

中国森林凋落量时空分布特征

申广荣^{1,2,3} 项巧巧¹ 陈冬梅¹ 吴裕¹ 刘春江^{1,2,3*}

(¹上海交通大学农业与生物学院/低碳农业研究中心, 上海 200240; ²农业部都市农业(南方)重点实验室, 上海 200240;

³国家林业局上海城市森林生态系统国家定位观测研究站, 上海 200240)

摘要 通过构建全国尺度上森林叶凋落量和总凋落量与年平均温度、年平均降雨量和实际蒸散量的关系模型,应用地统计学分析方法,并结合遥感解译的森林覆盖信息,分析2001、2006和2012年中国森林叶凋落量和总凋落量的空间分布及其变异格局。结果表明:与年平均温度和降雨量相比,区域尺度上实际蒸散量对森林叶凋落量和总凋落量有更好的解释预测关系;分布于中南地区的常绿阔叶林的年凋落量最高,为 $636.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,分布于东北地区的温带落叶阔叶林的年凋落量范围为 $339 \sim 385 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,其中,森林叶凋落量约占总凋落量的70%。2001、2006和2012年,全国森林凋落总量分别为801、865和1032 Tg,呈明显增长趋势,而基于遥感图像解译的森林年覆盖率分别为18%、20%和24%,呈增长趋势。我国人工林面积的迅速增加和林分生长,极大影响了森林凋落物量及其动态变化,进而对森林生态系统物质循环产生重要影响。

关键词 森林凋落量; 地统计; 气候因子; 空间格局; 遥感

Spatio-temporal distribution characteristics of forest litterfall in China. SHEN Guang-rong^{1,2,3}, XIANG Qiao-qiao¹, CHEN Dong-mei¹, WU Yu¹, LIU Chun-jiang^{1,2,3*} (¹School of Agriculture and Biology/Research Centre for Low-Carbon Agriculture, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; ²Ministry of Agriculture Key Laboratory of Urban Agriculture (South), Shanghai 200240, China; ³Shanghai Urban Forest Research Station, State Forestry Administration, Shanghai 200240, China).

Abstract: In this study, the relationship models at national scale between forest litterfall (and leaf litterfall) and climatic factors (mean annual mean temperature, MAT; mean annual precipitation, MAP; and actual evapotranspiration, AET) were constructed. The spatial and temporal distribution patterns of forest litterfall and leaf litterfall in 2001, 2006 and 2012 were investigated by using geostatistical analysis combining with forest cover information based on remote sensing interpretation. Results indicated that the variation in litterfall and leaf litterfall were well explained at regional scales by AET than MAT and MAP. Evergreen broadleaf forest distributing mostly in South Central China possessed the highest mean yearly litterfall ($636.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$), and that of deciduous broadleaf forest in the Northeast of China was between $339 \sim 385 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$. The forest leaf litterfall accounted for about 70% of total forest litterfall. The total forest litterfall in China increased from 801 Tg in 2001, and 865 Tg in 2006 to 1032 Tg in 2012, meanwhile, the forest coverage in China also presented an increasing trend, 18% in 2001, 20% in 2006, and 24% in 2012. The rapid increase of plantation area and stand growth in China had a great effect on the forest litterfall and its dynamic change, and the material cycle of forest ecosystem.

Key words: forest litterfall; geostatistics; model; climatic factor; spatial pattern; remote sensing.

本文由中国科学院战略性先导科技专项(XDA0505020)、国家自然科学基金项目(71333010)和上海交通大学农工交叉项目(Agri-X2015004)资助。This work was supported by the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA0505020), the National Natural Science Foundation of China (71333010) and the Interdiscipline Program of Agriculture and Engineering of Shanghai Jiaotong University (Agri-X2015004). 2017-01-24 Received, 2017-04-27 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 1805442160@qq.com; chujliu@sjtu.edu.cn

森林凋落物是森林植物生长发育过程中新陈代谢的产物,在维持土壤肥力、促进森林生态系统正常物质循环和养分平衡方面起着重要作用,会影响森林的生物量和生产力以及森林水文功能发挥^[1-3]。森林凋落物也是燃料、肥料、温室大棚培养基质的重要来源,具有重要经济意义。因此,森林凋落物是森林生态学、森林土壤学、森林水文学、生物地球化学及环境化学等学科的重要研究内容之一。

自 20 世纪 60 年代,国外学者就开始了区域或全球森林凋落量及动态的研究。根据当时收集的文献资料,Bray 等^[4]首次对世界范围内森林凋落量进行系统研究。其后,随着资料的增多和方法的改进,又有学者对不同气候区的森林和世界范围内的森林凋落物进行估测和格局分析^[5-7]。在林分和全国尺度上,我国森林凋落量的研究开始于 20 世纪 80 年代。研究表明,我国主要生态系统森林凋落量在 $1.67 \sim 12.55 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,最大森林群落为河港海莲红树林,最小森林群落为长白山岳桦(*Betula ermanii*)-云冷杉(*Abies fabri*)群落($1.67 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)^[8]。

在林分尺度上,一般用凋落物收集器测定森林凋落量,分析季节或年间变化或林分空间分布特点^[4,9]。在区域尺度或全球尺度上,主要通过构建森林凋落量和气候环境因子的回归模型或插值外推法,估测不同气候条件下林分的森林凋落量,并根据森林面积计算森林凋落物总量^[4-7,10]。针对不同凋落物组分受气候、森林类型、群落结构等因素的影响,Liu 等^[10]在详细分析气候因子对欧洲针叶林和阔叶林凋落量影响的基础上,认为相比年降雨量,年均温对森林凋落量具有更大的影响。张新平等^[11]基于我国东北林区的分析认为,影响不同组分的气候因素存在明显差异:树叶凋落量主要受温度限制,而枝条凋落量主要受水分影响。全球尺度上的回归分析表明,相比年均温和降雨量以及地理因子等,实际蒸散量对森林凋落量具有更好的解释预测能力^[5,7]。

近 20 多年来,随着退耕还林、天然林保护工程、防护林工程的实施,我国森林面积从第六次全国森林资源调查(1999—2003 年)的 $17490.92 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 、第七次(2004—2008 年)的 $19545.22 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 增加到第八次(2009—2013 年)的 $20768.73 \times 10^4 \text{ hm}^2$,森林覆盖率从 18.2%(1999—2003 年)增加到了 21.6%(2009—2013 年)(国家林业局 <http://www.forestry.gov.cn/>)。人工林面积的如此快速增加,在世界各国均非常少见^[12-13]。通过人工造林新增的人工幼林生

长快、生产力高,也必然影响到一系列的森林生态系统过程(干物质积累、森林凋落量等)。然而,我国森林面积快速增加和生长会如何影响全国或区域尺度上森林生态系统过程,还缺乏系统研究,这也影响了对我国森林生态系统服务功能的评估。

为此,本研究基于多年采集、收集整理的我国及周边森林凋落量数据,在构建森林总凋落量、叶凋落量、气候因子数据库的基础上,分析建立了全国尺度上森林总凋落量、叶凋落量与环境气候因子回归模型,并结合 2000、2006 和 2012 年遥感图像解译获得的全国森林面积分布,借助地统计分析方法,分析全国尺度上森林总凋落量、叶凋落量的空间分布特征,分别估测 2001、2006 和 2012 年森林总凋落量、叶凋落量,以期为进一步研究我国人工造林对生态系统过程的影响、对评估森林生态系统服务功能提供重要的科学参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地区概况

中国($3^{\circ}31' \sim 53^{\circ}33' \text{ N}$, $73^{\circ}29' \sim 135^{\circ}2' \text{ E}$)位于亚洲东部,总面积约 $960 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。随着热量条件的变化,我国由南向北的森林植物群落依次为热带雨林、热带季雨林、亚热带常绿阔叶林、亚热带常绿与阔叶混交林、暖温带落叶阔叶林、暖温带针叶与落叶阔叶混交林、寒温带针叶林。我国植物种类繁多,各地区的森林类型和植被具有多样性的特点,如东北地区的针叶林和针阔混交林、西南亚高山的针叶林和针阔混交林、南方松杉林和常绿阔叶林及油茶(*Camellia oleifera*)、油桐(*Vernicia fordii*)等经济林以及华北落叶阔叶林及油松(*Pinus tabulaeformis*)等^[13]。

据第八次全国森林资源清查结果,全国森林面积为 $2.08 \times 10^8 \text{ hm}^2$,森林覆盖率为 21.6%,天然林面积为 $1.22 \times 10^8 \text{ hm}^2$,人工林面积也达到了 $0.69 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 。从地域分布来看,森林资源分布的总趋势是东南部多、西北部少;在东北、西南边远省(区、市)及东南、华南丘陵山地森林资源分布多;而辽阔的西北地区、内蒙古中西部、西藏大部以及人口稠密经济发达的华北、中原及长江、黄河下游地区,森林资源分布较少^[14]。全国各地区森林每年会有大量的凋落物从植被层返还至土壤层,但由于其林分特征、年平均气温、年均降水量、经纬度、海拔等立地条件的不同,中国森林凋落物的量在时间和空间上显示出明显差异。

1.2 数据来源

本研究所使用的数据主要来源于实地采样、已发表文献中数据以及相关网站公布的数据的收集整理。如在国际生物计划期间,在日本和有关亚洲热带雨林的一些网站收集了凋落物数据;自 20 世纪 80 年代初,在中国和印度的森林凋落物为对象调查所获得的数据; Liu 等^[10]在研究欧亚大陆森林凋落物时,构建了包括欧亚大陆 471 个样地的凋落量数据库。本研究采用研究区及周边 576 个样地森林总凋落量数据和 425 个样地叶凋落量数据。样地经度、纬度和海拔数据依据原文献获得,各个样地的年均气温、年均降水量以及实际蒸散数据也依据原文献获取;如果原文献没有提供气候因子数据时,根据样地经度、纬度和海拔,使用 LocClim 2.0 (FAO local climate estimate ver 1.0) 软件和网站 (<http://www.worldclim.org/>) 获得,用于全国尺度上森林叶凋落量和总凋落量分析的相关采样点分布(图 1a)。

中国森林覆盖信息基于 MODIS 数据的土地利用产品^[15](Land Cover Type Yearly L3 Global 500 m) 获得 (https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table)。本产品基于 IGBP (International Geosphere Biosphere Programme) 土地利用分类体系,将土地利用类型分为 17 类(图 1b)。

1.3 研究方法

以森林叶凋落量和总凋落量作为因变量,以实际蒸散(AET)、年平均气温(MAT)和年平均降雨量(MAP)等环境气候因子作为自变量,通过逐步回归分别建立森林总凋落量和森林叶凋落量与环境气候因子的关系模型。统计分析借助 SPSS 19.0 软件完成。

研究区森林叶凋落量和总凋落量的空间分布特征及其时空动态变化借助 ArcGIS 10.2 软件中的地统计分析模块并结合基于遥感解译的森林覆盖数据(MODIS: 500 m×500 m)进行分析。首先,对森林叶凋落量和总凋落量估测模型涉及的气候环境因子 MAT、MAP 和 AET 等进行地统计分析,得到与研究区森林覆盖遥感数据相同空间分辨率的空间插值数据;然后,基于建立的模型,通过空间数据的栅格运算,分别获得研究区基于 MAT、MAP 和 AET 的森林叶凋落量和总凋落量分布图;进一步基于土地利用类型特别是森林覆盖信息,计算研究区森林覆盖区域的森林凋落总量以及叶凋落总量。

本研究比较分析反距离加权法、普通克里金插值法、协同克里金插值法和回归克里金法对气温、降

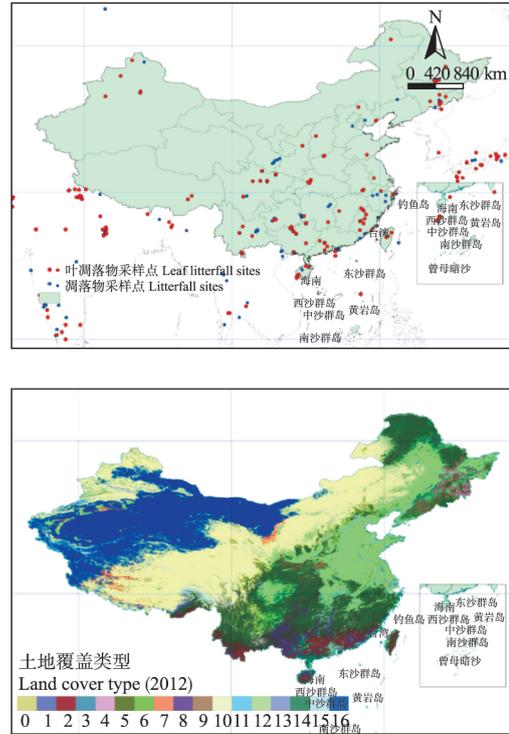


图 1 中国森林(叶)凋落物采样点分布图(a)和 2012 年土地利用类型分布图(b)

Fig.1 Distribution of sampling sites for forest litterfall and leaf litterfall around China (a), and land use type of China in 2012 (b).

- 0) 未分类 Unclassified; 1) 常绿针叶林 Evergreen needleleaf forest; 2) 常绿阔叶林 Evergreen broadleaf forest; 3) 落叶针叶林 Deciduous needleleaf forest; 4) 落叶阔叶林 Deciduous broadleaf forest; 5) 混交林 Mixed forest; 6) 郁闭灌丛 Closed shrublands; 7) 稀疏灌丛 Open shrublands; 8) 多树的草原 Woody savannas; 9) 草原 Savannas; 10) 草地 Grasslands; 11) 永久湿地 Permanent wetlands; 12) 耕地 Croplands; 13) 城市和建筑 Urban and built-up; 14) 耕地和自然植被 Cropland/natural vegetation mosaic; 15) 雪和冰 Snow and ice; 16) 裸地或低植被覆盖地 Barren or sparsely vegetated. 下同 The same below.

水以及实际蒸散的空间模拟效果后,选择回归克里金法对相关因子进行插值外推。

回归克里金法是将统计插值法与回归模型相结合而形成的一种混合方法。首先建立辅助变量与目标变量之间的回归方程,然后利用回归方程对目标变量进行预测,并计算目标变量的残差,对残差进行局部插值后,将残差的插值数据加到目标变量的回归值中,从而得到一个新的预测值^[16-23]。

2 结果与分析

2.1 中国不同类型森林面积的变化

基于 MODIS 数据的土地利用产品获得中国土地利用类型分布情况,计算获得中国 5 种森林类型面积在 2001、2006 和 2012 年的变化情况。由图 2 可以看出,常绿针叶林凋落物主要分布于中国南部沿

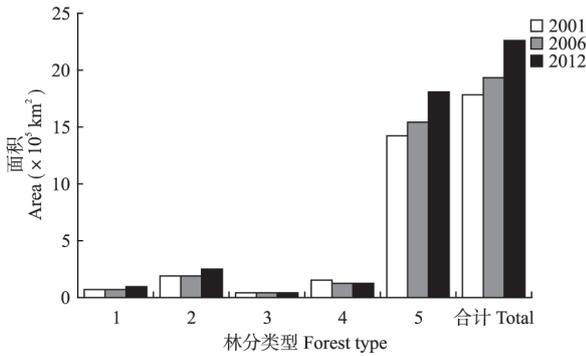


图 2 2001、2006 和 2012 年中国 5 种林分面积变化
Fig.2 Area change of five forest types of China in 2001, 2006 and 2012.

海地带,常绿阔叶林凋落物分布于中国南部区域,落叶针叶林和落叶阔叶林凋落物分布在东北和中部区域,分布最广的是混交林森林叶凋落量和总凋落量,尤其东北、中部以及西藏地区.中国的森林面积从 2001 年的 $17744.58 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 到 2006 年的 $19129.85 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 再到 2012 年的 $22636.46 \times 10^4 \text{ hm}^2$,呈逐步增长趋势,特别是混交林面积.这与国家林业局公布的相应时间段全国森林资源清查数据(1999—2003 年 $17490.92 \times 10^4 \text{ hm}^2$,2004—2008 年 $19545.22 \times 10^4 \text{ hm}^2$,2009—2013 年 $20768.73 \times 10^4 \text{ hm}^2$)基本一致.

2.2 森林叶凋落量和总凋落量估测模型

基于研究区及周边多年采样点数据,建立森林总凋落量和叶凋落量分别与实际蒸散(AET)、年均温(MAT)和年均降雨量(MAP)的逐步回归模型(表 1).由模型参数的比较分析可知,实际蒸散、年均温和年均降雨量对森林总凋落量和叶凋落量有不同程度的解释预测关系.实际蒸散是最优的森林总凋落量(叶凋落量)回归方程中效应显著的自变量,引入年均温和年均降雨量后对回归模型修正 R^2 增长不大.综合分析并参考已有研究结果^[5-7],本研究在进一步的森林叶凋落量和总凋落量的空间分析中采用表 1 中基于实际蒸散的估测模型.

2.3 森林叶凋落量和总凋落量的空间分布及动态特征

应用建立的森林叶凋落量和总凋落量与 AET 的关系模型,基于对气候因子实际蒸散进行回归克里金法地统计分析得到的研究区实际蒸散栅格图,通过栅格计算和基于 GIS 的矢量数据处理,分别得到中国森林总凋落量和叶凋落量的空间分布图(图 3).中国森林年总凋落量和叶年凋落量范围分别为 $167 \sim 933$ 和 $120 \sim 846 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$.受气候和地理因素的影响,相应于研究区森林类型及其分布情况,中国森林总凋落量和叶凋落量主要分布在中国大陆地区的东南部区域,西部区域分布稀疏.在云南、广西和广东等南部沿海区域以及华中地区森林叶凋落量和总凋落量密度较高,河北北部、东北和四川西部以及西藏地区森林叶凋落量和总凋落量密度较低.

对应于研究区不同年份实际蒸散空间插值数据,以及不同林分森林面积的变化情况,本研究计算分析了 2001、2006 和 2012 年的中国森林叶凋落量和总凋落量分布情况(图 4).结果显示,研究区森林凋落量密度呈增长趋势,2001、2006 和 2012 年森林凋落量范围分别为 $120 \sim 845$ 、 $213 \sim 783$ 和 $167 \sim 933 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$.森林叶凋落量范围基本稳定在 $120 \sim 845 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ (图 4).相比于 2001 和 2006 年,2012 年混交林凋落量密度显著增大,特别是在东南部和中部;常绿阔叶林的凋落量也明显提高,尤其在中国南部区域;而落叶阔叶林凋落量密度的分布范围基本保持不变.森林叶凋落量的空间分布和变化特征与森林凋落量基本一致.

基于国家统计局的关于地区分类^[24],即东北地区:吉林省、辽宁省和黑龙江省;华北地区:北京市、天津市、河北省、山西省和内蒙古;华东地区:上海市、江苏省、浙江省、安徽省、福建省、江西省和山东省;西北地区:陕西省、甘肃省、青海省、宁夏和新疆;西南地区:重庆市、四川省、贵州省、云南省和西藏;

表 1 森林叶凋落量 (L_L) 和总凋落量 (L_T) 与实际蒸散 (AET)、年均温 (MAT) 和年均降雨量 (MAP) 的回归模型
Table 1 Regression models for total litterfall (L_T) and leaf litterfall (L_L) and AET, MAT and MAP

模型 Model	指标 Indicator	常数项 Constant				AET				MAT				MAP				n	R^2_{adj}
		偏回归 系数 B	标准误 SE	T	P	系数 Coeffi- cient	标准误 SE	T	P	系数 Coeffi- cient	标准误 SE	T	P	系数 Coeffi- cient	标准误 SE	T	P		
$L_T(L_L) =$	L_T	61.79	29.96	2.062	0.04	0.557	0.028	19.723	<0.001									576	0.368
$c+a \times AET$	L_L	195.78	21.76	8.998	<0.001	0.217	0.021	10.153	<0.001									425	0.390
$L_T(L_L) =$	L_T	47.28	30.20	1.566	0.12	0.482	0.038	12.721	<0.001	4.967	1.69	2.937	0.003					575	0.376
$c+a \times AET+b \times MAT$	L_L	172.44	21.94	7.859	<0.001	0.142	0.026	5.399	<0.001	5.356	1.14	4.688	<0.001					424	0.428
$L_T(L_L) = c+a \times AET+$ $b \times MAT+d \times MAP$	L_T	45.72	30.13	1.518	0.13	0.559	0.053	10.592	<0.001	4.978	1.69	2.951	0.003	-0.051	0.03	-2.08	0.04	574	0.370

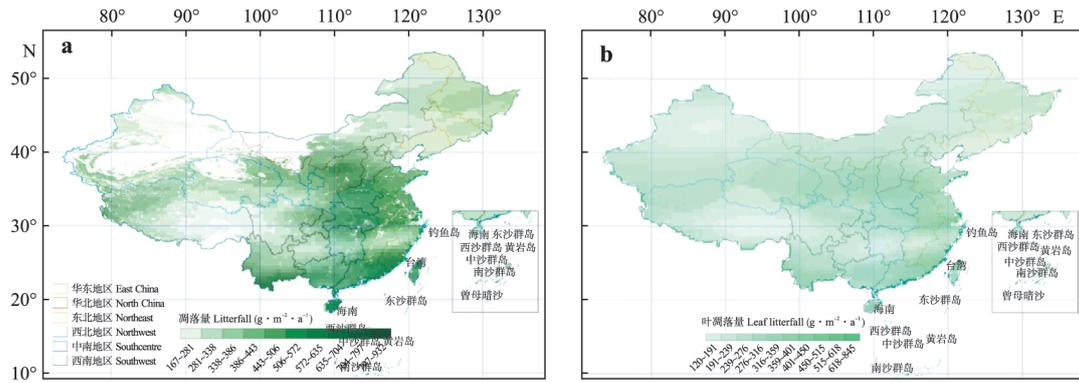


图 3 中国年均森林总凋落量 (a) 和凋落量 (b) 的分布
 Fig.3 Distribution of forest litterfall (a) and leaf litterfall (b) in China.

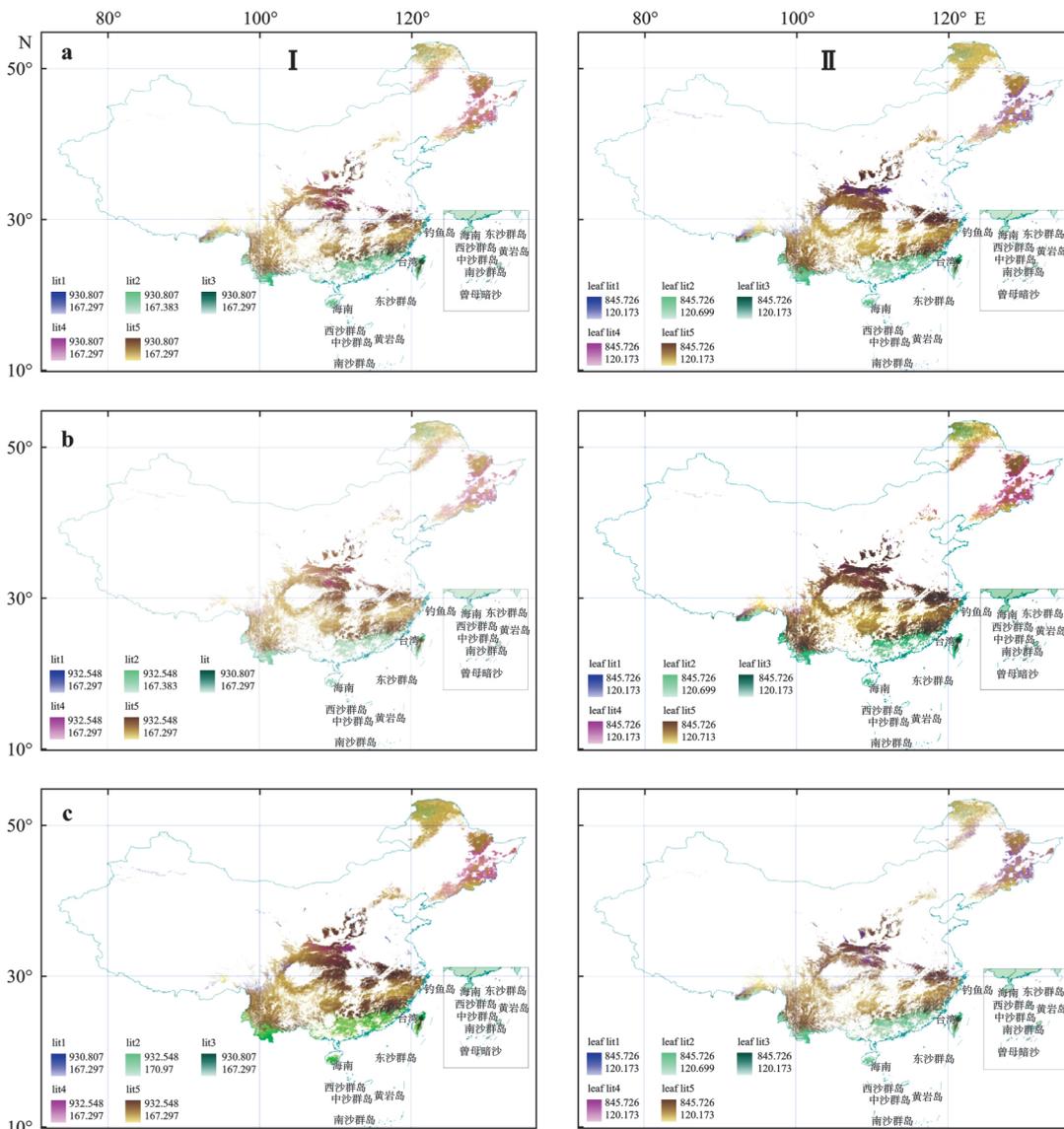


图 4 2001 (a)、2006 (b) 和 2012 年 (c) 中国森林凋落量 (I) 和叶凋落量 (II) 的空间分布
 Fig.4 Spatial distribution of forest litterfall (I) and leaf litterfall (II) in 2001 (a), 2006 (b), 2012 (c) in China ($g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$).

lit 1: 常绿针叶林 Evergreen needleleaf forest; lit 2: 常绿阔叶林 Evergreen broadleaf forest; lit 3: 落叶针叶林 Deciduous needleleaf forest; lit 4: 落叶阔叶林 Deciduous broadleaf forest; lit 5: 混交林 Mixed forest.

中南地区: 湖南省、湖北省、河南省、广东省、广西壮族自治区、海南省和台湾省, 结合图 4 可以看出, 西南和中南地区森林凋落量密度变化较大. 2001—2006 年, 西南地区森林凋落量密度呈减小趋势, 中南地区呈增长态势, 2006—2012 年, 西南地区保持平稳, 中南地区仍继续减小. 除华东地区在个年份中有少量波动外, 其他地区基本保持平稳状态.

2.4 森林总凋落量和叶凋落量的动态变化

2.4.1 不同林分森林凋落量的变化

由表 2 可以看出, 2001—2012 年, 研究区森林凋落总量呈增长态势, 从 801 Tg 增加到 1032 Tg. 基于遥感图像解译的土地利用类型变化信息也呈增长趋势, 2001、2006 和 2012 年研究区森林覆盖率分别为 18%、20% 和 24%.

2001—2012 年间, 5 种森林林分凋落总量有些许变化, 但其占比相对稳定. 其中, 占比最大、接近 80% 的混交林凋落量在 2012 年比 2001 年提高 176 Tg, 比 2006 年提高 107 Tg; 常绿阔叶林凋落量的占比约 13%, 相比 2001 年, 2006 年凋落量稍有减小, 2012 年后又显著增加; 落叶阔叶林、常绿针叶林林分占比逐次递减, 落叶针叶林占比最小, 只有 1% 左右(表 2).

与森林凋落总量变化一致, 研究区森林叶凋落总量从 2001、2006 到 2012 年呈增长趋势, 分别为

571、609 和 702 Tg, 不同林分叶凋落量的占比在 2001—2006 年有微小的变化, 2006—2012 年基本保持平稳. 各林分中, 研究期间常绿针叶林叶凋落量的增幅相对较大, 其次是混交林有稍许增长. 2001—2012 年, 研究区森林叶凋落总量占森林凋落总量的比例均在 70% 左右(表 3).

2.4.2 不同地区的森林总凋落量动态变化

基于国家统计局关于地区分类^[24], 分别计算 2001、2006 和 2012 年中国不同地区森林凋落总量和叶凋落总量. 总的来看, 西南地区森林凋落总量在全国占比最大, 接近 30%, 其次是中南地区, 华东和东北两者占比均为 10% 以上, 华北和西北占比最少且相似, 均为 7% 上下(表 4). 2001—2006 年间, 各地区森林凋落总量变化较小, 2006—2012 年间的变化相对较大, 特别是西南和中南地区在后一时段的森林凋落总量分别增长 47 和 52 Tg, 但其森林凋落量在整个研究区中的占比基本保持不变, 均为 27% 上下.

与研究区森林凋落总量的区域变化特征相同, 相比 2001—2006 年, 2006—2012 年间各地区森林叶凋落总量均呈不同程度的变化. 研究期间, 西南区森林叶凋落总量在全国的占比由 31% 降到 27%, 华北和西北区森林叶凋落总量及其占比均有所提高(表 5).

森林凋落总量及叶凋落总量的变化与各区域森

表 2 中国不同林分森林凋落量的动态变化

Table 2 Annual total forest litterfall dynamics for different forest types in China

林分类型 Forest type	2001		2006		2012	
	总量 Amount (Tg · a ⁻¹)	占比 Percent (%)	总量 Amount (Tg · a ⁻¹)	占比 Percent (%)	总量 Amount (Tg · a ⁻¹)	占比 Percent (%)
常绿针叶林 Evergreen needleleaf forest	18	2.2	16	1.8	30	1.8
常绿阔叶林 Evergreen broadleaf forest	111	13.8	106	12.2	155	12.2
落叶针叶林 Deciduous needleleaf forest	5	0.6	10	1.1	8	1.1
落叶阔叶林 Deciduous needleleaf foes	52	6.4	49	5.6	48	5.6
混交林 Mixed forest	616	76.9	685	79.2	792	79.2
总量 Total	801	100	865	100	1032	100

表 3 中国不同林分森林叶凋落量的动态变化

Table 3 Annual total forest leaf litterfall dynamics for different forest types in China

林分类型 Forest type	2001		2006		2012	
	总量 Amount (Tg · a ⁻¹)	占比 Percent (%)	总量 Amount (Tg · a ⁻¹)	占比 Percent (%)	总量 Amount (Tg · a ⁻¹)	占比 Percent (%)
常绿针叶林 Evergreen needleleaf forest	12	2.2	11	1.9	22	3.1
常绿阔叶林 Evergreen broadleaf forest	76	13.2	73	12.0	81	11.5
落叶针叶林 Deciduous needleleaf forest	3	0.6	7	1.1	5	0.8
落叶阔叶林 Deciduous needleleaf foes	37	6.6	35	5.8	35	5.0
混交林 Mixed forest	442	77.4	482	79.2	559	79.6
总量 Total	571	100	609	100	702	100

表4 不同区域森林年总凋落量的动态变化

Table 4 Annual total forest litterfall dynamic in different regions in China

区域 District	2001		2006		2012	
	总量 Amount (Tg · a ⁻¹)	占比 Percent (%)	总量 Amount (Tg · a ⁻¹)	占比 Percent (%)	总量 Amount (Tg · a ⁻¹)	占比 Percent (%)
东北 Northeast	113	14.1	117	13.6	132	12.8
华北 North China	61	7.6	63	7.3	90	8.7
华东 East China	139	17.4	159	18.3	172	16.7
西北 Northwest	56	7.0	57	6.6	72	6.9
西南 Southwest	233	29.1	241	27.9	288	27.9
中南 Southcentre	200	25.0	227	26.3	279	27.0
总计 Total	801	100	865	100	1032	100

表5 不同区域森林年叶凋落量动态变化

Table 5 Annual forest leaf litterfall dynamic in different regions in China

区域 District	2001		2006		2012	
	总量 Amount (Tg · a ⁻¹)	占比 Percent (%)	总量 Amount (Tg · a ⁻¹)	占比 Percent (%)	总量 Amount (Tg · a ⁻¹)	占比 Percent (%)
东北 Northeast	81	14.1	84	13.7	94	13.4
华北 North China	43	7.5	44	7.3	63	9.0
华东 East China	97	17.1	110	18.1	120	17.0
西北 Northwest	47	8.2	48	7.9	60	8.5
西南 Southwest	176	30.9	181	29.8	190	27.1
中南 Southcentre	127	22.3	141	23.2	175	24.9
总计 Total	571	100	609	100	702	100

表6 全国各区域森林面积

Table 6 Forest coverage area in different regions of China

区域 District	2001		2006		2012	
	面积 Area (×10 ⁴ km ²)	占比 Percent (%)	面积 Area (×10 ⁴ km ²)	占比 Percent (%)	面积 Area (×10 ⁴ km ²)	占比 Percent (%)
东北 Northeast	33.02	18.6	34.48	18.1	39.11	17.3
华北 North China	15.89	9.0	17.06	8.9	23.52	10.4
华东 East China	25.32	14.3	29.02	15.2	31.20	13.8
西北 Northwest	11.92	6.7	12.33	6.5	15.51	6.9
西南 Southwest	58.01	32.8	60.15	31.5	70.60	31.2
中南 Southcentre	32.97	18.6	37.96	19.9	46.03	20.4
总计 Total	177.12	100	191.01	100	225.98	100

林覆盖面积的变化趋势基本一致.如在森林及叶凋落总量变化较大的西南和中南地区,其森林覆盖面积在2006—2012年均增加约10 km²(表6),东北地区的森林覆盖面积和森林(叶)凋落量均有相应的增幅.

3 讨论

基于研究区及周边森林叶凋落物和总凋落物采样点信息,通过逐步回归分析分别建立了综合地理和气候因素的实际蒸散(AET)和森林总凋落量和叶凋落量的估测模型.在此基础上,借助地统计分析和基于遥感解译的森林覆盖信息,以500 m×500 m的空间分辨率分析了全国尺度上森林叶凋落量和总凋

落量的时空动态特征.结果表明:2001—2012年,研究区森林叶凋落量占森林凋落量的70%左右,森林叶凋落量和总凋落量密度空间分布特征依赖于其林分类型和地理气候因子,不同林分 and 不同区域森林(叶)凋落总量动态与相关森林覆盖面积紧密相关.

3.1 森林年凋落量的空间分布特征

本研究的5种林分中,常绿阔叶林年凋落量平均值最高,为636.2 g·m⁻²;按中国分区,中南地区森林年凋落量平均最高,为603.6 g·m⁻²,而常绿阔叶林正是中南地区的主要林分类型.属于亚热带常绿阔叶林范畴的中南区森林年平均凋落量为619.9 g·m⁻²,在亚热带和热带森林的范围之内^[4,24].属于温带落叶阔叶林范畴的东北地区森林年平均凋落量

为 $362 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 与已有研究基本一致^[9]. 5 种林分中的混交林空间分布比较广, 跨越几个区, 其森林年平均凋落量为 $442.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$; 分布于中国南部跨越中国西南和中南地区的常绿针叶林的年平均凋落量为 $354.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 稍高于东北常绿针叶林年平均凋落量 ($301.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)^[11].

3.2 森林凋落总量及森林凋落叶比值

分别对中国 6 个地区和 5 个森林类型的年平均凋落量统计分析显示, 由于地理气候因子的影响, 不同地区间、不同森林类型间年平均凋落量差异显著, 而同一地区、同一林分森林凋落量密度的年际变化不显著. 不同地区间、不同森林类型间凋落总量的变化更多依赖于对应森林覆盖面积的变化. 对比 2001—2006 年和 2006—2012 年两个时段, 由于人类对森林的各种经营活动, 人类的经济活动以及文化娱乐等对森林覆盖面积的影响在后一时段尤为明显. 不同林分及其对应的不同地区的森林凋落总量变化在后一时段更显著, 特别是分布在西南和中南地区的常绿阔叶林.

凋落叶比值是凋落叶量占森林总凋落物量的百分数. 在森林凋落物组成中, 凋落叶约占凋落物总量的 60%~80%^[4, 25], 是森林物质循环、能量流动和养分供应以及碳库贮存的主要来源. 本研究中 2001、2006 和 2012 年凋落叶比值分别为 71%、70% 和 68%; 研究期间, 常绿针叶林、常绿阔叶林、落叶针叶林、落叶阔叶林和混交林的凋落叶比值分别为 69.6%、63.2%、64.2%、71.8%、70.9% 和 69.8%, 落叶树凋落叶比值稍高于常绿树, 而混交林介于二者之间.

3.3 森林凋落量数据库及其空间插值的不确定性

多年采集、收集整理的森林 (576 个采样点) 及叶凋落量数据库 (425 个采样点) 是本研究的基础. 在构建数据库时选择包含了研究区周边的一些采样点, 且这些采样点尽可能在空间分布上兼顾地理位置和气候带以及林分类型, 其目的是为建立森林 (叶) 凋落量与气候地理因素的关系模型提供保证, 另一方面是为满足气候因子空间插值分析的需求. 值得关注的是, 研究区幅员辽阔、跨纬度较广、森林类型多样且分布不均匀, 本文构建的森林 (叶) 凋落量数据库采样点空间分布仍显不均匀, 而且遥感解译图像及其气候环境因子的空间插值图在边缘地带稍有许变形, 这些因素无疑会引发研究区森林 (叶) 凋落量空间分布及其总量计算的不确定性或误差.

本文基于采样点建立的森林总凋落量和叶凋落

量与环境气候因子的关系模型, 分析映射了森林凋落量和森林的生态环境和林木的生物学特性关系. 特别是在此基础上, 运用地统计分析和遥感信息把表现空间单元特征的图与表示森林凋落物随环境气候变化的回归模型有机结合, 实现了对森林凋落量空间格局与时间过程特征的集成, 使森林凋落量空间格局和变化研究更加准确、直观和形象. 与已有大多仅基于气候因子的森林凋落量回归模型相比, 本文得出的森林总 (叶) 凋落量变化时空特征可更加清晰地揭示全国尺度上森林凋落量“格局”与“过程”之间的交替转化规律以及直观的区域差异, 为进一步厘清不同林分和区域的森林凋落量变化及其环境气候因子的影响、预测森林碳循环对气候变化的影响、完善优化森林经营管理规划奠定了科学基础.

参考文献

- [1] Guo W (郭伟), Zhang J (张健), Huang Y-M (黄玉梅), et al. Research progress on ecological function of forest litter. *Journal of Anhui Agricultural Sciences* (安徽农业科学), 2009, **37**(5): 1984-1985 (in Chinese)
- [2] Niu X, Wang B, Liu S, et al. Economical assessment of forest ecosystem services in China: Characteristics and implications. *Ecological Complexity*, 2012, **11**: 1-11
- [3] Li X-F (李雪峰), Han S-J (韩士杰), Li Y-W (李玉文), et al. Litterfall in main forest ecosystems of Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(5): 783-788 (in Chinese)
- [4] Bray JR, Gorham E. Litter production in forests of the world. *Advances in Ecological Research*, 1964, **2**: 101-157
- [5] Meentemeyer V, Box EO, Thompson R. World patterns and amounts of terrestrial plant litter production. *BioScience*, 1982, **32**: 125-128
- [6] Lonsdale W. Predicting the amount of litterfall in forests of the world. *Annals of Botany*, 1988, **61**: 319-324
- [7] Matthews E. Global litter production, pools, and turnover times: Estimates from measurement data and regression models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, **102**: 18771-18800
- [8] Wu C-Z (吴承祯), Hong W (洪伟), Jiang Z-L (姜志林), et al. Advances in research of forest litterfall in China. *Acta Agriculture Universitatis Jiangxiensis* (江西农业大学学报), 2000, **22**(3): 405-409 (in Chinese)
- [9] Xu W-D (徐文铎), Chen W (陈玮), He X-Y (何兴元), et al. Litterfall amount and its dynamics in urban forest of Shenyang, Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(11): 2931-2939 (in Chinese)
- [10] Liu CJ, Westman CJ, Berg B, et al. Variation in litter-

- fall-climate relationships between coniferous and broad-leaf forests in Eurasia. *Global Ecology and Biogeography*, 2004, **13**: 105–114
- [11] Zhang X-P (张新平), Wang X-P (王襄平), Zhu B (朱彪), et al. Litterfall production in relation to environmental factors in China's forest. *Chinese Journal of Plant Ecology (植物生态学报)*, 2008, **32**(5): 1031–1040 (in Chinese)
- [12] Viña A, McConnell WJ, Yang HB, et al. Effects of Conservation Policy on China's Forest Recovery [EB/OL]. (2016-10-10) [2017-01-02]. <http://advances.sciencemag.org/> on April 10, 2016
- [13] Liu S (刘双), Ruan H-H (阮宏华). Spatial pattern analysis of forest biomass and NPP in Guangdong and Guangxi provinces of South China based on geostatistics. *Chinese Journal of Ecology (生态学杂志)*, 2013, **32**(9): 2502–2509 (in Chinese)
- [14] State Administration of Forestry (国家林业局). The seventh national forest resource investigation and forest status study. *Forest Resources Management (林业资源管理)*, 2010(1): 1–8 (in Chinese)
- [15] Hansen M, Potapov P, Moore R, et al. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 2013, **342**: 850–853
- [16] Luo W, Taylor M, Parker S. A comparison of spatial interpolation methods to estimate continuous wind speed surfaces using irregularly distributed data from England and Wales. *International Journal of Climatology*, 2008, **28**: 947–959
- [17] Zhu L (朱蕾), Huang J-F (黄敬峰). Comparison of spatial interpolation method for precipitation of mountain areas in county scale. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (农业工程学报)*, 2007, **23**(7): 80–85 (in Chinese)
- [18] Wijngaard J, Klein Tank A, Können G. Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series. *International Journal of Climatology*, 2003, **23**: 679–692
- [19] McGrath D, Zhang C, Carton OT. Geostatistical analyses and hazard assessment on soil lead in Silvermines area, Ireland. *Environmental Pollution*, 2004, **127**: 239–248
- [20] Meng Q, Liu Z, Borders B. Assessment of regression Kriging for spatial interpolation: Comparisons of seven GIS interpolation methods. *Cartography and Geographic Information Science*, 2013, **40**: 123–128
- [21] Pereira P, Oliva M, Baltreñaite E. Modelling extreme precipitation in hazardous mountainous areas, contribution to landscape planning and environmental management. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 2010, **18**: 329–342
- [22] Hassan MM, Atkins PJ. Arsenic risk mapping in Bangladesh: A simulation technique of cokriging estimation from regional count data. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 2007, **42**: 1719–1728
- [23] Triki I, Trabelsi N, Zairi M, et al. Multivariate statistical and geostatistical techniques for assessing groundwater salinization in Sfax, a coastal region of eastern Tunisia. *Desalination and Water Treatment*, 2014, **52**: 1980–1989
- [24] Fan X-C (范晓春). Study on China Great Administrative Region: 1949–1954. PhD Thesis. Beijing: Party School of the CPC Central Committee, 2007 (in Chinese)
- [25] Wang F-Y (王凤友). Review on the study of forest litterfall. *Advance in Ecology (生态学进展)*, 1989, **6**(2): 82–98 (in Chinese)

作者简介 申广荣,女,1964年生,博士,副教授.主要从事3S技术及其生态应用研究. E-mail: sgrong@sjtu.edu.cn
责任编辑 杨弘

申广荣,项巧巧,陈冬梅,等. 中国森林凋落量时空分布特征. *应用生态学报*, 2017, **28**(8): 2452–2460

Shen G-R, Xiang Q-Q, Chen D-M, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of forest litterfall in China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(8): 2452–2460 (in Chinese)