan, Anhui	37.69
四川省安岳县 Anyue, Sichuan	37.68
四川省射洪县 Shehong, Sichuan	35.99
四川省盐亭县 Yanting, Sichuan	35.53
四川省三台县 Santai, Sichuan	34.71
四川省西充县 Xichong, Sichuan	33.81
四川省名山县 Mingshan, Sichuan	32.87
四川省攀枝花市 Panzhihua, Sichuan	32.65
孔洞森林 Perforated forest	
黑龙江省塔河县 Tahe, Heilongjiang	66.96
海南省琼中黎族苗族自治县 Qiongzhong, Hainan	59.68
黑龙江省伊春市市辖区 Yichun, Heilongjiang	59.28
吉林省安图县 Antu, Jilin	58.32
黑龙江省逊克县 Xunke, Heilongjiang	57.18
黑龙江省呼玛县 Huma, Heilongjiang	57.04
黑龙江省漠河县 Mohe, Heilongjiang	56.98
吉林省抚松县 Fusong, Jilin	56.84
云南省梁河县 Lianghe, Yunnan	55.34
广西省昭平县 Zhaoping, Guangxi	54.01
边缘森林 Edge forest	
陕西省石泉县 Shiquan, Shaanxi	36.17
广西省天峨县 Tiane, Guangxi	35.51
陕西省略阳县 Lueyang, Shaanxi	34.46
四川省青川县 Qingchuan, Sichuan	34.45
陕西省镇安县 zhen’an, Shaanxi	33.14
陕西省平利县 Pingli, Shaanxi	33.06
湖北省保康县 Baokang, Hubei	32.86
云南省绿春县 Lvchun, Yunnan	32.63
陕西省留坝县 Liuba, Shaanxi	32.61
陕西省镇坪县 Zhenping, Shaanxi	32.59
内部森林 Interior forest	
吉林省和龙市 Helong, Jilin	34.66
黑龙江省海林市 Hailin, Heilongjiang	33.62
黑龙江省铁力市 Tieli, Heilongjiang	32.27
吉林省珲春市 Hunchun, Jilin	30.91
吉林省敦化市 Dunhua, Jilin	28.41
吉林省汪清县 Wangqing, Jilin	27.92
黑龙江省伊春市市辖区 Yichun, Heilongjiang	26.42
黑龙江省通河县 Tonghe, Heilongjiang	25.10
内蒙古额尔古纳市 Argun, Inner Mongolia	23.09
吉林省安图县 Antu, Jilin	19.65

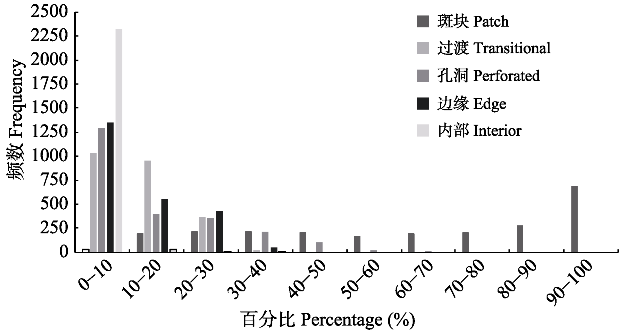

图6 县级各森林破碎化类型频率分布

Fig. 6 Frequency of forest fragmentation types at county scale

的数据支持(Qin et al, 2015)。其次, 森林破碎化模型的计算窗口也有较大影响, 有研究表明小窗口可以增加结果的精度(Dong et al, 2014)。可见, 我们的结果准确度更高, 可以更好地表征我国森林破碎化的实际情况。本研究也是首个采用高分辨率森林数据对全国尺度森林破碎化程度进行评价的尝试。

许多研究者利用破碎化模型研究森林破碎化时, 采用人为干扰破碎化指数(P_{fa})和自然干扰破碎化指数(P_{fn})来区分人为干扰像元及自然干扰像元(孙飞等, 2011; 李明诗等, 2012)。不过, 我们的研究中所采用的50 m空间分辨率森林数据只含森林与非森林两个土地覆盖类型, 目前无法区分出是人为干扰还是自然干扰。因此, 我们下一步的工作将试图结合其他土地利用类型来探讨这种区分的可行性。

3.2 我国森林破碎化情况及破碎化研究的现实意义

从我们的分析来看, 森林生态系统中斑块森林占森林总面积的比例接近50%, 而内部森林比例仅为3.4%, 表明我国的森林破碎化非常严重。通过分析省级及县级的森林破碎化情况可知, 森林破碎化是普遍存在的。究其原因, 华北华东地区地势平坦, 更容易遭受人为活动的影响, 华北、华东地区的孔洞森林比例很高, 主要是因为森林砍伐、森林火灾及开垦拓荒等活动所造成的(孙飞等, 2011)。

森林破碎化图中不同森林破碎化类型的空间分布, 尤其是内部森林, 对保护生物多样性、规划自然保护区和确定有特定喜好栖息地的物种的最小核心区面积有重要意义(Robbins et al, 1989)。本研究借助于高空间分辨率的中国森林破碎化空间分布图, 更细致地识别了森林破碎化的类型、面积和空间分布特征, 这有助于各级林业部门对林业资

源进行更细致的管理，在林业生产和森林空间配置中寻找更有针对性的策略，使森林生态系统产生最适宜的环境效能。

4 结论

本研究基于2010年50 m分辨率中国森林空间分布图，采用森林破碎化模型分析了我国省级、县级森林破碎化空间情况。结果表明，我国森林破碎化情况较为普遍，部分地区森林破碎化严重。相对于传统的景观指数分析方法，由森林破碎化模型基于高分辨率的森林空间分布图所得到的结果具有更为明确的空间意义。本研究结果对土地利用规划、生物多样性保护及森林可持续发展等方面具有较强的应用价值。

参考文献

Achard F, Hansen MC (2012) Global Forest Monitoring from Earth Observation. CRC Press, Boca Raton.

Andrén H (1994) Effects of habitat fragmentation on birds and mammals in landscapes with different proportions of suitable habitat: a review. Oikos, 71, 355–366.

Baur B, Erhardt A (1995) Habitat fragmentation and habitat alterations: principal threats to most animal and plant species. GAIA—Ecological Perspectives for Science and Society, 4, 221–226.

Bonan GB (2008) Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. Science, 320, 1444–1449.

Chen LD, Liu XH, Fu BJ (1999) Evaluation on giant panda habitat fragmentation in Wolong Nature Reserve. Acta Ecologica Sinica, 19, 291–297. (in Chinese with English abstract) [陈利顶, 刘雪华, 傅伯杰 (1999) 卧龙自然保护区大熊猫生境破碎化研究. 生态学报, 19, 291–297.]

Dong JW, Xiao XM, Sheldon S, Biradar C, Zhang GL, Duong ND, Hazarika M, Wikantika K, Takeuhci W, Moore III B (2014) A 50-m forest cover map in Southeast Asia from ALOS/PALSAR and its application on forest fragmentation assessment. PLoS ONE, 9, e85801.

Fang JY, Guo ZD, Hu HF, Kato T, Muraoka H, Son Y (2014) Forest biomass carbon sinks in East Asia, with special reference to the relative contributions of forest expansion and forest growth. Global Change Biology, 20, 2019–2030.

Fang X, Tang DS, Yang L, Jin WF (2008) Landscape pattern of the experimental forest farm run by Hunan Forestry Academy and its fragmentation analysis. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 28(4), 107–112. (in Chinese with English abstract) [方晰, 唐代生, 杨乐, 金文芬 (2008) 湖南省林科院试验林场森林植被景观格局及破碎化分析. 中南林业科技大学学报, 28(4), 107–112.]

Groombridge B, Jenkins MD (2002) World Atlas of Biodiversity. University of California Press, Oakland.

Laurance WF, Lovejoy TE, Vasconcelos HL, Bruna EM, Didham RK, Stouffer PC, Gascon C, Bierregaard RO, Laurance SG, Sampaio E (2002) Ecosystem decay of Amazonian forest fragments: a 22-year investigation. Conservation Biology, 16, 605–618.

Li JC, Liu YF, Li MS (2014) Assessing changes in landscape pattern and forest fragmentation based on landscape mosaic model—a case study from the Purple Mountains of Nanjing. Journal of Northwest Forestry University, 29, 226–231. (in Chinese with English abstract) [李金臣, 刘云峰, 李明诗 (2014) 基于景观镶嵌模型的景观格局变化及森林破碎化分析——以南京市紫金山风景区为例. 西北林学院学报, 29, 226–231.]

Li MS, Ming L, Fan MM, Shen WJ, Sun L (2012) Spatio-temporal patterns and managerial implications of forest fragmentation derived from three national parks in the western United States. Journal of Northeast Forestry University, 40(3), 103–107. (in Chinese with English abstract) [李明诗, 明莉, 樊鸣鸣, 沈文娟, 孙力 (2012) 美国西部国有森林破碎化模式及其管理含义. 东北林业大学学报, 40(3), 103–107.]

Li YM, Li DM (1994) The effect of human activities on large and middle mammals on the Zhoushan Island—analysis on the cause of their endangerment. Chinese Biodiversity, 2, 187–192. (in Chinese with English abstract) [李义明, 李典谟 (1994) 人为活动对舟山群岛大中型兽的影响——大中型兽受威胁原因分析. 生物多样性, 2, 187–192.]

Liu JF, Xiao WF, Jiang ZP, Feng X, Li XY (2005) A study on the influence of landscape fragmentation on biodiversity. Forest Research, 18, 222–226. (in Chinese with English abstract) [刘建锋, 肖文发, 江泽平, 冯霞, 李秀英 (2005) 景观破碎化对生物多样性的影响. 林业科学研究, 18, 222–226.]

O’Neill RV, Gardner RH, Turner MG (1992) A hierarchical neutral model for landscape analysis. Landscape Ecology, 7, 55–61.

Pan YD, Birdsey RA, Fang JY, Houghton R, Kauppi PE, Kurz WA, Phillips OL, Shvidenko A, Lewis SL, Canadell JG, Ciais P, Jackson RB, Pacala SW, McGuire AD, Piao SL, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D (2011) A large and persistent carbon sink in the world’s forests. Science, 333, 988–993.

Pongratz J, Reick CH, Raddatz T, Claussen M (2010) Biogeophysical versus biogeochemical climate response to historical anthropogenic land cover change. Geophysical Research Letters, 37, L08702.

Qin YW, Xiao XM, Dong JW, Zhang GL, Shimada M, Liu JY, Li CG, Kou WL, Moore B (2015) Forest cover maps of China in 2010 from multiple approaches and data sources: PALSAR, Landsat, MODIS, FRA, and NFI. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 109, 1–16.

Qin YW, Dong JW, Xiao XM (2015) Difference and uncertainty of forest coverage estimation in China. Biodiversity Science, 23, 830–834. (in Chinese) [秦元伟, 董金玮, 肖向明 (2015) 中国森林覆盖度产品的差异性及不确定性分析. 生物多样性, 23, 830–834.]

Ren Y, Wang DR (2012) Temporal and spatial variations of urban forest fragmentation in Xiamen. Journal of Fujian College of Forestry, 32, 213–219. (in Chinese with English abstract) [任引, 王大睿 (2012) 厦门城市森林景观破碎化时空演变特征分析. 福建林学院学报, 32, 213–219.]

Ribon R, Simon JE, Mattos GT (2003) Bird extinctions in Atlantic forest fragments of the Vicosa region, southeastern Brazil. Conservation Biology, 17, 1827–1839.

Riitters KH, Wickham JD, O'Neill RV, Jones KB, Smith ER (2000) Global-scale patterns of forest fragmentation. Conservation Ecology, 4, 1924–1925.

Riitters KH, Wickham JD, O'Neill RV, Jones KB, Smith ER, Coulston JW, Wade TG, Smith JH (2002) Fragmentation of Continental United States Forests. Ecosystems, 5, 815–822.

Robbins C, Dawson D, Dowell B (1989) Habitat area requirements of breeding forest birds of the middle Atlantic States. Wildlife Monographs, 103, 1–34.

Shen WJ, Xu T, Li MS (2013) Spatio-temporal changes in forest fragmentation, disturbance patterns over the three giant forested regions of China. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 37(4), 75–79. (in Chinese with English abstract) [沈文娟, 徐婷, 李明诗 (2013) 中国三大林区森林破碎化及干扰模式变动分析. 南京林业大学学报(自然科学版), 37(4), 75–79.]

Shi JJ, Xia CZ, Yan EP, Dang YF (2015) Study on the evolution of forest fragmentation and driving forces in Yunyang County based on MultiMate remote sensing. Forest Resources Management, (4), 59–68. (in Chinese with English abstract) [史京京, 夏朝宗, 严恩萍, 党永峰 (2015) 基于多期遥感的云阳县域森林景观破碎化演变与驱动力研究. 林业资源管理, (4), 59–68.]

Stauffer D (1985) Introduction to Percolation Theory. Taylor and Francis, Philadelphia, Pennsylvania.

Sun F, Chen MX, Mao LJ, Li MS (2011) Assessment of provincial-scale forest fragmentation in Chinese mainland. Journal of Northwest Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 39(1), 43–51. (in Chinese with English abstract) [孙飞, 陈敏学, 毛丽君, 李明诗 (2011) 中国大陆省级尺度森林破碎化特征评价. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 39(1), 43–51.]

Suo AN, Xiong YC, Wang TM, Kou XJ, Ge JP (2007) Effect of deforestation on watershed hydrological process in Ziwuling on the Loess Plateau. Scientia Silvae Sinicae, 43(6), 13–19. (in Chinese with English abstract) [索安宁, 熊友才, 王天明, 寇晓军, 葛剑平 (2007) 黄土高原子午岭森林破碎化对流域水文过程的影响. 林业科学, 43(6), 13–19.]

Wang ZB, Wang DX, Ren GX (2011) Analysis of forest landscape pattern and fragmentation of Qinling Caiziping forest region. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 39(12), 95–100. (in Chinese with English abstract) [王志彬, 王得祥, 任广鑫 (2011) 秦岭菜子坪林区森林景观格局及破碎化分析. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 39(12), 95–100.]

Yang GJ, Xiao DN (2003) Forest landscape pattern and fragmentation: a case study on Xishui Natural Reserve in Qilian Mountain. Chinese Journal of Ecology, 22(5), 56–61. (in Chinese with English abstract) [杨国靖, 肖笃宁 (2003) 森林景观格局分析及破碎化评价——以祁连山西水自然保护区为例. 生态学杂志, 22(5), 56–61.]

Zhang YX, Yan EP, Xia CZ, Dang YF (2013) Study on evolution of forest landscape fragmentation of Three Gorges Reservoir Area based on multi-remote sensing images. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 33(7), 1–7. (in Chinese with English abstract) [张煜星, 严恩萍, 夏朝宗, 党永峰 (2013) 基于多期遥感的三峡库区森林景观破碎化演变研究. 中南林业科技大学学报, 33(7), 1–7.]

Zhao AJ, Hu TX, Lai CH, Song XB (2006) Comparative study on fragmentation of forest landscapes in different regions. Journal of Sichuan Agricultural University, 24(2), 187–193. (in Chinese with English abstract) [赵安玖, 胡庭兴, 赖长鸿, 宋小波 (2006) 区域森林景观破碎化对比分析. 四川农业大学学报, 24(2), 187–193.]

(责任编委: 唐志尧 责任编辑: 时意专)