

# 亚洲东部森林的小气候特征: 1. 辐射和能量的平衡

谭正洪<sup>1\*</sup> 于贵瑞<sup>2</sup> 周国逸<sup>3</sup> 韩士杰<sup>4</sup> 夏禹九<sup>5</sup> 前田高尚<sup>6</sup> 小杉绿子<sup>7</sup> 山野井克己<sup>8</sup> 李胜功<sup>2</sup> 太田岳史<sup>9</sup> 平田竜一<sup>10</sup> 安田幸生<sup>11</sup> 中野隆志<sup>12</sup> 小南裕志<sup>13</sup> 北村兼三<sup>14</sup> 溝口康子<sup>12</sup> 廖志勇<sup>1</sup> 赵俊福<sup>1</sup> 杨廉雁<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院西双版纳热带植物园热带森林生态学重点实验室, 昆明 650223, 中国; <sup>2</sup>中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101, 中国; <sup>3</sup>中国科学院华南植物园, 广州 510650, 中国; <sup>4</sup>中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016, 中国; <sup>5</sup>东华大学环境学院, 台湾花莲 97401, 中国; <sup>6</sup>日本产业技术综合研究所环境管理技术研究部门, 筑波 305-8569, 日本; <sup>7</sup>京都大学农学研究科, 京都 606-8501, 日本; <sup>8</sup>日本森林综合研究所北海道支所, 札幌 062-8516, 日本; <sup>9</sup>名古屋大学生命农学研究科, 名古屋 464-8601, 日本; <sup>10</sup>日本国立环境研究所地球环境研究中心, 筑波 305-8506, 日本; <sup>11</sup>日本森林综合研究所东北支所, 岩手 020-0123, 日本; <sup>12</sup>日本森林综合研究所气象环境研究领域, 筑波 305-8687, 日本; <sup>13</sup>日本森林综合研究所关西支所, 京都 612-0855, 日本; <sup>14</sup>日本森林综合研究所九州支所, 熊本 860-0862, 日本

**摘要** 森林小气候是森林植被与区域气候相互作用所形成的局地环境系统。森林小气候的研究, 不仅是一项关于森林生态系统运行机理的理论研究工作, 对农林业生产也具有现实的指导意义, 在全球变化形势下其重要性又进一步凸显。辐射的收支、能量的平衡与分配是小气候特征形成的基础。对森林辐射收支和能量分配的研究, 过去主要以单站点为主, 系统的区域分析十分匮乏。该文采用亚洲东部17个森林站点的实测数据, 分析了生态系统的辐射收支和能量平衡, 探讨了区域尺度上辐射特征量的纬度变异性及其预测关系式, 建立了亚洲东部森林带典型森林生态系统的辐射和能量收支模式。所选站点以水平地带性为主, 为区域分析奠定了基础。研究发现, 辐射特征量具有明显的纬度依赖性, 辐射特征量和纬度二者的关系可以用于相应的预测。比如, 太阳辐射随着纬度的变化关系为:  $y = 6205 - 42.15x$  ( $p < 0.01$ ), 即纬度每上升1°, 太阳辐射年总量下降42 MJ, 理论最大值为6 205 MJ。净辐射的纬度趋势更加显著( $r = -0.89$ ,  $p < 0.000 1$ ), 其线性回归关系为:  $y = 4340 - 45.60x$ 。亚洲东部森林蒸散比(EF)与降水量(P)之间的定量关系为:  $EF = 0.7098(1 - \exp(-0.0026P))$ 。通过对比不同森林带的辐射和能量模式, 发现亚热带森林在辐射收支上与温带森林相近, 波文比既高于温带森林, 也高于热带森林, 表明更多的净辐射能用于显热交换。关于亚热带森林在小气候和物质代谢方面的特殊性, 值得进一步分析研究。

**关键词** 亚热带森林, 纬度地带性, 蒸散比, 太阳辐射, 能量分配

**引用格式:** 谭正洪, 于贵瑞, 周国逸, 韩士杰, 夏禹九, 前田高尚, 小杉绿子, 山野井克己, 李胜功, 太田岳史, 平田竜一, 安田幸生, 中野隆志, 小南裕志, 北村兼三, 溝口康子, 廖志勇, 赵俊福, 杨廉雁 (2015). 亚洲东部森林的小气候特征: 1. 辐射和能量的平衡. 植物生态学报, 39, 541–553. doi: 10.17521/cjpe.2015.0052

## Microclimate of forests across East Asia biomes: 1. Radiation and energy balance

TAN Zheng-Hong<sup>1\*</sup>, YU Gui-Rui<sup>2</sup>, ZHOU Guo-Yi<sup>3</sup>, HAN Shi-Jie<sup>4</sup>, HSIA Yue-Joe<sup>5</sup>, MAEDA Takashi<sup>6</sup>, KOSUGI Yoshiko<sup>7</sup>, YAMANOI Katsumi<sup>8</sup>, LI Sheng-Gong<sup>2</sup>, OHTA Takeshi<sup>9</sup>, HIRATA Ryuichi<sup>10</sup>, YASUDA Yukio<sup>11</sup>, NAKANO Takashi<sup>12</sup>, KOMINAMI Yuji<sup>13</sup>, KITAMURA Kenzo<sup>14</sup>, MIZOGUCHI Yasuko<sup>12</sup>, LIAO Zhi-Yong<sup>1</sup>, ZHAO Jun-Fu<sup>1</sup>, and YANG Lian-Yan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, China; <sup>2</sup>Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; <sup>3</sup>South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; <sup>4</sup>Shenyang Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; <sup>5</sup>College of Environmental Studies, Dong Hwa University, Hualien 97401, Taiwan, China; <sup>6</sup>Environmental Management Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba 305-8569, Japan; <sup>7</sup>Graduate School Agriculture, Kyoto University, Kyoto 606-8501, Japan; <sup>8</sup>Hokkaido Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute, Sapporo 062-8516, Japan; <sup>9</sup>Graduate School of Bioagricultural Sciences, Nagoya University, Nagoya 464-8601, Japan; <sup>10</sup>Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, Tsukuba 305-8506, Japan; <sup>11</sup>Tohoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute, Iwate 020-0123, Japan; <sup>12</sup>Department of Meteorological Environment, Forestry and Forest Products Research Institute, Tsukuba 305-8687, Japan; <sup>13</sup>Kansai Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute, Kyoto 612-0855, Japan; <sup>14</sup>Kyushu Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute, Kumamoto 860-0862, Japan

### Abstract

**Aims** Forest microclimate is the local environment generated through the interaction between regional climate and forest structure. Studies on forest microclimate not only have theoretical significances in ecology but also practical meanings in forest management practices and wood production. Radiation budget and energy balance is

the basis for microclimate. Few studies have performed the radiation budget and energy balance analysis at regional scale. Here, we focused at this for the East Asia.

**Methods** A total of 17 forest sites in the East Asia across biomes were used in this study. Measurements on solar radiation, long-wave radiation, net radiation, sensible heat flux, latent heat flux, and soil heat flux were compiled in the context of radiation and energy conservation. The annual variations of radiation and energy components were analyzed by site. Mean annual radiation and energy were related to latitude. The radiation and energy conservation equations were established for each forest biome by the multi-site block averages.

**Important findings** Forest radiation properties (i.e. solar radiation, net radiation, albedo) showed a linear trend with latitude among the sites. For example, the solar radiation and latitude relationship is:  $y = 6205 - 42.15x$  ( $p < 0.01$ ), indicating that solar radiation decreases with latitude at a rate of 42 MJ per degree with a theoretical maximum of 6 205 MJ. A more significant relationship was found between net radiation and latitude:  $y = 4340 - 45.60x$  ( $r = -0.89$ ,  $p < 0.0001$ ). The radiation and energy budgets of boreal, temperate, subtropical and tropical forest were established. Evapotranspiration fraction ( $EF$ ) was highly correlated with precipitation ( $P$ ) as:  $EF = 0.7098(1 - \exp(-0.0026P))$  ( $R^2 = 0.7451$ ,  $p < 0.0001$ ). Subtropical forest showed a unique pattern in this cross-biome analysis but needs further studies in the future.

**Key words** subtropical forest, latitude trend, evapotranspiration fraction, solar radiation, energy partitioning

**Citation:** Tan ZH, Yu GR, Zhou GY, Han SJ, Hsia YJ, Maeda T, Kosugi Y, Yamanoi K, Li SG, Ohta T, Hirata R, Yasuda Y, Nakano T, Kominami Y, Kitamura K, Mizoguchi Y, Liao ZY, Zhao JF, Yang LY (2015). Microclimate of forests across East Asia biomes: 1. Radiation and energy balance. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39, 541–553. doi: 10.17521/cjpe. 2015.0052

森林所在的区域常具有区别于周围大环境的小气候(Microclimate)(Chen *et al.*, 1993; Lee *et al.*, 2011)。森林小气候是森林植被与区域气候相互作用所形成的局地环境系统。这种局地环境可以直接作用于生态系统, 影响森林的光合生产、植被生长、水分蒸腾、辐射能量平衡等生态过程; 也可以作为陆面过程影响气候系统。所以, 森林小气候一直以来都是生态环境领域的研究重点。

如同其他近代科学一样, 森林小气候的研究, 也是首先在欧洲发展起来的(贺庆棠, 2001)。当时的欧洲, 除发展了森林气象站、气象观测塔等目前森林小气候常用的研究方法外, 还结集出版了《The Climate Near the Ground》一书, 集成了当时的研究成果(Geiger *et al.*, 1965)。相比之下, 亚洲地区森林小气候的研究则发展较为缓慢。日本在20世纪60年代才完成森林气象台站网的建设; 中国的相关研究零零星星, 难成体系(洪启法等, 1963); 东南亚热带森林的小气候, 在21世纪前几乎为空白。

全球温暖化及其环境效应是近年来受到科学界、政府以及民众普遍关注的一个科学问题。在目前的认知水平下, 虽无确凿的证据, 但多数事实说明, 人类活动改变了温室气体的自然平衡状态, 最终通过温室效应, 引起了地球表面温度的上升。森林的碳蓄积被认为是减缓温暖化的一个重要途径(Pan *et al.*, 2011)。为了探明森林碳蓄积的格局及其

环境调控, 从20世纪90年代始, 在全球范围内建立了大量的微气象监测塔, 布设了涡度相关系统(Wofsy *et al.*, 1993; Baldocchi, 2014)。涡度相关(eddy correlation)是基于微气象原理的一种方法; 所以, 在涡度通量监测的同时, 必然对一些森林气象要素开展同期监测, 比如辐射、温度、湿度、风速等。这样, 大量的森林小气候数据集聚起来。然而, 这些数据一直都作为涡度监测的副产物, 并没有被很好地挖掘和利用(Baldocchi *et al.*, 2001)。

利用亚洲通量网(AsiaFLUX)、中国通量网(ChinaFLUX)和日本森林综合研究所通量网(FFPRI FluxNet)的数据平台, 我们对亚洲东部森林的小气候进行了跨气候带的综合分析。由于森林小气候的牵涉面很广, 我们在这里仅讨论森林的辐射和能量。辐射的收支, 能量的平衡与分配是小气候形成的基础。太阳辐射(solar radiation,  $R_g$ )是森林生态系统能量的主要来源(Chapin III *et al.*, 2012)。到达森林-大气界面的太阳辐射, 一部分由界面直接反射返回大气, 一部分以长波的形式损失; 剩余下来进入生态系统驱动其他过程的这部分辐射能量被称为净辐射(net radiation,  $R_n$ )(Campbell & Norman, 1998)。生态系统净辐射能的耗散形式主要有两种: 潜热(latent heat,  $LE$ )和显热(sensible heat,  $H_s$ ), 其分配常用波文比(Bowen ratio,  $BWR$ )来描述。辐射的收支, 能量的平衡与分配, 常因气候带、植被类型的不同

同而具有差异性和规律性。对这些规律的把握, 既是细化陆面模式, 准确预测气候变化的基础, 也是理解陆地生态系统运行机制, 进行生态系统管理的重要一环。我们在本文中希望回答如下几个问题:

(1) 太阳辐射、净辐射、反照率等辐射要素, 土壤热通量、波文比等能量项的时间动态如何, 在不同的森林带中有何差异?

(2) 森林的辐射和能量特征是否具有纬度趋势, 各森林带典型森林的辐射和能量平衡模式是什么?

(3) 亚洲东部森林蒸散比 (evapotranspiration fraction,  $EF$ ) 与降水量之间的定量关系如何?

## 1 材料和方法

### 1.1 理论框架

森林的辐射平衡可作如下表述:

$$R_n = S\downarrow - S\uparrow + L\downarrow - L\uparrow = R_g(1 - \alpha) - I$$

其中,  $R_n$  指净辐射,  $S\downarrow$  指向下的短波辐射, 即到达林冠上方的太阳辐射 ( $R_g$ ),  $S\uparrow$  指向上的短波辐射,  $S\uparrow$  与  $S\downarrow$  的比值即反照率 (albedo,  $\alpha$ ), 有效辐射 (net long-wave radiation loss,  $I$ ) 是  $L\uparrow$  与  $L\downarrow$  之间的差值。

森林的能量平衡为:

$$R_n = LE + H_s + G + \varepsilon \cong LE + H_s =$$

$$LE(1 + \beta) = LE / EF$$

其中,  $LE$  指潜热通量,  $H_s$  指显热通量,  $G$  指土壤热通量,  $\varepsilon$  表示残差项, 包括热储量、光合作用耗能等。在郁闭的森林中,  $G$  和  $\varepsilon$  所占的比重常低于 5%, 可以忽略不计, 进行近似处理。 $\beta$  指波文比 ( $BWR$ ),  $EF$  指蒸散比, 其定义为  $LE/(LE + H_s)$ 。

### 1.2 数据来源

本文所使用的数据主要来自于 AsiaFLUX、ChinaFLUX 和 FFPRI FluxNet。从西伯利亚的北方针叶林一直到东南亚的热带雨林, 我们一共挑选了 17 个站点用于小气候的分析。我们挑出站点信息的主要部分, 列于表 1。具体的仪器配置信息、站点介绍列于各通量网的网页 ([www.chinaflux.org](http://www.chinaflux.org), [www.asiaflux.net](http://www.asiaflux.net), <http://www2.ffpri.affrc.go.jp/labs/flux/>) 或者相关的参考文献 (Saigusa *et al.*, 2013)。 $LE$  和  $H_s$  通过涡度相关系统进行监测, 土壤热通量由埋放在土壤中的热流板直接测定, 相应的辐射计及其型号通过上述站点网页获知。求算协方差的平均时间为 30 min, 唯泰国的两个站点例外, 采用 1 h。因无法获取泰国站点的 10 Hz 数据, 进行通量重算, 所以最

终采用了站点所提供的 1 h 平均周期的数据。论文所使用数据直接向各通量网络平台索取, 站点负责人 (principal investigator) 拥有数据最终解释权。

### 1.3 数据分析和计算

站点数据多在 3 年以上, 我们在剔除野点后, 将多年的数据进行了平均, 得到一个平均年, 用于其后的分析。平均年基本上具有完整的时间序列, 对于短期的数据空白, 我们使用线性内插的方式进行了插补。由于辐射平衡 (辐射计) 和能量分量 (涡度相关系统) 所测定的仪器不同, 代表的空间范围也不一样, 二者之间常常并不能达到完全闭合 (即  $LE + H_s$  常低于  $R_n - G$ )。考虑到本文的主要目的并非探讨能量闭合的问题, 为了简化分析, 我们对能量闭合度进行了假定, 即能量闭合度为理想状态 (100%)。在具有明显非生长季的北方森林或者温带森林, 冬季能量主要分配为  $H_s$ ,  $LE$  所占的比重非常低, 波文比在该期间波动也特别大, 所以在计算年波文比值时, 我们采用了  $\sum H_s / \sum LE$ , 即年显热总量除以年潜热总量。蒸散比也为类似计算所得。而反照率则不同, 我们首先计算出每天向上和向下的短波辐射总量, 然后据此得到每天的反照率, 最后在全年尺度上进行平均。

## 2 结果

### 2.1 站点的代表性

一共选择了 17 个森林站进行分析 (表 1)。所有的站点皆位于北半球, 纬度跨度近  $60^\circ$  ( $2.96^\circ - 62.25^\circ$  N)。最南端的站点为马来西亚境内赤道附近的 Pasoh 站, 最北端为俄罗斯西伯利亚的 Yakutsk 站。各站点根据气候类型和植被特征, 对其森林类型进行了分类。依此标准, 可将所选的 17 个森林划分为: 北方森林 (boreal forest, 5 个)、温带森林 (temperate forest, 6 个)、亚热带森林 (subtropical forest, 3 个) 和热带森林 (tropical forest, 3 个)。在一些森林带的划分中, 亚热带森林并未独立划出, 可能是因为地球上副高压带所控制的地区多为荒漠、沙漠。在亚洲东部, 受青藏高原的影响, 亚热带森林十分发育。所以, 我们将亚热带森林带单独列出。从森林的年龄上看多为成熟林, 呈郁闭状态。典型树种包括落叶松 (*Larix gmelinii*)、欧洲赤松 (*Pinus sylvestris*)、白桦 (*Betula platyphylla*)、红松 (*Pinus koraiensis*)、栎 (*Quercus serrata*)、赤松 (*Pinus densiflora*)、日本柳杉

表1 本研究17个站点的信息

Table 1 Site characteristics of the 17 sites in this study

序号 No.	站点 Site	地理位置 Location	海拔 Elevation (m)	温度 Temperature (°C)	降水量 Precipitation (mm)	冠层高度 Canopy height (m)	林龄 Stand age (a)	时段 Period (Year-month)	开闭路 Open or close	森林带 Biome	国际地圈生物 圈计划分类 IGBP	典型树种 Typical species	参考文献 Reference
1	Yakutsk Larch, Russia (YLF)	62.25°N 129.23°E	220	-7.24	259	18	-	2003-07	OP	北方森林	DNF	落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	Ohta <i>et al.</i> , 2008
2	Yakutsk Pine, Russia (YPF)	62.24°N 129.65°E	220	-8.9	-	10	-	2004-07	OP	北方森林	ENF	欧洲赤松 <i>Pinus sylvestris</i>	Hamada <i>et al.</i> , 2004
3	Khentei, Mongolia (SKT)	48.35°N 108.65°E	1 630	-2.9	282	20	150	2003-06	OP	北方森林	DNF	新疆落叶松 <i>Larix sibirica</i>	Li <i>et al.</i> , 2005
4	Sapporo, Japan (SAP)	42.98°N 141.38°E	182	7	980	20	100	2000-07	OP	北方森林	DBF	白桦 <i>Betula platyphylla</i> <i>Quercus crispula</i>	Kiamura <i>et al.</i> , 2012
5	Tomakomai, Japan (TMK)	42.73°N 141.52°E	140	6.2	1 043	15	45	2001-03	CP	温带森林	DNF	刺楸 <i>Kalopanax septemlobus</i> 日本落叶松 <i>Larix Kaempferi</i> 岳桦 <i>Betula ermanii</i>	Hirano <i>et al.</i> , 2003
6	Changbaishan, China (CBS)	42.40°N 128.08°E	738	3.6	695	26	200	2004-06	OP	温带森林	MF	红松 <i>Pinus koraiensis</i> 紫杉 <i>Tilia amurensis</i> 色木槭 <i>Acer pictum</i> subsp. <i>mono</i> <i>Fagus crenata</i>	Guan <i>et al.</i> , 2006
7	Appi, Japan (API)	40.00°N 140.93°E	825	5.9	1 869	19	80	2000-06	CP	北方森林	DNF	栎 <i>Quercus serrata</i> <i>Carpinus laxiflora</i>	Yasuda <i>et al.</i> , 2012
8	Kawagoe, Japan (KWG)	35.87°N 139.48°E	26	15.2	1 569	15	-	1995-2002	CP	温带森林	DBF	槲栎 <i>Quercus serrata</i> 槲栎 <i>Quercus mongolica</i> 具柄冬青 <i>Ilex pedunculosa</i>	Yasuda & Wa- tanabe, 2001
9	Fujiyoshida, Japan (FJY)	35.45°N 138.76°E	1 030	9.5	1 954	20	100	2000-08	OP/CP	温带森林	DNF	槲栎 <i>Quercus serrata</i> 槲栎 <i>Quercus serrata</i> 赤松 <i>Pinus densiflora</i> 具柄冬青 <i>Ilex pedunculosa</i>	Mizoguchi <i>et al.</i> , 2012
10	Yamashiro, Japan (YMS)	34.79°N 135.84°E	180-225	14.7	1 095	12	119	2000-05	OP/CP	温带森林	DBF	槲栎 <i>Quercus serrata</i> 具柄冬青 <i>Ilex pedunculosa</i> <i>Lyonia elliptica</i>	Kominami <i>et al.</i> , 2008
11	Kahoku, Japan (KHW)	33.13°N 130.70°E	165	15.1	2 106	30	55	2000-03	OP/CP	温带森林	ENF	日本扁柏 <i>Cryptomeria japonica</i> 日本扁柏 <i>Chamaecyparis obtusa</i> <i>Castanopsis cuspidata</i>	Shimizu <i>et al.</i> , 2003
12	Qianyanzhou, China (QYZ)	26.73°N 115.05°E	102	17.9	1 485	12	23	2004-06	OP	亚热带森林	ENF	马尾松 <i>Pinus massoniana</i> 湿地松 <i>Pinus elliotii</i>	Yu <i>et al.</i> , 2008
13	Chilanshan, Taiwan (CLM)	24.58°N 121.40°E	1 400- 1 800	13	4 000	11-14	50	2007-09	OP	亚热带森林	ENF	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i> 日本扁柏 <i>Chamaecyparis obtusa</i>	Mildenberger <i>et al.</i> , 2009
14	Dinghushan, China (DHS)	23.16°N 112.57°E	300	21.0	1 956	20	100	2007-09	OP	亚热带森林	EBF	红松 <i>Chamaecyparis formosensis</i> 木荷 <i>Schima superba</i> 桂林栲 <i>Castanopsis chinensis</i>	Yu <i>et al.</i> , 2008
15	Mae Klong, Thailand (MKL)	14.57°N 98.84°E	231	25	1 500	30	30	2003-04	CP	热带森林	MF	马尾松 <i>Pinus massoniana</i> <i>Shorea siamensis</i>	Gamo <i>et al.</i> , 2005
16	Sakaerat, Thailand (SKR)	14.49°N 101.91°E	543	24	1 250	35	成熟林 Mature	2001-03	CP	热带森林	EBF	长序荆 <i>Vitex peduncularis</i> <i>Xylia xylocarpa</i>	Gamo <i>et al.</i> , 2005
17	Pasoh, Malaysia (PSO)	2.96°N 102.30°E	75-150	25.3	1 865	35	原始林 Primary	2003-09	CP	热带森林	EBF	<i>Hopea ferrea</i>	Kosugi <i>et al.</i> , 2008

CP, 闭路涡度相关系统; DBF, 落叶阔叶林; DNF, 常绿针叶林; ENF, 常绿阔叶林; EBF, 常绿阔叶林; ENF, 常绿针叶林; IGBP, 国际地圈-生物圈计划; OP, 开路涡度相关系统。  
CP, close path eddy covariance system; DBF, deciduous broadleaved forest; DNF, deciduous needle forest; ENF, evergreen broadleaved forest; EBF, evergreen needle forest; IGBP, International Geosphere-Biosphere Program; OP, open path eddy covariance system.

(*Cryptomeria japonica*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、木荷(*Schima superba*)以及龙脑香科树种(*Hopea ferrea*和*Shorea siamensis*)。所选的站点均匀分布在纬度上, 纬度和气温呈现非常好的线性相关性(图1)。这从另一个侧面反映, 所选站点的地带性以水平纬度地带性为主, 垂直海拔地带性较弱。

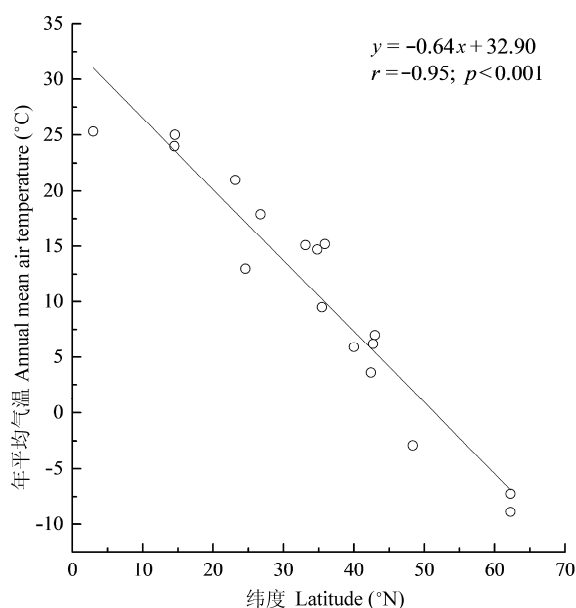


图1 森林冠层上方年平均气温随着纬度的变化趋势及其线性回归关系。

Fig. 1 Changes in annual mean air temperature with latitude.

## 2.2 年变化特征

从各森林带分别挑选一个站点, 对其辐射和能量特征的年变化进行了比较分析(图2-6)。北方森林和温带森林的太阳辐射具有明显的季节变化特征(图2A, 2B), 夏季辐射高, 冬季辐射低。夏季辐射最高值达到 $25 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ , 冬季最低值约 $5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。温带森林代表站点(TMK站)位于日本的北海道, 降水充沛(超过 $1\,000 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ ), 夏季太阳辐射比较离散。北方森林的代表站点(SKT)位于蒙古境内, 年降水量不到 $300 \text{ mm}$ , 太阳辐射的格局几乎由所在纬度的日-地关系所决定, 季节变化格局非常明显。亚热带森林的太阳辐射季节变化不明显, 夏秋季非常离散, 在3月前后出现接近0的最低值(图2C)。热带森林的太阳辐射几乎全年保持在 $15\text{--}20 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ , 季节间的波动非常弱(图2D)。热带森林的太阳辐射季节格局, 一方面是由其所在地地理位置的日-地

关系所决定, 另一方面, 热带的降雨多为强降雨类型, 较少出现阴雨连绵的情况, 也避免了因为连绵阴雨致使辐射非常离散的情况发生。

净辐射的年变化格局与太阳辐射类似, 但也有区别(图3)。首先, 净辐射的季节变化更为明显, 即便太阳辐射没有明显季节变化的亚热带森林, 其净辐射也表现出明显的季节性(图3C)。其次, 北方森林的净辐射在冬季呈现为负值, 一方面可能与冰雪覆盖, 产生较高的反照率有关, 另一方面也表明期间的有效辐射损失尚保持在一定的水平(图3A)。

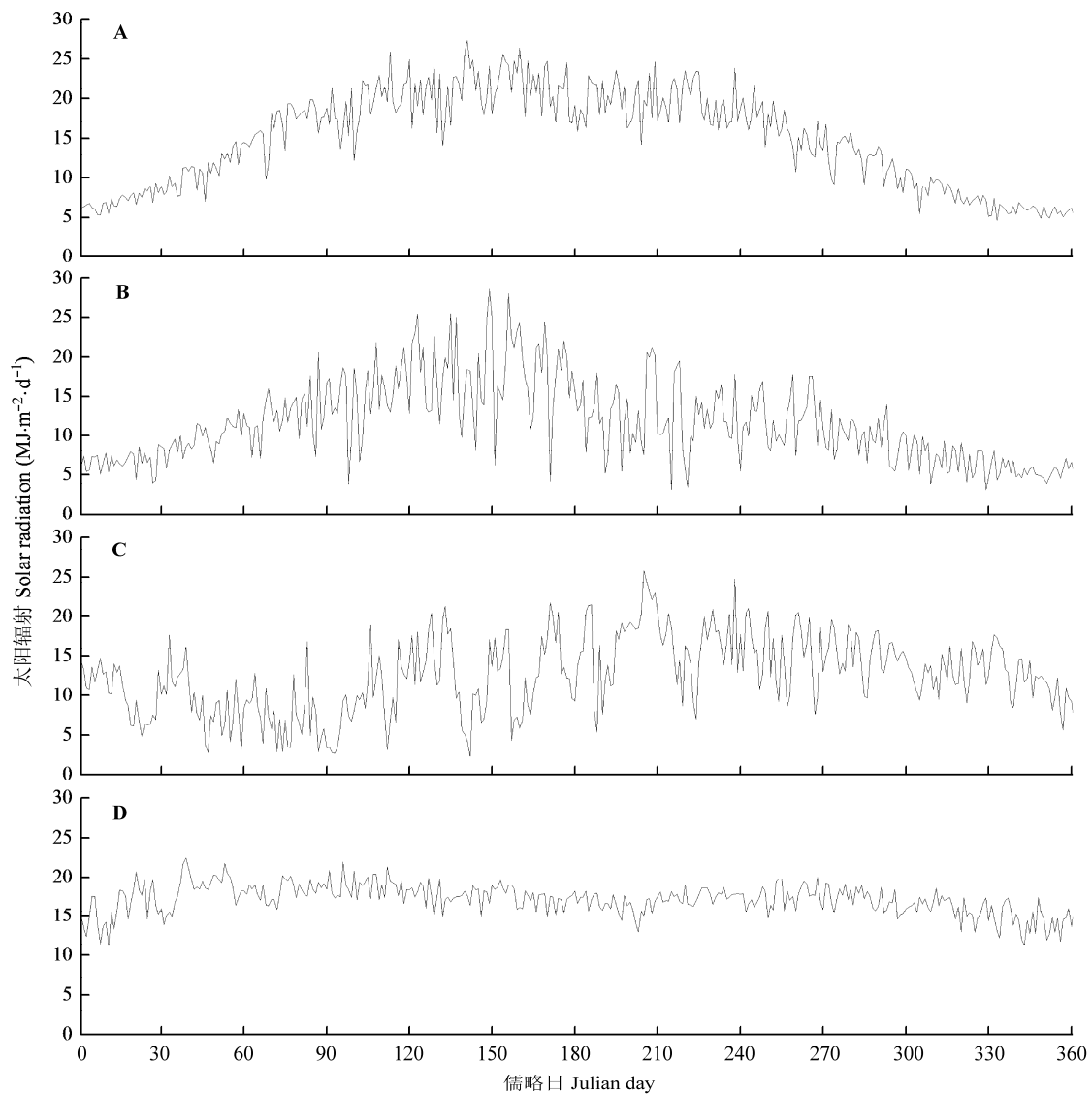
北方森林和温带森林的反照率年变化相类似(图4A, 4B)。随着冰雪的消融, 反照率不断下降, 在4月前后, 反照率下降到最低, 然后维持在一定的水平; 到11月前后, 随着冬季的到来, 冰雪再次形成, 反照率上升。不同的是, 温带森林的反照率在6月前后出现了一个小峰值, 这个峰值与新叶的生成和成熟过程中叶片光学特性的变化有关。亚热带森林的反照率呈开阔的“V”字形, 7-8月前后最低值不到0.06 (图4C)。热带森林的反照率虽然波动不大(0.10-0.12), 但还是呈现出明显的季节构型(图4D)。虽然该森林的降雨没有非常明显的季节性, 难以区分旱季和雨季, 但是降雨在3-5月和10-12月较其他时段偏高。反照率在3-5月呈明显的上升趋势, 我们推测这种现象的出现与同期出现的展叶和叶片成熟过程有关。新展的叶片叶绿素含量低, 有的甚至呈现红色, 这会增加冠层的反照率。

波文比的年变化见图5所示。北方森林和温带森林冬季的波文比数值较大, 为了比较方便, 我们使用了半对数坐标。各森林类型夏季生长盛期波文比的数值普遍低于1.0。与其他森林相比, 热带雨林波文比的季节波动很弱(图5D)。

除热带森林外, 土壤热通量基本上在 $-1.0\text{--}1.0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 之间波动, 夏季高且多为正值, 冬季低且多为负值, 显现类似的季节变动格局(图6)。热带森林几乎在全年皆表现为负值, 波动非常微弱( $-0.2\text{--}0.0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ )。这可能与该地较小的温度日较差和年较差有关。

## 2.3 辐射和能量平衡的纬度趋势

为了进行横跨森林带的比较, 我们对各站点的辐射和能量项进行了统计(表2)。首先, 土壤热通量占净辐射的比重一般在2%左右, 其中最高的为SKT站, 约占4.1%。FJY站的土壤热通量年值为正值, 即



**图2** 各森林带典型森林冠层上方太阳辐射的年变化。**A**, SKT站数据, 代表北方针叶林。**B**, TMK站数据, 代表温带森林。**C**, DHS站数据, 代表亚热带森林。**D**, PSO站数据, 代表热带森林。每一个数据点是多年平均日总量值。站点信息见表1。  
**Fig. 2** The annual cycle of solar radiation above forest canopy across forest biomes. **A**, SKT for boreal forest. **B**, TMK for temperate forest. **C**, DHS for subtropical forest. **D**, PSO for tropical forest. Each value is the daily sum of multi-year means. Site information sees Table 1.

土壤对近地层空气传热。这可能与该站所在地位于富士山脚下, 具有丰富的地热有关。其次, 能量的分配过程不具有纬度趋势。不论波文比还是蒸散比, 与纬度都没有相关性(波文比:  $p = 0.14$ ; 蒸散比:  $p = 0.21$ )。最后, 辐射特征量具有明显的纬度性(图7)。热带森林的年太阳辐射总量超过6 000 MJ, 而北方森林的数值仅为其一半左右, 太阳辐射随着纬度的变化关系为:  $y = 6205 - 42.15x$  ( $p < 0.01$ ), 即纬度每上升1°, 年太阳辐射总量下降42 MJ, 理论最大值为6 205 MJ(图7A)。净辐射的纬度趋势更加显著( $r = -0.89$ ,  $p < 0.000 1$ ), 其线性回归关系为:  $y = 4340 -$

$45.60x$ 。净辐射随纬度上升下降的速率更高, 达45 MJ每度, 理论上的最大值为4 340 MJ(图7B)。净辐射占总辐射的比重, 随着纬度上升也有下降的趋势(图7C)。PSO站的热带雨林, 太阳辐射中有近73%转化为净辐射, 而在蒙古的SKT站, 该数值下降到37%左右, 仅为最大值的一半。反照率的纬度趋势可以表示为:  $y = 0.0651 + 0.0022x$  ( $p < 0.01$ )(图7D)。

#### 2.4 蒸散比和降水量之间的定量关系

如前述, 能量的分配不具有纬度趋势性; 但是, 我们发现能量分配对水分条件有很强的依赖性(图8)。蒸散比在年降水量较低的站点非常低, 随着降

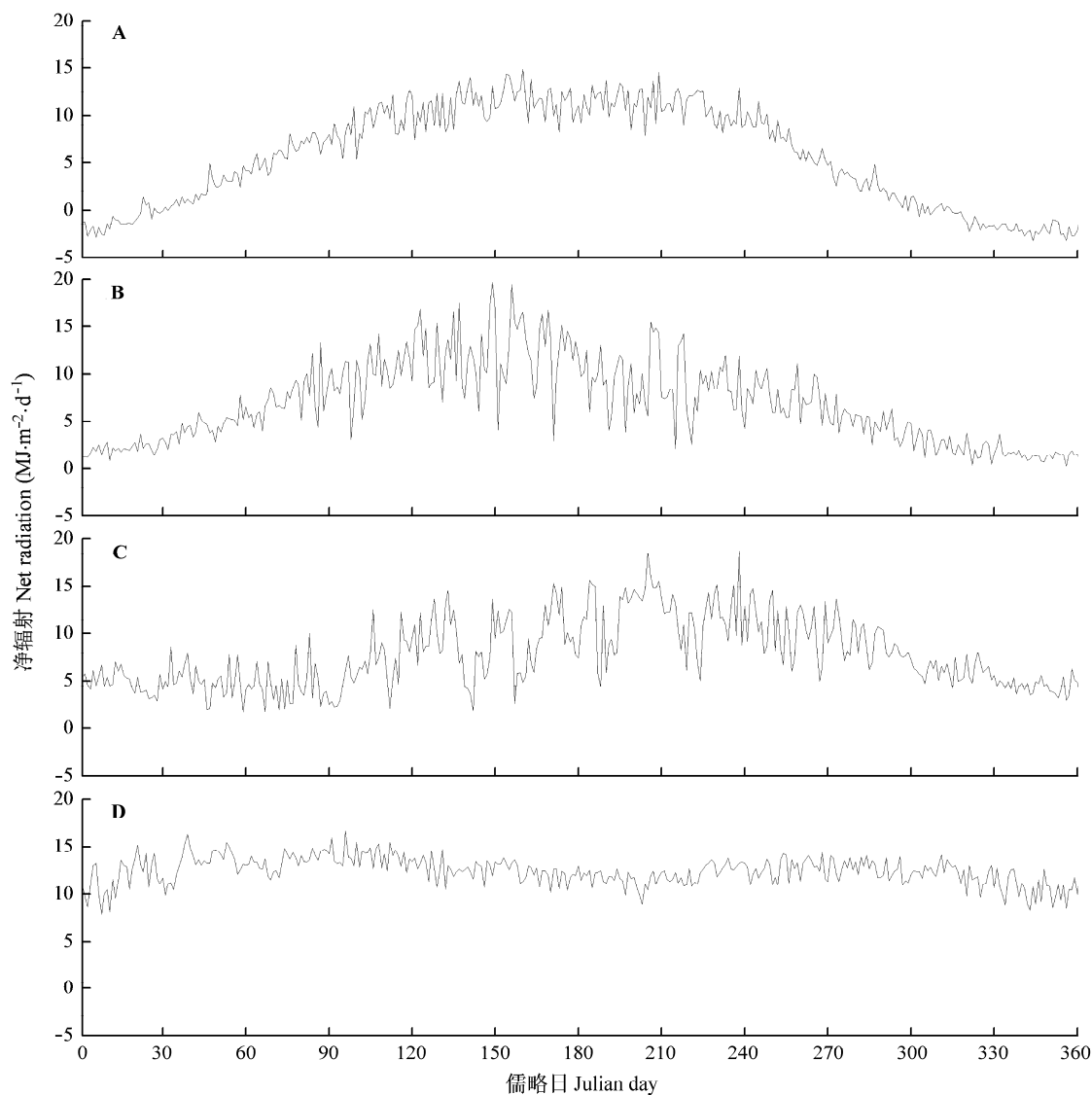


图3 各森林带典型森林冠层上方净辐射的年变化。A, SKT站数据, 代表北方针叶林。B, TMK站数据, 代表温带森林。C, DHS站数据, 代表亚热带森林。D, PSO站数据, 代表热带森林。每一个数据点是多年平均日总量值。站点信息见表1。  
Fig. 3 The annual cycle of net radiation above forest canopy across forest biomes. A, SKT for boreal forest. B, TMK for temperate forest. C, DHS for subtropical forest. D, PSO for tropical forest. Each value is the daily sum of multi-year means. Site information sees Table 1.

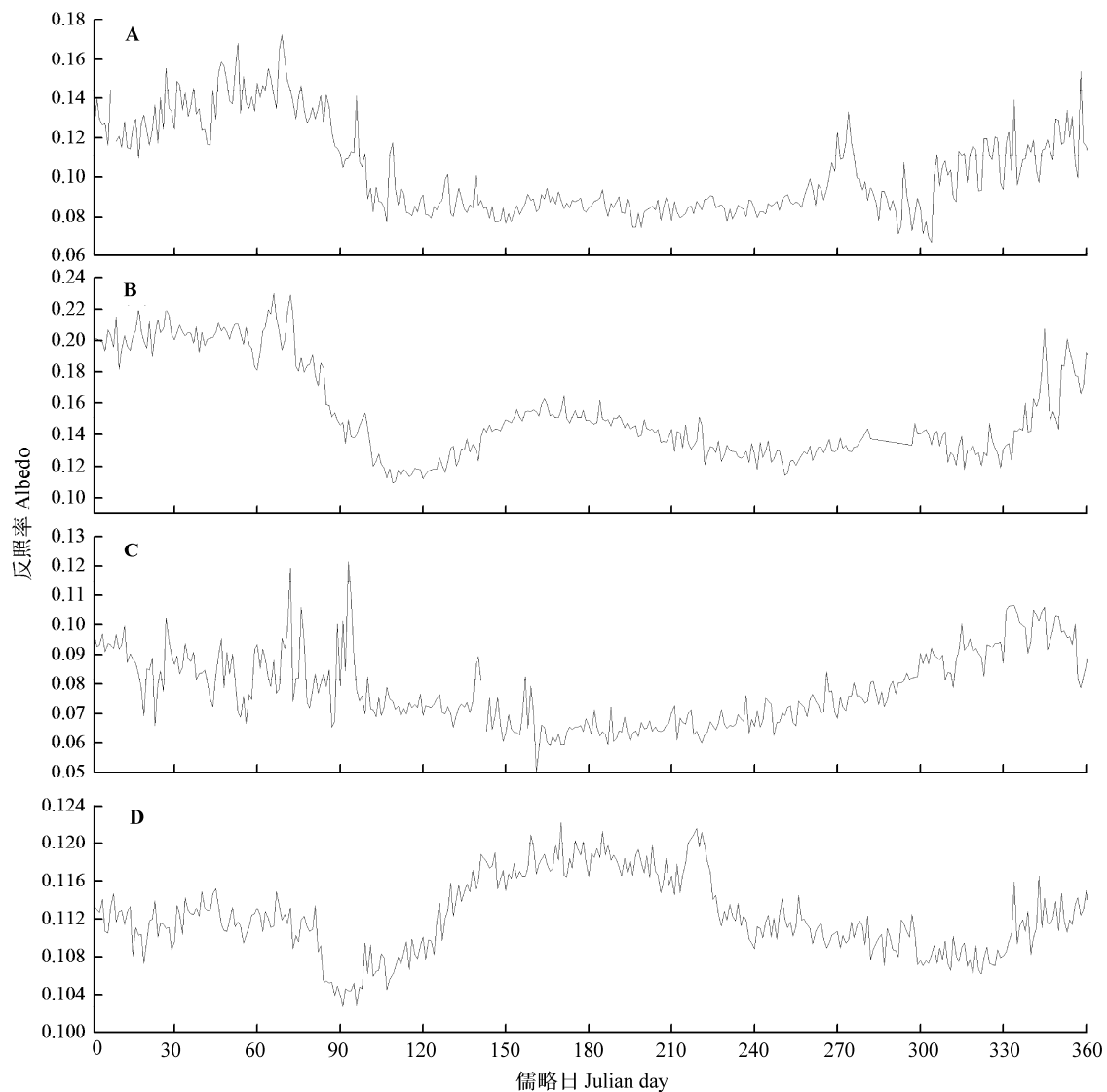
水量的上升, 蒸散比不断上升, 并达到饱和。可以用趋饱和的指数增长曲线来表述这种关系:  $y = 0.7138(1 - \exp(-0.0026x))(R^2 = 0.762\ 0, p < 0.001)$ 。根据该拟合关系, 蒸散比的理论最大值为0.7左右; 蒸散比的增量随着降水量的增加, 在未饱和阶段呈指数下降。我们未将CLM站的数据纳入回归分析, CLM的降雨为4 000 mm左右, 其中多数为台风带来的强降雨, 故未纳入。

2.5 各森林带典型的辐射和能量平衡模式

我们通过系综平均的方式, 得到各森林带的辐

射和能量平衡模式(模式按照 $R_n = R_n - S \uparrow - I \approx LE + H_s + G$ 的顺序排列):

- (1)北方森林(boreal forest):  
 $2002 = 4143 - 629 - 1512 \approx 1158 + 883 - 39$
- (2)温带森林(temperate forest):  
 $2775 = 4729 - 545 - 1409 \approx 1965 + 812 - 3$
- (3)亚热带森林(subtropical forest):  
 $2687 = 4192 - 361 - 1144 \approx 1719 + 991 - 23$
- (4)热带森林(tropical forest):  
 $4246 = 6273 - 787 - 1240 \approx 2763 + 1510 - 27$



**图4** 各森林带典型森林冠层上方反照率的年变化。**A**, SKT站数据, 代表北方针叶林。**B**, TMK站数据, 代表温带森林。**C**, DHS站数据, 代表亚热带森林。**D**, PSO站数据, 代表热带森林。每一个数据点是多年日平均值。站点信息见表1。  
**Fig. 4** The annual cycle of albedo above forest canopy across forest biomes. **A**, SKT for boreal forest. **B**, TMK for temperate forest. **C**, DHS for subtropical forest. **D**, PSO for tropical forest. Each value is the daily average of multi-year means. Site information sees Table 1.

### 3 讨论和结论

利用实测数据, 在区域尺度上分析森林的小气候, 属于新的尝试。区域上的综合分析, 站点的代表性非常重要。本研究选择的站点在纬度梯度上分布均匀, 森林类型、林龄、水分梯度和典型种等方面具有较好的代表性。虽然我们已收集了亚洲东部地区能够共享数据的17个森林站点的数据, 但是对于区域尺度上的分析来说, 站点数量还是太少。基于业已公开的数据, 通过分析, 我们归纳以下几点:

(1) 辐射特征量具有明显的纬度趋势。根据日-地

的几何关系, 理论上的太阳辐射量应该具有很强的纬度依赖性。但是, 实际到达林冠上方的太阳辐射往往受到云量等其他因素的影响, 比理论值有所偏离。这也显示在我们的数据上(图7A)。我们根据森林上方太阳辐射的实测数据, 预测理论上太阳辐射的最大值为6 205 MJ, 并且纬度每上升1°, 太阳辐射年总量下降42 MJ。这个关系式可以用来对亚洲东部的森林太阳辐射水平做初步的估计。比如, 根据该关系式, 我们预测西双版纳(21.95° N)和北京小龙门(39.97° N)分别为5 279 MJ和4 520 MJ, 这与实际监测值5 018 MJ (张一平等, 2005)和4 372 MJ (桑卫国



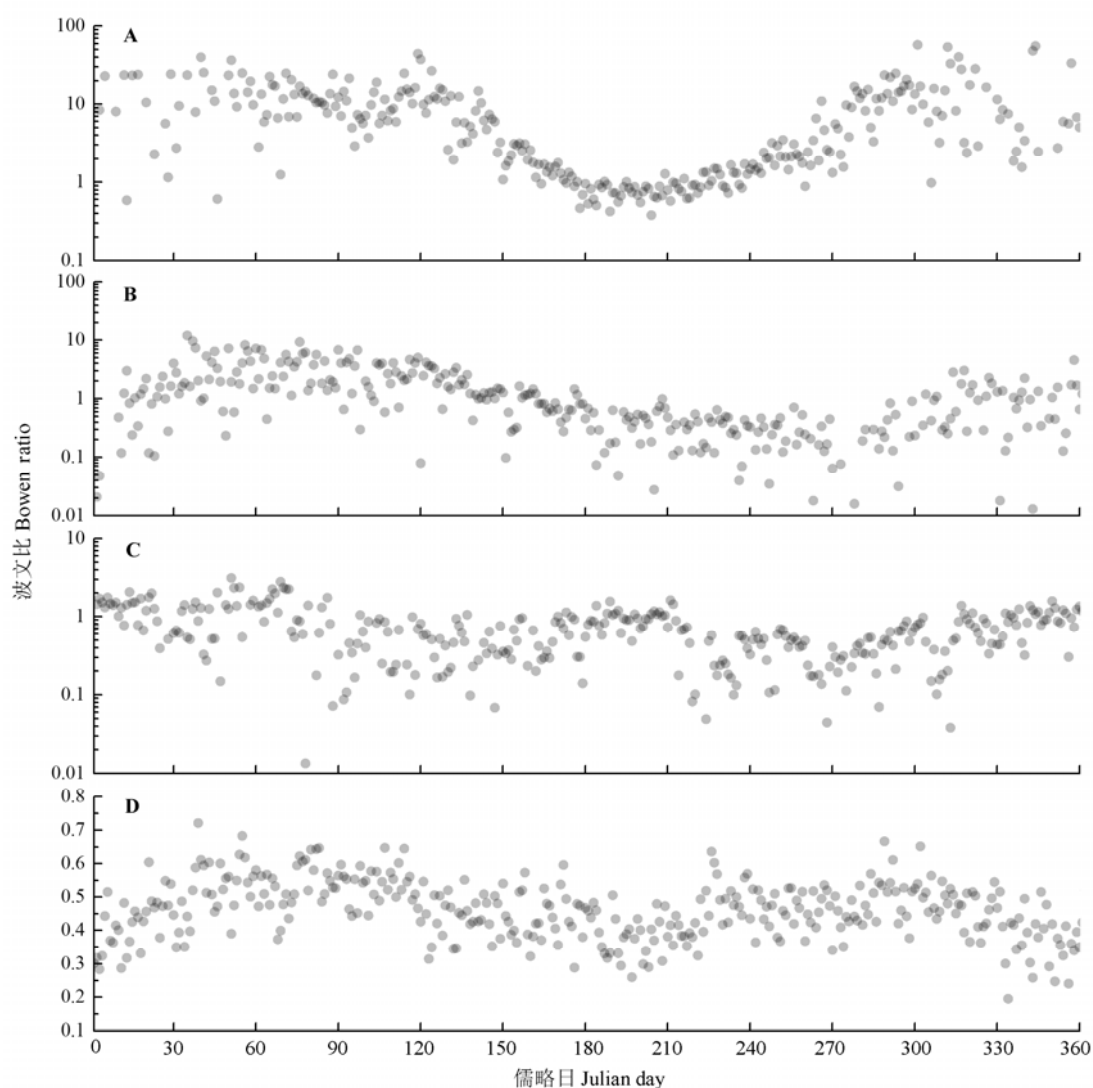


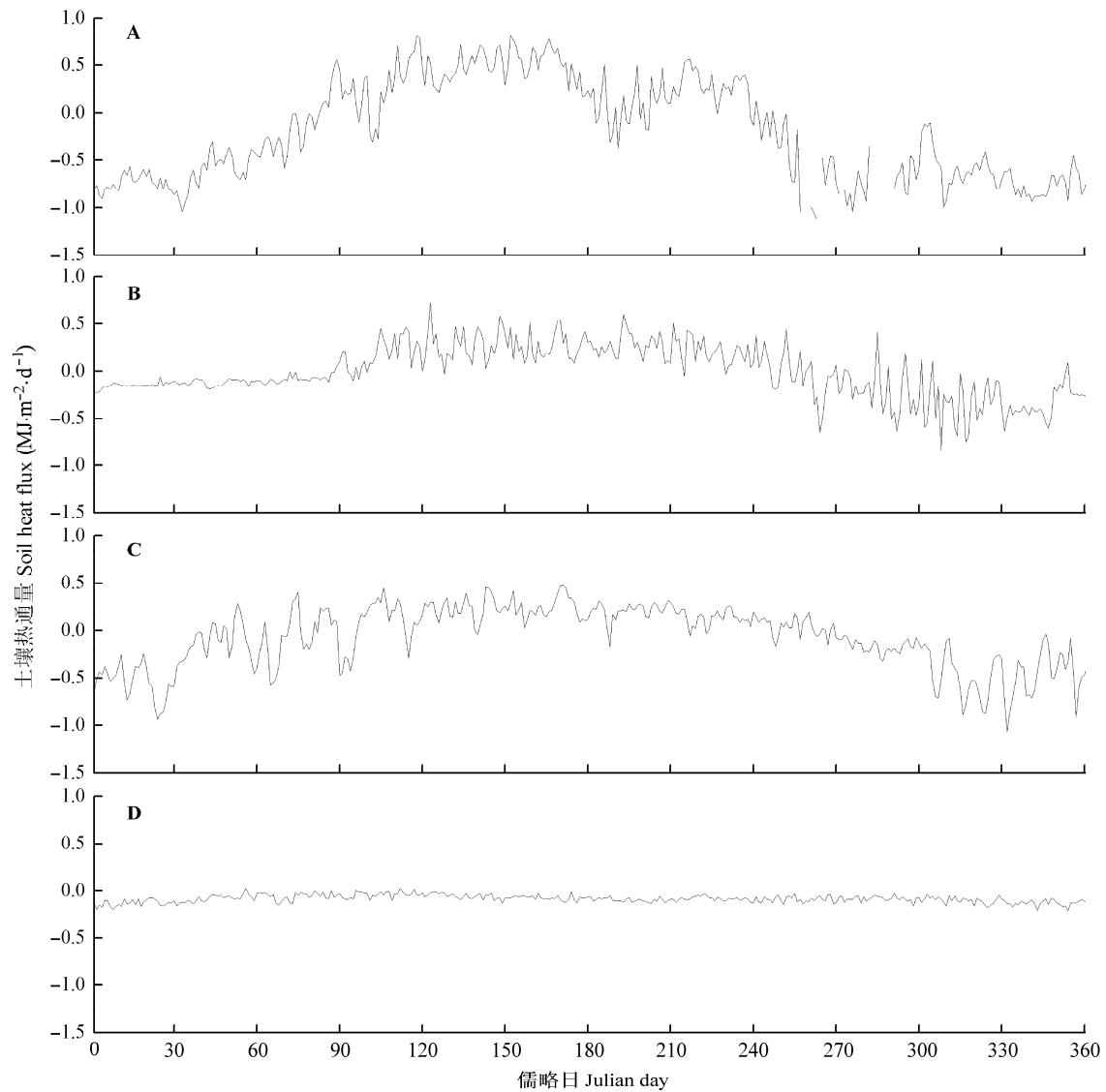
图5 各森林带典型森林波文比的年变化。A, SKT站数据, 代表北方针叶林。B, TMK站数据, 代表温带森林。C, DHS站数据, 代表亚热带森林。D, PSO站数据, 代表热带森林。每一个数据点是多年平均日均值。站点信息见表1。

**Fig. 5** The annual cycle of Bowen ratio above forest canopy across forest biomes. A, SKT for boreal forest. B, TMK for temperate forest. C, DHS for subtropical forest. D, PSO for tropical forest. Each value is the daily sum of multi-year means. Site information sees Table 1.

等, 2001)较为接近。类似地, 净辐射、反照率等亦可以根据所得的关系式作类似的预测。并且, 净辐射与纬度之间的相关性更高, 其预测的结果也更准确。反照率通常与地表的粗糙度、光学特性、太阳高度角等相关, 其空间变异具有较高的复杂性。我们这里得到的辐射-纬度关系可供森林遥感监测参考, 也可用于陆面模式的参数化。

(2)蒸散比和降水量之间的定量关系。地球吸收的能量中, 有一半是用于蒸发水汽(Trenberth *et al.*, 2009)。蒸散是联系能量平衡和水平衡的一个关键过程, 其全球格局和环境调控目前尚未完全清楚(Jung *et al.*, 2010)。而蒸散比(EF)是大尺度蒸散估算常涉及

的一个参量(Venturini *et al.*, 2008)。所以, 在区域尺度上分析和建立蒸散比与其他环境变量的关系, 是非常重要的一个内容。EF通常受到植被状况(Kustas *et al.*, 1993)、光合强度(Higuchi *et al.*, 2000)、饱和水汽压差(Higuchi *et al.*, 2000)、土壤含水量(Nutini *et al.*, 2014)等因素调控。但是, 在区域尺度上, EF和降水量(P)之间的定量关系讨论较少。我们利用实测数据建立了亚洲东部森林EF与P之间的定量关系(图8):  $EF = 0.7138(1 - \exp(-0.0026P))$ 。常用的函数关系式中, 相同参数数量时, 趋向饱和的指数增长关系式拟合结果最好。另外, 该式具有明显的生物地理学涵义。当P趋向无穷大时, (EF)趋向饱和值0.7138; 当P为



**图6** 各森林带典型森林土壤热通量的年变化。**A**, SKT站数据, 代表北方针叶林。**B**, TMK站数据, 代表温带森林。**C**, DHS站数据, 代表亚热带林。**D**, PSO站数据, 代表热带森林。每一个数据点是多年平均日总量值。站点信息见表1。  
**Fig. 6** The annual cycle of soil heat flux above forest canopy across forest biomes. **A**, SKT for boreal forest. **B**, TMK for temperate forest. **C**, DHS for subtropical forest. **D**, PSO for tropical forest. Each value is the daily average of multi-year means. Site information sees Table 1.

0时, 系统的水分输入中断, 蒸发散为0,  $EF$ 为0。该关系式的一元微分为:  $dEF/dP = 0.7138 \times 0.0026 \times \exp(-0.0026P)$ , 表明随着 $P$ 的增加,  $EF$ 的增量呈指数递减。

(3)各森林带典型的辐射和能量平衡模式。一般地, 对于一个典型的森林生态系统, 有多少太阳辐射能到达林冠上方, 其中有多少被转化为净辐射能, 这些净辐射能又在潜热、显热和土壤热通量之间怎么分配等等, 虽然都是关于生态系统运行的一些背景问题(或知识), 但是目前还缺少这方面的数据验证(或说明)。我们利用实测数据对这些问题进行了初步

回答(详见2.5)。亚热带常绿森林是亚洲东部广泛分布的十分发育的原生森林类型。这些森林的原生林主要分布在海拔较高、人迹罕至的深山老林中。由于海拔较高, 空气湿度大, 也常被冠以山地云雾林的称谓。近期, 通过跨森林带的比较, 亚热带森林被认为具有较强的碳汇强度(Yu *et al.*, 2014)。我们比较亚热带森林和温带森林发现, 亚热带森林林冠上方的太阳辐射和净辐射能皆低于温带森林。在数值上, 亚热带森林的辐射收支水平更接近温带森林, 而不是热带森林。亚热带的波文比(0.557)既高于温带森林(0.460), 也高于热带森林(0.537), 表明该森林有更

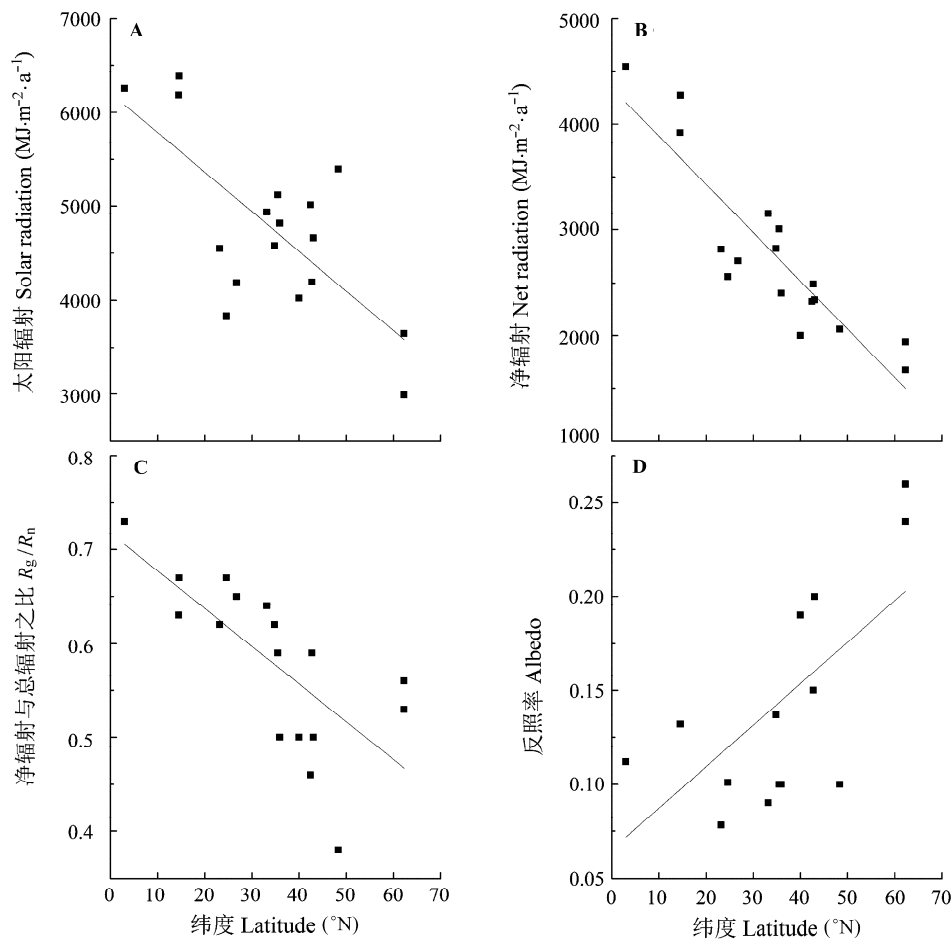


图7 森林辐射的纬度依赖性。A, 太阳辐射( $R_n$ )。B, 净辐射( $R_g$ )。C, 净辐射与太阳辐射的比值。D, 反照率。每一个数据点是年值。  
Fig. 7 The dependence of radiation on latitude. A, solar radiation ( $R_n$ ). B, net radiation ( $R_g$ ). C, ratio between net and solar radiation ( $R_g / R_n$ ). D, albedo. Each value in the plot represents the annual sums.

表2 各森林辐射和能量特征参数的总表  
Table 2 Summary of the forest radiation and energy properties

序号 No.	站点 Site	太阳辐射 Solar radiation ( $R_n$ ) ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )	反射辐射 Upward short- wave radiation ( $R_g$ ) ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )	净辐射 Net radiation ( $R_g$ ) ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )	有效辐射 Net longwave radiation losses ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )	土壤热通量 Soil heat flux ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )	反照率 Albedo	净辐射总 辐射比 $R_n/R_g$	波文比 Bowen ratio	蒸散比 Evapotranspiration fraction
1	YLF	2 988	400	1 675	913	—	0.26	0.56	1.26	0.44
2	YPF	3 645	571	1 941	1 133	—	0.24	0.53	—	—
3	SKT	5 397	537	2 060	2 800	−85	0.10	0.38	2.53	0.28
4	SAP	4 661	882	2 340	1 439	−10	0.20	0.50	0.27	0.78
5	TMK	4 197	625	2 490	1 082	−2	0.15	0.59	0.65	0.60
6	CBS	5 012	—	2 323	—	—	—	0.46	0.68	0.59
7	API	4 024	758	1 999	1 276	−22	0.19	0.50	0.28	0.77
8	KWG	4 813	482	2 401	1 930	−23	0.10	0.50	0.31	0.75
9	FJY	5 120	556	3 006	1 558	15	0.10	0.59	0.31	0.75
10	YMS	4 580	632	2 824	1 124	—	0.14	0.62	—	—
11	KHW	4 935	432	3 151	1 352	—	0.09	0.64	0.35	0.73
12	QYZ	4 189	—	2 707	—	—	—	0.65	0.43	0.69
13	CLM	3 834	373	2 559	902	−18	0.10	0.67	0.70	0.58
14	DHS	4 551	349	2 815	1 387	−28	0.08	0.62	0.54	0.65
15	MKL	6 380	845	4 273	1 262	−38	0.13	0.67	0.45	0.68
16	SKR	6 185	816	3 918	1 451	−15	0.13	0.63	0.70	0.58
17	PSO	6 255	701	4 547	1 007	−30	0.11	0.73	0.46	0.68

站点信息见表1。  
Site informations see Table 1.

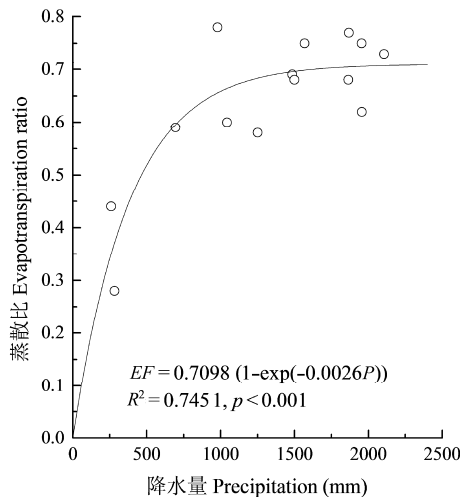


图8 蒸散比(EF)与降水量(P)之间的关系。其中CLM站的数据未包含在拟合曲线中。

**Fig. 8** Relationships between evapotranspiration fraction (EF) and precipitation (P). CLM site was not included in the regression.

多的净辐射能用于使温度产生变化的显热通量。关于亚热带森林在生态系统过程上的特异性及其机理,值得进一步的探讨,特别是在区域尺度上与其他森林类型的对比。

**基金项目** 国家自然科学基金(31200347)。

**致谢** 感谢ChinaFLUX、AsiaFLUX和FFPRI Flux-Net提供数据。

## 参考文献

- Baldocchi D (2014). Measuring fluxes of trace gases and energy between ecosystems and the atmosphere—The state and future of eddy covariance method. *Global Change Biology*, 20, 3600–3609.
- Baldocchi D, Falge E, Gu LH, Olson R, Hollinger D, Running S, Anthoni P, Bernhofer Ch, Davis K, Evans R, Fuentes J, Goldstein A, Katul G, Law B, Lee XH, Malhi Y, Meyers T, Munger W, Oechel W, Paw U KT, Pilegaard K, Schmid HP, Valentini R, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S (2001). FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of American Meteorological Society*, 82, 2415–2434.
- Campbell GS, Norman JM (1998). *An Introduction to Environmental Biophysics*. 2nd edn. Springer Press, New York, USA.
- Chapin III FS, Matson PA, Vitousek PM (2012). *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. 2nd edn. Springer Press, New York, USA.
- Chen JQ, Franklin JF, Spies TA (1993). Contrasting microclimates among clearcut, edge and interior of old-growth Douglas-fir forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 63, 219–237.
- Gamo M, Panuthai S, Maeda T, Toma T, Ishida A, Hayashi M, Warsudi, Dianna R, Diloksumpun S, Phnumard L, Stapporn D, Ishizuka M, Saigusa N, Kondo H (2005). Carbon flux observation in the tropical seasonal forests and tropical rain forest. In: *Proceedings of the International Workshop on Advanced Flux Network and Flux Evaluation (AsiaFlux Workshop 2005)*. Fujiyoshida, Japan, 86.
- Geiger R, Aron RH, Todhunter P (1965). *The Climate Near the Ground*. 4th edn. Das Klima Der Bodennahen Luftschicht, Braunschweig, German.
- Guan DX, Wu JB, Zhao XS, Han SJ, Yu GR, Sun XM, Jin CJ (2006). CO<sub>2</sub> fluxes over an old, temperate mixed forest in northeastern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 137, 138–149.
- Hamada S, Ohta T, Hiyama T, Kuwada T, Takahashi A, Maximov TC (2004). Hydrometeorological behavior of pine and larch forests in Eastern Siberia. *Hydrological Processes*, 18, 23–39.
- He QT (2001). *Chinese Forestry Meteorology*. Chinese Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [贺庆棠 (2001). 中国森林气象学. 中国林业出版社, 北京.]
- Higuchi A, Kondoh A, Kishi S (2000). Relationship among the surface albedo, spectral reflectance of canopy, and evaporative fraction at grassland and paddy field. *Advances in Space Research*, 26, 1043–1046.
- Hirano T, Hirata R, Fujinuma Y, Saigusa N, Yamamoto S, Harazono Y, Takada M, Inukai K, Inoue G (2003). CO<sub>2</sub> and water vapor exchange of a larch forest in northern Japan. *Tellus B*, 55, 244–257.
- Hong QF, Wang YZ, Wu SZ, Cao ZK, Huang JG, Liu HQ, Wang ZS, Wan ZH, Zhou BL (1963). The microclimate of *Pinus massoniana* forest. *Scientia Silvae Sinicae*, 8, 275–289. (in Chinese with English abstract) [洪启法, 王仪洲, 吴淑贞, 曹仲恺, 黄建国, 刘怀杞, 王志胜, 宛志沪, 周本琳 (1963). 马尾松幼林小气候. 林业科学, 8, 275–289.]
- Jung M, Reichstein M, Ciais P, Seneviratne SI, Sheffield J, Goulden ML, Bonan G, Cescatti A, Chen JQ, De Jeu R, Dolman AJ, Eugster W, Gerten D, Gianelle D, Gobron N, Heinke J, Kimball J, Law BE, Montagnani L, Mu QZ, Mueller B, Oleson K, Papale D, Richardson AD, Rouspard O, Running S, Tomelleri E, Viovy N, Weber U, Williams C, Wood E, Zaehle S, Zhang K (2010). Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. *Nature*, 467, 951–954.
- Kitamura K, Nakai Y, Suzuki S, Ohtani Y, Yamanoi K, Sakamoto T (2012). Interannual variability of net ecosystem production for a broadleaf deciduous forest in Sapporo, northern Japan. *Journal of Forest Research*, 17, 323–332.
- Kominami Y, Jomura M, Dannoura M, Goto Y, Tamai K, Miyama T, Kanazawa Y, Kaneko S, Okumura M, Misawa N, Hamada S, Sasaki T, Kimura H, Ohtani Y (2008). Biometric

- and eddy-covariance-based estimates of carbon balance for a warm-temperate mixed forest in Japan. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148, 723–737.
- Kosugi Y, Takanashi S, Ohkubo S, Matsuo N, Tani M, Mitani T, Tsutsumi D, Nik AR (2008). CO<sub>2</sub> exchange of a tropical rainforest at Pasoh in Peninsular Malaysia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148, 439–452.
- Kustas WP, Schmugge TJ, Humes KS, Jackson TJ, Parry R, Weltz MA, Moran MS (1993). Relationships between evaporative fraction and remotely sensed vegetation index and microwave brightness temperature for semiarid rangelands. *Journal of Applied Meteorology*, 32, 1781–1790.
- Lee XH, Goulden ML, Hollinger DY, Barr A, Black TA, Bohrer G, Bracho R, Drake B, Goldstein A, Gu LH, Katul G, Kolb T, Law BE, Margolis H, Meyers T, Monson R, Munger W, Oren R, Paw U KT, Richardson AD, Schmid HP, Staebler R, Wofsy S, Zhao L (2011). Observed increase in local cooling effect of deforestation at higher latitudes. *Nature*, 479, 384–387.
- Li SG, Asanuma J, Kotani A, Eugster W, Davaa G, Oyunbaatar D, Sugita M (2005). Year-round measurements of net ecosystem CO<sub>2</sub> flux over a montane larch forest in Mongolia. *Journal of Geophysical Research*, 110, D09303, doi: 10.1029/2004JD005453.
- Mildenberger K, Beiderwieden E, Hsia Y-J, Klemm O (2009). CO<sub>2</sub> and water vapor fluxes above a subtropical mountain cloud forest—The effect of light conditions and fog. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 1730–1736.
- Mizoguchi Y, Ohtani Y, Takanashi S, Iwata H, Yasuda Y, Nakai Y (2012). Seasonal and interannual variation in net ecosystem production of an evergreen needleleaf forest in Japan. *Journal of Forest Research*, 17, 283–295.
- Nutini F, Boschetti M, Candiani G, Bocchi S, Brivio PA (2014). Evaporative fraction as an indicator of moisture condition and water stress status in semi-arid rangeland ecosystems. *Remote Sensing*, 6, 6300–6323.
- Ohta T, Maximov TC, Dolman AJ, Nakai T, van der Molen MK, Kononov AV, Maximov AP, Hiyama T, Iijima Y, Moors EJ, Tanaka H, Toba T, Yabuki H (2008). Interannual variation of water balance and summer evapotranspiration in an eastern Siberian larch forest over a 7-year period (1998–2006). *Agricultural and Forest Meteorology*, 148, 1941–1953.
- 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.
- Saigusa N, Li SG, Kwon H, Takagi K, Zhang LM, Ide R, Ueyama M, Asanuma J, Choi YJ, Chun JH, Han SJ, Hirano T, Hirata R, Kang M, Kato T, Kim J, Li YN, Maeda T, Miyata A, Mizoguchi Y, Murayama S, Nakai Y, Ohta T, Saitoh TM, Wang HM, Yu GR, Zhang YP, Zhao FH (2013). Dataset of CarboEastAsia and uncertainties in the CO<sub>2</sub> budget evaluation caused by different data processing. *Journal of Forest Research*, 18, 41–48.
- Sang WG, Zheng Y, Zhang DQ (2001). Research on radiation flux dynamics of canopy surface in warm temperate zone deciduous broadleaved forests. *Journal of Northeast Forestry University*, 29(3), 40–43. (in Chinese with English abstract) [桑卫国, 郑豫, 张德全 (2001). 暖温带落叶阔叶林林冠层表面辐射通量动态与特点. 东北林业大学学报, 29(3), 40–43.]
- Shimizu A, Shimizu T, Miyabuchi Y, Ogawa Y (2003). Evapotranspiration and runoff in a forest watershed, western Japan. *Hydrological Processes*, 17, 3125–3139.
- Trenberth KE, Fasullo JT, Kiehl J (2009). Earth's global energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90, 311–323.
- Venturini V, Islam S, Rodriguez L (2008). Estimation of evaporative fraction and evapotranspiration from MODIS products using a complementary based model. *Remote Sensing of Environment*, 112, 132–141.
- Wofsy SC, Goulden ML, Munger JW, Fan SM, Bakwin PS, Daube BC, Bassow SL, Bazzaz FA (1993). Net exchange of CO<sub>2</sub> in a mid-latitude forest. *Science*, 260, 1314–1317.
- Yasuda Y, Saito T, Hoshino D, Ono K, Ohtani Y, Mizoguchi Y, Morisawa T (2012). Carbon balance in a cool-temperate deciduous forest in northern Japan: Seasonal and interannual variations, and environmental controls of its annual balance. *Journal of Forest Research*, 17, 253–267.
- Yasuda Y, Watanabe T (2001). Comparative measurements of CO<sub>2</sub> flux over a forest using closed-path and open-path CO<sub>2</sub> analysers. *Boundary-Layer Meteorology*, 100, 191–208.
- Yu GR, Chen Z, Piao SL, Peng CH, Ciais P, Wang QF, Li XR, Zhu XJ (2014). High carbon dioxide uptake by subtropical forest ecosystems in the East Asian monsoon region. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111, 4910–4915.
- Yu GR, Zhang LM, Sun XM, Fu YL, Wen XF, Wang QF, Li SG, Ren CY, Song X, Liu YF, Han SJ, Yan JH (2008). Environmental controls over carbon exchange of three forest ecosystems in eastern China. *Global Change Biology*, 14, 2555–2571.
- Zhang YP, Dou JX, Yu GR, Zhao SJ, Song QH, Sun XM (2005). Characteristics of solar radiation and its distribution above the canopy of tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, Southwest China. *Journal of Beijing Forestry University*, 27(5), 17–25. (in Chinese with English abstract) [张一平, 窦军霞, 于贵瑞, 赵双菊, 宋清海, 孙晓敏 (2005). 西双版纳热带季节雨林太阳辐射特征研究. 北京林业大学学报, 27(5), 17–25.]

责任编辑: 朱教君 责任编辑: 李 敏