

穆松宁, 周广庆. 2015. 欧亚北部冬季增雪“影响”我国夏季气候异常的机理研究: 欧洲冬季增雪的重要作用 [J]. 大气科学, 39 (3): 611–633, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1408.14163. Mu Songning, Zhou Guangqing. 2015. Mechanism for the correlation of winter fresh snow extent over northern Eurasia and summer climate anomalies in China: The important role of Eurasian winter fresh snow extent [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (3): 611–633.

欧亚北部冬季增雪“影响”我国夏季气候异常的 机理研究：欧洲冬季增雪的重要作用

穆松宁^{1,2} 周广庆^{1,2}

1 中国科学院大气物理研究所信息科学中心, 北京 100029

2 中国科学院大气物理研究所大气科学和流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

摘 要 在作者前期研究(穆松宁和周广庆, 2012)的基础之上, 本文主要利用了 EOF 分析和相关分析, 对欧亚北部冬季新增雪盖面积 (Total Fresh Snow Extent, 记为 T_{FSE}) 与我国夏季气候异常之间“隔季相关”的机理进行了更进一步的探讨, 主要目的在于寻找 T_{FSE} 气候效应的冬季增雪面积关键区。结果表明, 虽然欧洲中纬冬季增雪面积 (文中均以 T_{FSE-1} 表示) 与我国夏季气候异常的关系不很显著, 但其变化维系了上述“隔季相关”的物理途径, 其变化对 T_{FSE} 的气候效应而言起关键作用, 但是, 亚洲中纬冬季增雪面积 (文中均以 T_{FSE-2} 表示) 的贡献尚不清楚; 另外, 对 T_{FSE} 的气候效应而言, 起作用的实际上是欧亚中纬冬季增雪面积 (文中均以 $T_{FSE-1-2}$ 表示), 其不但与我国夏季气候异常具有更显著的“隔季相关”, 而且这种“隔季相关”还具有和 T_{FSE} 非常相似的、但更为清晰的物理途径, 因此, 在气候预测的意义上, $T_{FSE-1-2}$ 可替代 T_{FSE} 。

关键词 物理机制 冬季增雪 欧洲中纬区 陆—气相互作用 季节演变

文章编号 1006-9895(2015)03-0611-23

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1408.14163

Mechanism for the Correlation of Winter Fresh Snow Extent over Northern Eurasia and Summer Climate Anomalies in China: The Important Role of Eurasian Winter Fresh Snow Extent

MU Songning^{1,2} and ZHOU Guangqing^{1,2}

1 Information Science Center, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Based on previous studies (Mu and Zhou, 2012), the linkage mechanism between winter northern Eurasian total fresh snow extent (T_{FSE}) and subsequent summer climate anomalies in China is investigated in depth using empirical orthogonal function (EOF) and correlation analysis, with the primary purpose of finding the key region of fresh snow extent over northern Eurasia. The results show that the correlation between mid-latitude fresh snow extent in Europe (T_{FSE-1}) and subsequent summer climate anomalies in China is unremarkable. However, T_{FSE-1} variability supports the physical mechanism for T_{FSE} summer climate correlation. Thus, T_{FSE-1} provides a crucial influence on the climatic effects of T_{FSE} . The role of mid-latitude fresh snow extent in Asia (T_{FSE-2}) is unknown. However, winter fresh snow extent in

收稿日期 2014-04-08; 网络预出版日期 2015-09-10

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2010CB951901, 国家自然科学基金项目 41105049、41105057

作者简介 穆松宁, 女, 1972 年出生, 博士, 研究方向: 气候诊断。E-mail: musongning@mail.iap.ac.cn

Eurasian middle-latitude regions ($T_{\text{FSE-1-2}}$), which significantly affects the summer climate in China, dominates climatic effects of T_{FSE} because the correlation between $T_{\text{FSE-1-2}}$ and the summer climate in China has a clearer physical mechanism than the correlation between T_{FSE} and the summer climate, which suggests that $T_{\text{FSE-1-2}}$ could replace T_{FSE} in climate forecasts.

Keywords Physical mechanism, Winter fresh snow extent, Mid-latitude area in Europe, Land-atmosphere interaction, Anomalies of seasonal evolvemments

1 引言

积雪作为东亚气候异常的重要影响因子, 其与我国气候异常的关系一直备受关注, 相对而言, 大部分研究集中在青藏高原积雪与我国夏季降水异常的关系上(如, 陈烈庭和阎志新, 1979; 陈烈庭, 1998; 韦志刚等, 1998; 张顺利, 1999; 陈乾金等, 2000; Wu and Qian, 2003; 郑益群等, 2000; Zhao et al., 2005; 彭京备等, 2005; 朱玉祥和丁一汇, 2007; 朱玉祥等, 2007; 丁锋等, 2009), 近年来, 随着积雪卫星资料的释放, 欧亚大陆积雪与我国夏季降水的关系也逐渐成为研究热点(Yang and Xu, 1994; 陈兴芳和宋文玲, 2000; Ye and Bao, 2005; Wu and Kirtman, 2007; Wu et al., 2009; 杨琨和武炳义, 2009; 左志燕等, 2011; 左志燕和张人禾, 2012; 许立言和武炳义, 2012a, 2012b, 2012c)。这些研究成果对于东亚季风气候异常的机理研究和我国短期气候预测而言都具有十分重要的价值。但是, 已有工作仍然存在一些不足, 第一, 不少工作将欧亚大陆北部和青藏高原的积雪作为一个整体来研究积雪—气候关系, 而这两个区域的积雪变化特点明显不同(Yasunari et al., 1991; Fasullo, 2004); 第二, 在短期气候预测的意义上, 冬季积雪与我国夏季气候异常的关系必然受到更多关注, 但大部分相关工作是以冬季平均积雪作为研究对象, 研究表明(穆松宁和周广庆, 2009), 就平均而言, 欧亚北部冬季雪盖面积主要来源于秋、冬两季降雪的贡献(尤其是秋季降雪贡献), 这些不同季节来源积雪的气候效应是不同的, 用季节平均积雪指数会抹杀其间的差异; 第三, 在冬季积雪与我国夏季气候异常的“隔季相关”研究中, 机理研究相当缺乏, 这就使得这些积雪指标在短期气候预测业务中不宜被应用, 当然, 这类研究一直以来都是难点。

基于以上考虑, 穆松宁和周广庆(2009)定义了欧亚北部冬季新增雪盖面积(Total Fresh Snow Extent, T_{FSE}), 穆松宁和周广庆(2010)的研究表明, T_{FSE} 与我国夏季气候异常存在显著的“隔季相

关”, 当冬季 T_{FSE} 偏大时, 夏季东亚中纬区易盛行异常冷低压, 受其影响, 内蒙古东部和东北西部易出现冷夏, 同时, 东亚副热带西风急流增强, 西太平洋副热带高压易加强且西伸和北扩, 江南地区在副高的控制下易干热; 冬季 T_{FSE} 偏小时的情况相反。进一步研究表明, 这种“隔季相关”具有比较合理的物理途径(穆松宁和周广庆, 2012): 在欧亚北部大范围变化的角度上来看, T_{FSE} 偏大有利于积雪—冻土由南向北、自西向东的大范围融化进程的减慢, 因此, 到了夏季, 东亚中高纬各陆面要素发生显著异常(包括: 积雪—冻土融化异常强烈、土壤温度明显偏低), 分析表明, 恰恰就是这种陆面异常导致了东亚夏季大气环流发生一系列显著异常, 进而间接影响了我国夏季气候异常。总的来说, 强烈的陆—气相互作用对 T_{FSE} 气候效应而言非常关键, 其中, 陆面对大气的影晌相对更主动。

但是, 欧亚大陆北部地域广阔、地理条件复杂, 其不同区域冬季增雪面积的变化特点必然存在差异, 对 T_{FSE} 气候效应的贡献也应不同。那么, 对于 T_{FSE} 的气候效应而言, 其是否存在一个贡献相对重要的冬季增雪的关键区? 基于这个考虑, 本文首先考察了欧亚北部冬季增雪面积 EOF 主要模态及其与我国夏季气候异常的关系, 这在一方面可将欧亚大陆北部大致划分成 2~3 个增雪面积变化特点各不相同的区域, 在另一方面也可以了解各区域冬季增雪面积分别与我国夏季气候异常的关系; 进一步, 本文还利用相关分析及合成分析, 考察了不同区域冬季增雪面积分别与各陆面要素、与大气环流关系的季节演变特点, 期望能寻找到对“隔季相关”物理途径具有重要贡献的冬季增雪关键区。

另外, 根据穆松宁和周广庆(2012)的研究结果, T_{FSE} “影响”我国夏季气候异常的物理途径可简单概括为: ①冬季 T_{FSE} → ②春季大范围融雪进程异常 → ③夏季东亚中高纬陆面异常 → ④东亚夏季大气环流异常 → ⑤我国夏季气候异常。而李震坤等(2009)的数值实验结果表明, 欧亚大范围春季积雪异常通过春季冷却效应及其后夏季的水文效应

激发出夏季欧亚大陆自西向东的异常波列，其中，欧亚春季积雪偏多时夏季贝加尔湖以东地区的异常低压[李震坤等(2009)的图 5b]非常有利于我国夏季出现南涝北旱。这一结论充分支持了②~⑤这部分结果，许立言和武炳义(2012a)、Wu et al.

(2009)的诊断结果也和这部分结论一致。那么， T_{FSE} 是如何影响欧亚春季大范围的融雪进程(即①~②部分内容)的呢？这也是本文希望探讨的问题。

2 资料和指数

(1) 积雪资料：采用了美国冰雪资料中心(The National Snow and Ice Data Center)提供的近 41 年(1967~2007 年)的 25 km 等面积网格卫星反演的北半球逐周雪盖资料(Armstrong and Brodzik, 2007)以及相同空间分辨率的近 29 年(1979~2007 年)的雪水当量(Snow Water Equivalent, SWE)月平均卫星资料。其中，雪盖资料被处理成 1° (纬度) \times 1° (经度)和 $2^\circ \times 2^\circ$ 的逐月数据，SWE 资料则被处理成 $1^\circ \times 1^\circ$ 的月平均数据。在此需要说明，虽然 SWE 能更好地描述积雪变化，但该资料缺测较多，所以本文仅将其作为辅助性研究使用。

(2) 土壤温度资料：采用了水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的 ERA40 逐月再分析资料(1967~2002 年)，该资料按深度共分为四层：0~7 cm、7~28 cm、28~100 cm 和 100~289 cm。另外，利用该土壤温度资料，通过线性内插得到零度线所在最浅深度，将其作为大致的冻土深度，当表层土壤温度不高于零度时，冻土深度为 0 cm，若冻土深度超出本资料涉及深度范围(0~289 cm)则设为缺测(穆松宁和周广庆, 2012)。需要特别说明，这种对于冻土的相关定义必然存在较大误差，因此本文对冻土所进行的简单分析仅作为针对其他陆面要素的辅助性分析。

(3) 气温、降水、大气环流资料：采用国家气候中心提供的 160 个台站的气温和降水观测数据，高空环流场采用水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的 NCEP/NCAR 月平均再分析数据(Kalnay et al., 1996)。

(4) 欧亚北部冬季新增雪盖面积 T_{FSE} 的定义为：每年的冬季末月与其前秋末月欧亚大陆亚北部[图 1 中红色框区(40°N 以北，10°E~140°E)]的雪盖面积之差(穆松宁, 2008; 穆松宁和周广庆, 2009); 将每一经纬网格上的冬季新增积雪面积、春季融雪面积简称为 A_{FSE} (Area of Fresh Snow Extent)，相应

地，增/融积雪覆盖率简称为 P_{FSE} (Percentage of Fresh Snow Extent)。另外，积雪覆盖率简称 P_{SE} (Percentage of Snow Extent)，春夏季逐月融雪面积定义为：上月与该月的积雪覆盖率之差(穆松宁和周广庆, 2009)。

(5) 图 1 中红 [(40°N~54°N, 10°E~40°E) 和 (40°N~48°N, 40°E~60°E)]、蓝 [(40°N~48°N 和 60°E~102°E) 和 (40°N~54°N 和 102°E~128°E)] 阴影区的冬季增雪面积分别定义为欧洲中纬冬季增雪面积 T_{FSE-1} 、亚洲中纬冬季增雪面积 T_{FSE-2} ；红、蓝阴影之合并区的冬季增雪面积则定义为欧亚中纬冬季增雪 $T_{FSE-1-2}$ 。

(6) 将各积雪指数的标准化值大于 0.5 (小于 -0.5) 的年份定义为其大值 (小值) 年。

3 EOF 第一模态 (EOF1)、第二模态 (EOF2) 关键区与我国夏季气候异常的关系

3.1 EOF1 关键区的冬季增雪面积变化 (欧洲中纬冬季增雪面积变化)

图 2a 首先给出了欧亚北部冬季增雪面积 A_{FSE} 距平场的 EOF 第一模态 (方差贡献为 20.3%) 的空间分布，其表现为东西向的反位相变化，其中尤以 55°N 以南的欧洲冬季增雪面积变化 (图 2a 中的框

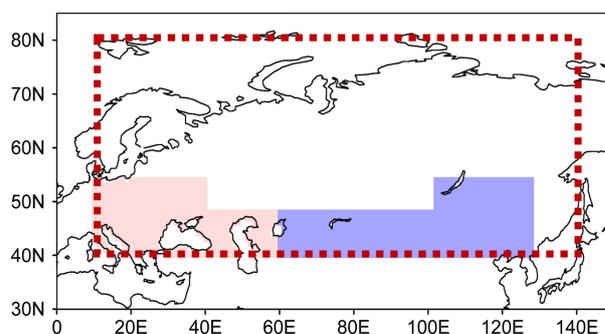


图 1 欧亚北部冬季增雪面积分区示意：红色点线框区 (40°N 以北，10°E~140°E) 中的陆地区为欧亚北部；红 [(40°N~54°N, 10°E~40°E) 和 (40°N~48°N, 40°E~60°E)]、蓝 [(40°N~48°N 和 60°E~102°E) 和 (40°N~54°N 和 102°E~128°E)] 阴影区分别为欧洲、亚洲中纬区；红、蓝阴影之合并区为欧亚中纬区

Fig. 1 Division map of winter fresh snow extent over northern Eurasia: the land in red-dotted box is defined as northern Eurasia (the north of 40°N, 10°E~140°E), the red [(40°N~54°N, 10°E~40°E) and (40°N~48°N, 40°E~60°E)] and blue [(40°N~48°N, 60°E~102°E), (40°N~54°N, 102°E~128°E)] shaded regions are defined as mid-latitude areas for Europe and Asia, respectively, the red-blue combined region is defined as mid-latitude area for Eurasia

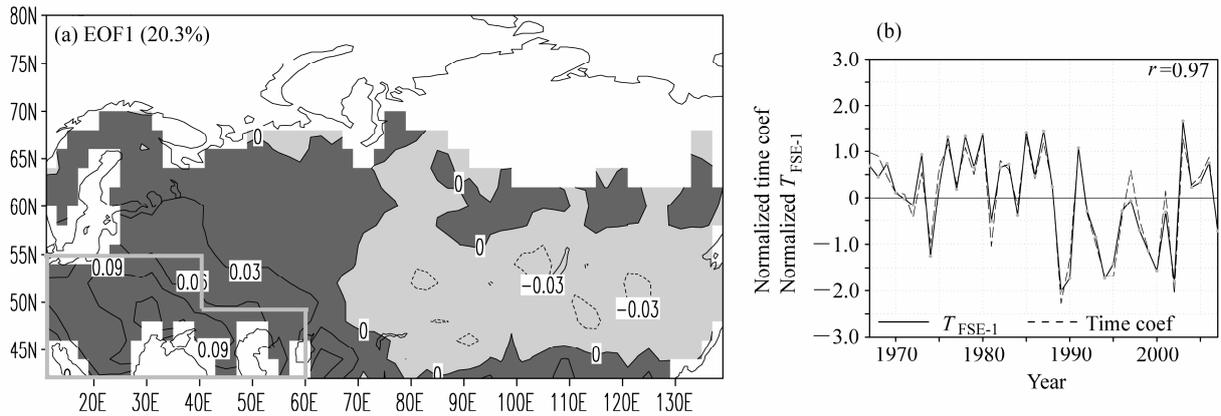


图 2 (a) 1967~2007 年冬季 A_{FSE} 距平场 EOF1 模态、(b) 其时间系数 (虚线) 和该模态关键区冬季增雪面积 T_{FSE-1} (实线) 标准化时间序列 (r 表示两者的相关系数)。图中框区 (即为图 1 中红色阴影区 [(40°N~54°N, 10°E~40°E) 和 (40°N~48°N, 40°E~60°E)] 为 EOF1 模态关键区
Fig. 2 (a) The first EOF mode (EOF1) for winter A_{FSE} (Area of Fresh Snow Extent) anomalies and (b) the corresponding normalized principal component (dashed line) and T_{FSE-1} (solid line) for the period 1967~2007 (r represents their correlation). The key regions [(40°N~54°N, 10°E~40°E) and (40°N~48°N, 40°E~60°E)] for the EOF1 are framed in Fig. 2a

区, 也即图 1 中的红色阴影区, 该区冬季增雪面积为 T_{FSE-1} 更明显。经计算, T_{FSE-1} 与 EOF1 时间系数的相关系数高达 0.97 (图 2b), 这说明 EOF1 模态可用来代表欧洲中纬冬季增雪面积 T_{FSE-1} 的变化。因此, 图 3 进一步给出了 T_{FSE-1} 与我国夏季降水量的相关系数分布, 发现, 两者关系整体上并不十分显著, 淮河流域 (江南地区) 为其正 (负) 相关区, 江南地区有四个显著负相关台站, 另外西南东部和新疆北部有五个显著相关台站。由于 T_{FSE-1} 与 T_{FSE} 的相关系数可达到 0.68 (信度水平超过 99.9%), 因此, 将图 3 与 T_{FSE} 与我国夏季降水的相关 [穆松宁和周广庆 (2010) 的图 1] 进行对比后发现, 两者的相关系数符号的空间分布型极为相似, 另外, 其显著负相关台站都主要分布在江南地区。这在一定程度上说明, 就 T_{FSE} 与我国夏季降水的显著相关而言, T_{FSE-1} 的变化很可能具有一定贡献。

3.2 EOF2 关键区冬季增雪面积变化 (亚洲中纬冬季增雪面积变化)

第二模态 (方差贡献为 12.6%) 的空间分布也表现出一定的东西反位相变化, 但其更主要的表现为 55°N 以南的亚洲中纬冬季增雪面积变化 (图 4a 中框区, 也即图 1 中的蓝色阴影区, 该区冬季增雪面积为 T_{FSE-2}), T_{FSE-2} 与 EOF2 时间系数的相关高达 0.98, 即, 图 4a 中框区为 EOF2 模态的关键区。由 T_{FSE-2} 与我国夏季降水的相关系数分布 (图 5) 可见, 其显著负相关区主要分布于江南 (15 个显著负相关台站), 内蒙古东部和东北、西南东部等地区

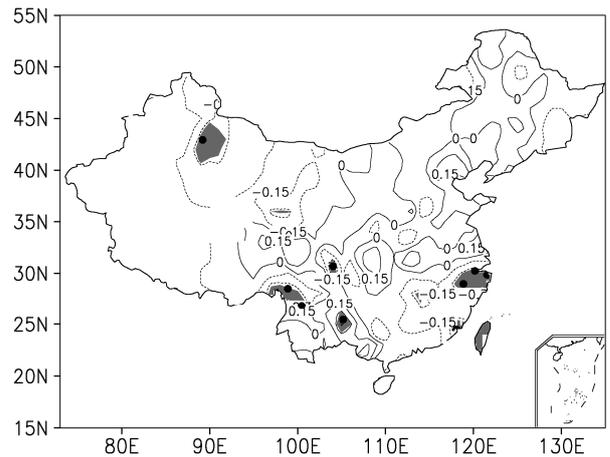


图 3 欧洲中纬冬季增雪面积 T_{FSE-1} 与中国夏季降水的相关系数分布。图中阴影区相关系数通过 95% 信度检验, 黑点为相关系数通过 95% 信度检验的观测站分布
Fig. 3 Correlation of T_{FSE-1} and summer rainfall in China for the period 1967~2007. Shaded regions are above the 95% confidence level, where the black dots indicate the observation stations

也分布有 6 个显著相关台站, 淮河流域为其正相关区, 但不显著。很明显, 无论在与我国夏季降水的相关系数分布型上还是在其显著相关区分布上, T_{FSE-2} 、 T_{FSE} 都是非常相似的, 即, 两者与我国夏季降水具有十分类似的相关关系。经计算, T_{FSE-2} 与 T_{FSE} 的相关系数高达 0.59 (信度水平超过 99.9%), 这说明亚洲中纬冬季增雪面积 T_{FSE-2} 对“ T_{FSE} 与我国夏季降水的关系”可能也具有一定程度的贡献。

通过以上对 EOF1、EOF2 相应关键区冬季增雪

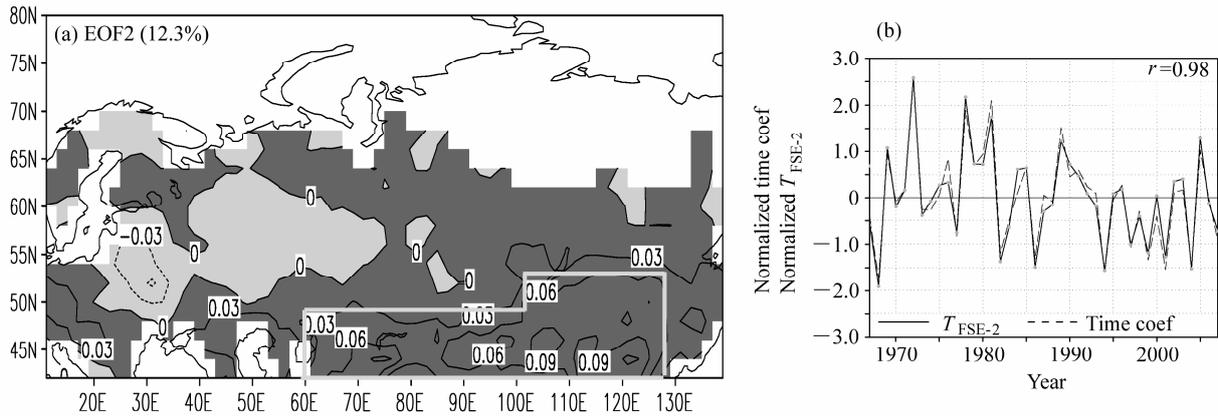


图 4 同图 2，但为 EOF2 的情况。图中框区（即为图 1 中蓝色阴影区：[(40°N~48°N, 60°E~102°E) 和 (40°N~54°N, 102°E~128°E)] 为 EOF2 模态关键区

Fig. 4 Same as Fig. 2, but for the second EOF mode (EOF2). The box in the figure (blue region in Fig. 1: [(40°N~48°N, 60°E~102°E) and (40°N~54°N, 102°E~128°E)]) is the key region for EOF2

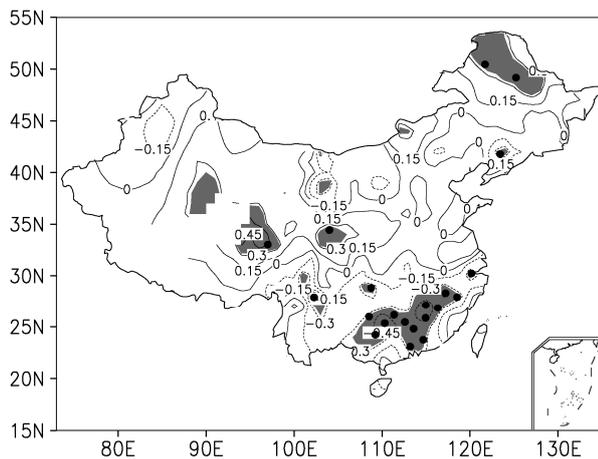


图 5 亚洲中纬冬季增雪面积 T_{FSE-2} 与中国夏季降水的相关系数分布。其余同图 3

Fig. 5 Correlation of T_{FSE-2} and rainfall in summer in China, others are the same as Fig. 3

面积变化与我国夏季降水的关系的分析可发现：第一， T_{FSE-1} 、 T_{FSE-2} 与我国夏季降水的关系都与 T_{FSE} 大体类似（但亚洲中纬冬季增雪 T_{FSE-2} 与 T_{FSE} 的情况更接近），即， T_{FSE-1} 、 T_{FSE-2} 对于 T_{FSE} 的气候效应而言可能都具有一定贡献。第二，若将两模态分别表征的关键区合并（图 6a 中的框区，也即图 1 中的红、蓝阴影合并区），那么，该合并区与图 6a 中阴影区（ T_{FSE} 与 P_{FSE} 的显著正相关区）比较吻合，同时，该合并区也是欧亚北部冬季增雪面积的大值区和年际变化强烈区[穆松宁和周广庆（2009）的图 2c、2d]，由该合并区冬季增雪面积（ $T_{FSE-1-2}$ ）与 T_{FSE} 的标准化时间序列（图 6b）可见，两者表现为非常

一致的同位相变化，相关系数达到 0.86，这意味着欧亚中纬冬季增雪面积 $T_{FSE-1-2}$ 对于 T_{FSE} 整体变化而言的关键作用。第三，仅对我国江南地区夏季降水异常来说，其与 T_{FSE-1} 、 T_{FSE-2} 的显著负相关区分布分别较 T_{FSE} 的情况偏东、偏西，那么，其合并区冬季增雪面积 $T_{FSE-1-2}$ 与我国夏季降水的关系究竟怎样，有必要对其进行详细考察。

3.3 EOF1、EOF2 关键区的合并区的冬季增雪面积变化（欧亚中纬冬季增雪面积变化）

由 $T_{FSE-1-2}$ 与我国夏季降水的相关系数分布（图 7a）可见，在位于我国东部的内蒙古东部和东北的西北部、黄河以北地区、淮河流域、江南地区，“+ - + -”的相关系数分布型表现得非常清晰，另外，江南地区分布着 17 个显著负相关台站，内蒙古东部和东北的西北部也分布有两个显著正相关台站。即， $T_{FSE-1-2}$ 与我国夏季降水的相关关系类似于 T_{FSE} 情况[穆松宁和周广庆（2010）的图 1a]且更显著，尤其在江南地区。类似地，图 7b 给出了 $T_{FSE-1-2}$ 与我国夏季气温的关系，其与 T_{FSE} 的情况 [穆松宁和周广庆（2010）的图 1b] 也非常类似、同时也更强，尤其在我国北方大范围地区，在此不再详述。

研究表明（穆松宁和周广庆，2010）， T_{FSE} 在 1991/1992 年前后发生了一次明显的气候转变，其在 1990 年代初之后明显减小，而 T_{FSE} 和我国夏季气候异常的关系在其转变前后比较稳定、无明显变化。那么， $T_{FSE-1-2}$ 变化是否也具有类似特点？图 8 给出了 $T_{FSE-1-2}$ 的 M-K 突变检验，发现， $T_{FSE-1-2}$ 在 1988/1989 年前后发生了一次明显的气候转变，其

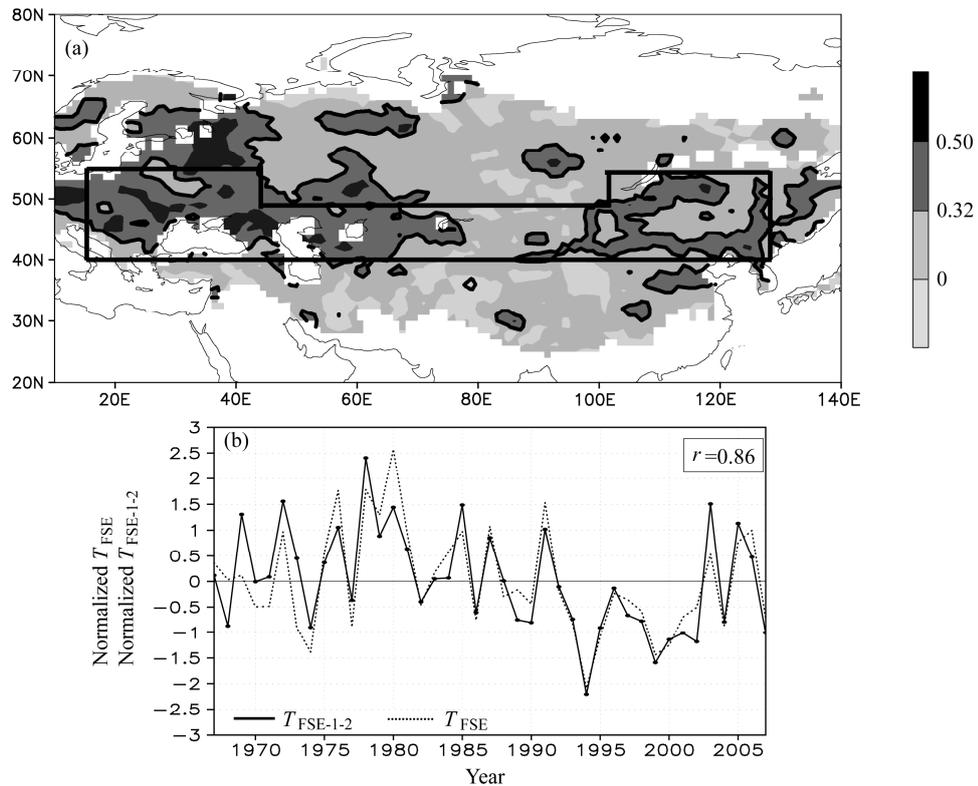


图 6 (a) 1967~2007 年 T_{FSE} 与 A_{FSE} 的逐点相关系数分布, 图中等值线表示相关系数通过 95% 信度检验; (b) T_{FSE} (点线) 与 $T_{FSE-1-2}$ (实线) 的标准化时间序列

Fig. 6 (a) Correlation of T_{FSE} and A_{FSE} for the period 1967~2007, the contours indicate the regions above 95% confidence level. (b) Normalized time series of T_{FSE} (dotted line) and $T_{FSE-1-2}$ (solid line)

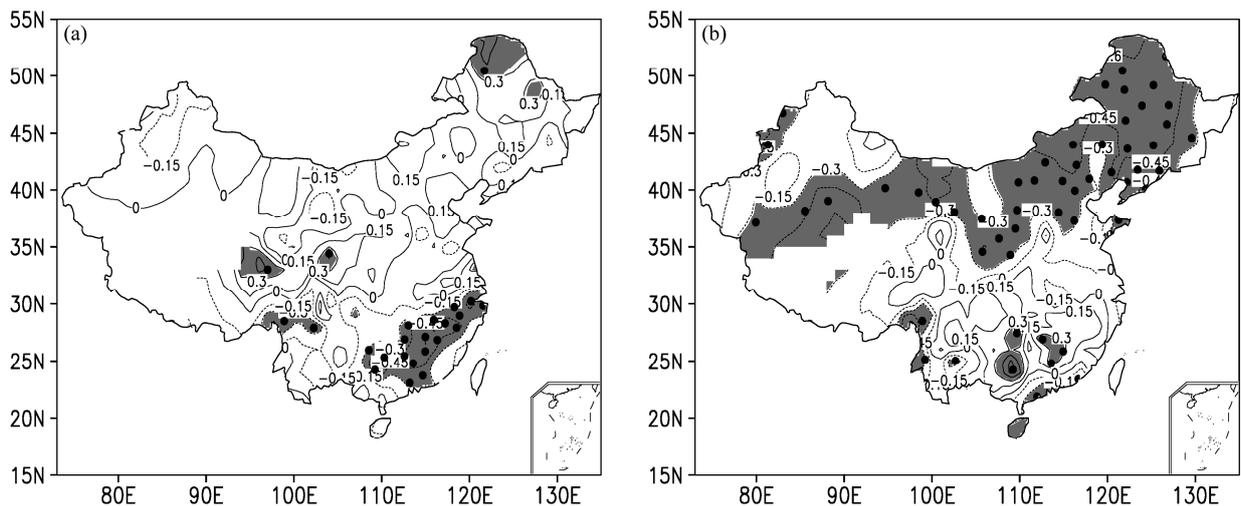


图 7 1967~2007 年 $T_{FSE-1-2}$ 与我国夏季 (a) 降水、(b) 气温的相关系数分布。其余同图 3

Fig. 7 Correlation of $T_{FSE-1-2}$ with (a) rainfall and (b) temperature in summer in China for the period 1967~2007, others are same as Fig. 3

在 1980 年代末之后明显减小, 这与 T_{FSE} 的情况大体一致。进一步, 图 9a、b 分别给出了在 $T_{FSE-1-2}$ 转变之前 (P1: 1967~1988 年)、之后 (P2: 1989~2007 年) 的时间段, $T_{FSE-1-2}$ 与夏季降水的相关系数

分布。发现, 在两个时段内, 冬季 $T_{FSE-1-2}$ 与我国夏季降水的关系在我国东部地区均表现为从北向南的“+ - + -”分布, 这与整个研究时段内 (1967~2007 年) 的情况 (图 7a) 一致, 但其相关

系数的显著性存在差异。在 P1 时段（1967~1988 年），虽然资料样本仅 22 年，但江南地区仍分布了 6 个显著负相关台站，淮河流域和江南大部分地区的相关系数超过 0.2，我国其他地区的相关则比较弱；在 P2 时段（1989~2007 年）， $T_{FSE-1-2}$ 与夏季降水的关系（图 9b）较 P1 明显增强，在淮河流域和江南地区，其相关系数几乎都超过 0.4，尤其是淮河流域及其以西地区分布有较大范围的显著正相关区（包括了 12 个显著正相关台站），我国其他地区的相关系数大部分也超过 0.2，这说明在 1980 年代末之后， $T_{FSE-1-2}$ 与我国夏季降水的关系整体加强，与江南、淮河流域降水的关系加强明显，尤其与淮河流域降水关系十分显著。总的来说， $T_{FSE-1-2}$ 与我

国夏季降水的关系还是比较稳定（表现为在 P1、P2 这两个时段，其相关系数符号的空间分布与整个研究时段（1967~2007 年）比较一致），而 $T_{FSE-1-2}$ 与淮河流域、江南夏季降水的相关关系在 1989 年之后明显加强的变化特点和 T_{FSE} 的情况极为接近。

经过对比还发现，欧洲中纬冬季增雪 T_{FSE-1} 在 1980 年代末也存在较明显的气候转变（图 10，虽未通过 95% 信度检验）， T_{FSE-1} 与夏季降水在 P2 时间段的相关系数在我国东部也表现为从南向北的“+ - + -”分布（图 11b），但其显著性较 $T_{FSE-1-2}$ 略弱，这种相关系数符号的分布型在 P1 时间段虽也大体存在，但淮河流域的正相关系数分布区已南移至江南北部，因此，在 1980 年代末之后， T_{FSE-1} 与我国夏季降水的关系亦明显加强，而这种明显加强的相关关系（图 11b）与 $T_{FSE-1-2}$ 的情况（图 9b）颇为接近，其原因为： T_{FSE-1} 和 $T_{FSE-1-2}$ 的关系在 1980 年代末之后的明显加强（P1/P2 时间段的相关系数为 0.59/0.86）。但亚洲中纬冬季增雪 T_{FSE-2} 则不存在类似的气候转变（图略）。

综上所述，将 EOF1 和 EOF2 相应关键区合并后，该合并区（欧亚中纬区）的冬季增雪面积 $T_{FSE-1-2}$ 与我国夏季气候异常的关系非常类似于 T_{FSE} 、且更显著，尤其是在 1980 年代末之后， $T_{FSE-1-2}$ 与淮河流域和江南地区夏季降水关系明显加强，这一方面意味着 $T_{FSE-1-2}$ 变化对于我国夏季气候异常而言可能具有更好的预示意义，在另一方面也说明，对欧亚北部冬季增雪面积 T_{FSE} 的气候效应而言，起作用的很可能是欧亚中纬冬季增雪面积 $T_{FSE-1-2}$ 的变化，

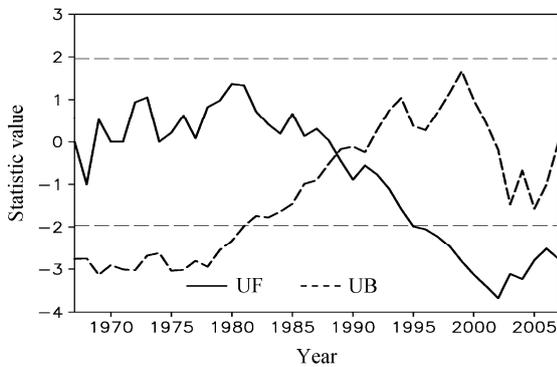


图 8 $T_{FSE-1-2}$ 的 M-K 突变检验（水平虚线：M-K 检验的 95% 信度水平临界值）

Fig. 8 Forward (UF, solid line) and backward (UB) statistic rank series (dashed line) in the Mann-Kendall test of $T_{FSE-1-2}$. Dashed beelines: 95% confidence level in the Mann-Kendall test

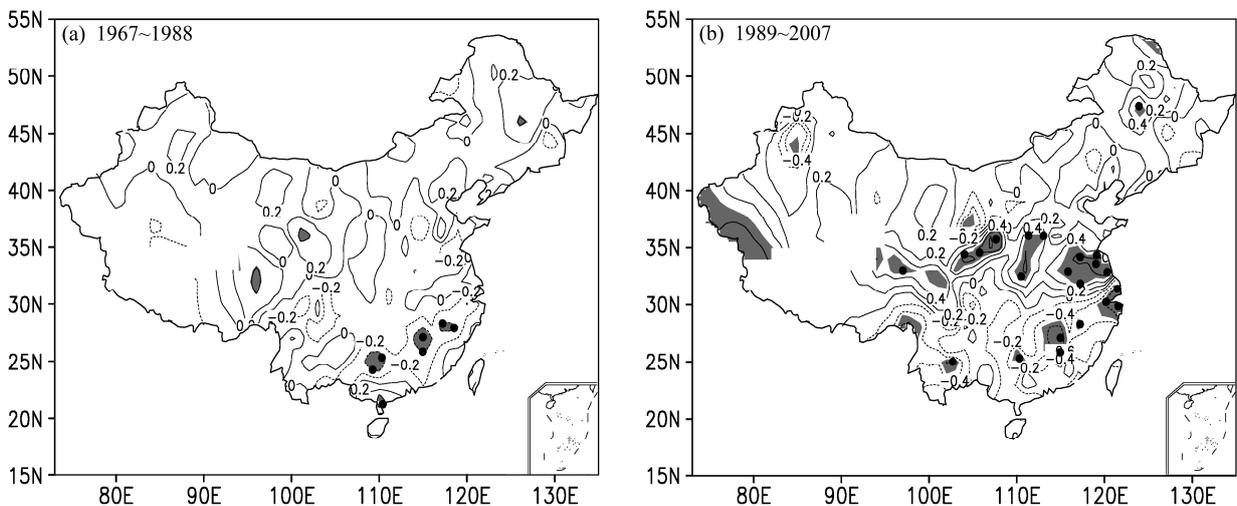


图 9 (a、b) $T_{FSE-1-2}$ 与我国夏季降水分别在 (a) 1967~1988 年、(b) 1989~2007 年时间段的相关系数分布。其余同图 3

Fig. 9 Correlation of $T_{FSE-1-2}$ and rainfall in summer in China for the period of (a) 1967~1988 and (b) 1989~2007, others are same as Fig. 3

这一点是比较容易理解的，因为 $T_{FSE-1-2}$ 所在区域（欧亚中纬区）恰恰是欧亚北部冬季增雪面积的大值区和年际变化强烈区，即，可以把 $T_{FSE-1-2}$ 看成是 T_{FSE} 的“凝练”。那么对于 $T_{FSE-1-2}$ 和我国夏季气候异常之间的“隔季相关”而言，欧洲中纬冬季增雪面积 T_{FSE-1} 和亚洲中纬冬季增雪面积 T_{FSE-2} ，哪个起主导作用？虽然亚洲中纬冬季增雪 T_{FSE-2} 和我国夏季气候异常的相关关系更强，但对于积雪的气候效应而言，“隔季相关”的物理途径显然更重要，因此，需要详细地考察 T_{FSE-1} 和 T_{FSE-2} 分别与各陆面要素关系、分别与大气环流关系的季节演变特点，并与 $T_{FSE-1-2}$ (T_{FSE}) 的相应情况进行对比。

4 欧洲中纬冬季增雪面积、亚洲中纬冬季增雪面积与陆面关系的季节演变

4.1 与融雪关系的季节演变

4.1.1 融雪面积

需要说明，有研究表明，就欧亚北部融雪的气候平均而言[穆松宁和周广庆(2010)的图 1a]，春初至夏初(3~6月)，欧亚北部融雪面积大值区由 46°N 附近的欧洲中部和东部(3月)逐渐向东、向北移至 55°N 以北的东亚(6月)，这种欧亚北部大范围融雪进程与相应的大气回暖进程(欧洲在春季就迅速回暖、而东亚中高纬地区则在初夏才迅速回暖)相当一致，研究表明， T_{FSE} 和欧亚北部大范围融雪进程表现为显著负相关[穆松宁和周广庆(2012)的图 2]，那么， $T_{FSE-1-2}$ 、 T_{FSE-1} 、 T_{FSE-2} 是否

也与其具有类似的相关？

首先，图 12a 给出了欧亚中纬冬季增雪面积 $T_{FSE-1-2}$ 分别与 3~6 月融雪面积的相关系数分布，可见，其主要的显著负(正)相关区均大体位于在欧亚北部的北(南)部地区，同时，这种显著的正、负相关区都表现为随时间的向东和向北延伸或移动，其中，其显著负相关区的季节演变趋势为：47°N 以北的欧洲中东部以及亚洲中西部的部分地区(3月)→52°N 以北的贝加尔湖以西地区(4月)→58°N 以北的亚洲地区(5月)→63°N 以北的东西伯利亚(6月)，同时还发现，第一，这些显著负相关区的南界(图 12a 中的绿色实线)恰为相应融雪面积气候态大值区的中心纬度[穆松宁和周广庆(2012)的图 1a]，也就是说，该显著负相关区包含了气候平均融雪强烈区的北部；第二，在这些显著负相关区的南部或西南部，分布着 $T_{FSE-1-2}$ 和融雪面积的主要

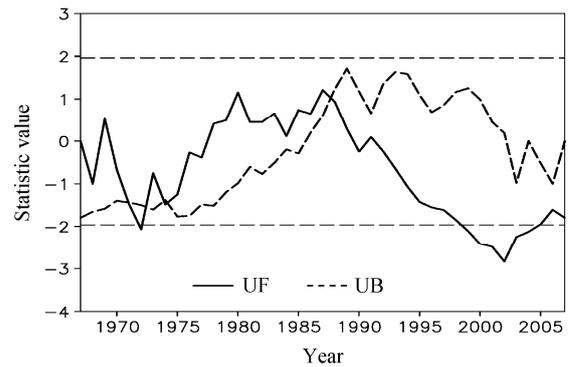


图 10 同图 8，但为欧洲中纬冬季增雪 T_{FSE-1} 的情况
Fig. 10 Same as Fig. 8, but for T_{FSE-1}

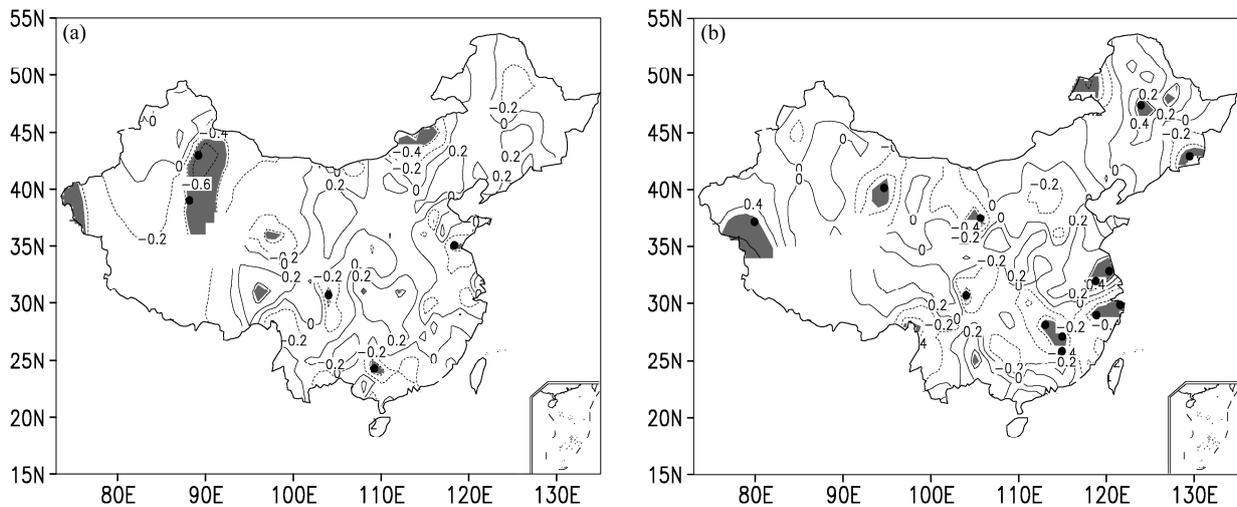


图 11 同图 9，但为欧洲中纬冬季增雪 T_{FSE-1} 的情况
Fig. 11 Same as Fig. 9, but for T_{FSE-1}

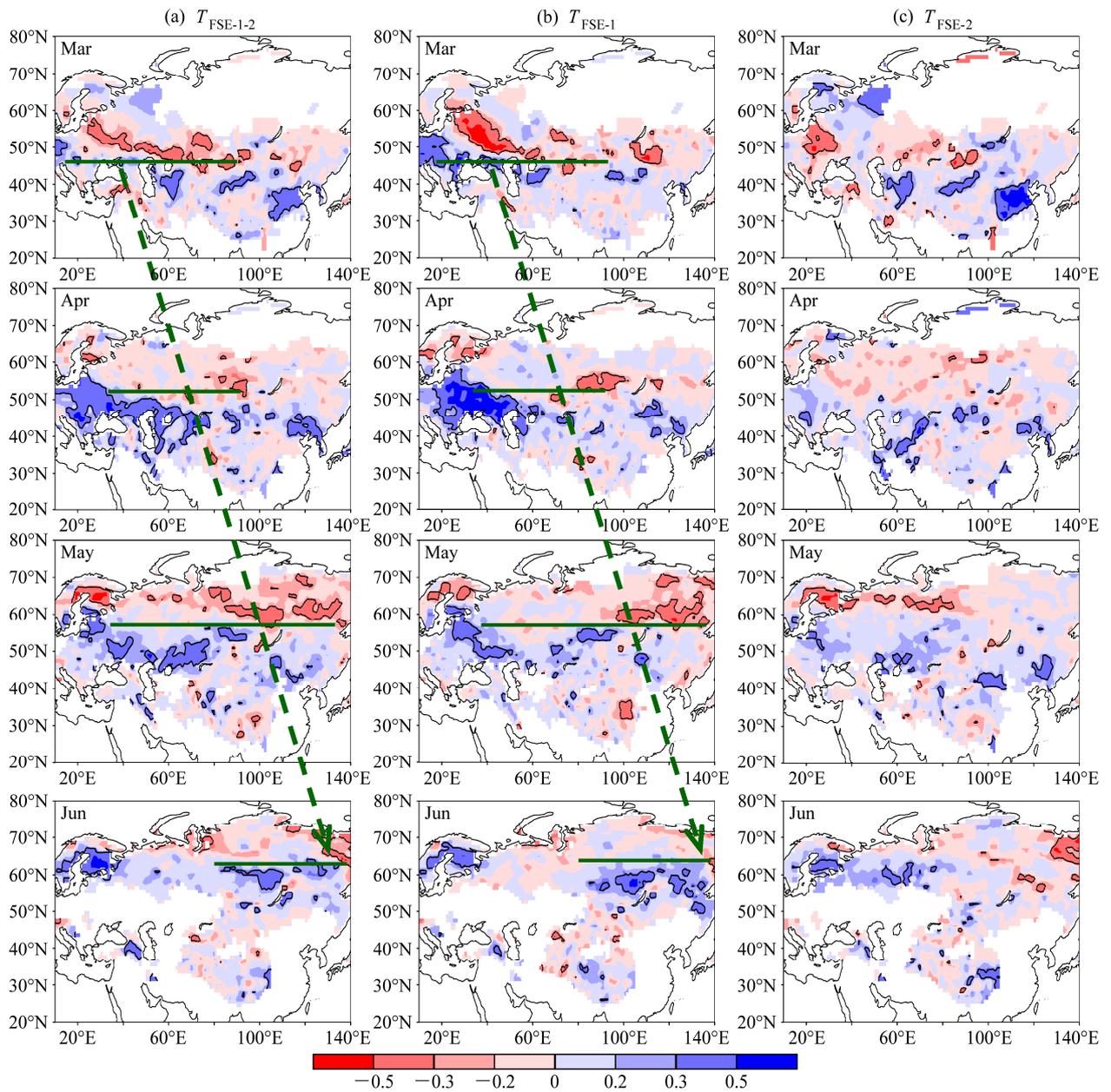


图 12 1967~2007 年 (a) $T_{FSE-1-2}$ 、(b) T_{FSE-1} 、(c) T_{FSE-2} 分别与 3~6 月融雪面积的相关系数分布。等值线通过 95% 信度检验；绿色实线为负相关区南界

Fig. 12 Correlation of (a) $T_{FSE-1-2}$, (b) T_{FSE-1} , (c) T_{FSE-2} with melt-snow area from March to June for the period 1967–2007 (contoured region areas represent above the 95% confidence level, the green solid lines indicate the south boundary of negative correlation region)

显著正相关区，而这些显著正相关区又包含了气候平均融雪强烈区的南部。这说明 $T_{FSE-1-2}$ 偏大可能有利于主要融雪区北(南)部融雪速度的明显减慢(加快)，即，主要融雪分布区可能偏南，换言之，欧亚北部大范围融雪进程可能减慢；当 $T_{FSE-1-2}$ 偏小时相反。这一推断可由 $T_{FSE-1-2}$ 的大、小值年合成的 3~6 月融雪覆盖率分布(图 13a) 得到验证：在大值年，逐月的主要融雪区较小值年都明显偏南、偏西，

换言之，其大范围融雪进程明显落后于小雪年。大、小值年之间的这种明显差异在 3~4 月主要表现在欧洲地区，在 5~6 月则主要表现在东亚高纬区。 $T_{FSE-1-2}$ 与欧亚北部大范围融雪进程的这种显著负相关和 T_{FSE} 的情况完全一致，经对比发现，在融雪极为强烈的 5、6 月份(此时主要融雪区已延伸 / 移动至东亚中高纬)， $T_{FSE-1-2}$ 与其 5 月(6 月)融雪面积的显著负(正)相关强于 T_{FSE} 的情况[穆松宁和

周广庆(2012)的图 1b],这在一定程度上说明 $T_{FSE-1-2}$ 和我国夏季气候异常之间“隔季相关”的物理途径有可能更清晰一些。

类似地,图 12b 给出了欧洲冬季增雪面积 T_{FSE-1} 分别与 3~6 月融雪面积的相关系数分布,发现,其主要显著负、正相关区也表现为向东北方向延伸或移动的特点,这与 $T_{FSE-1-2}$ 情况完全一致,也就是说,欧洲冬季增雪面积 T_{FSE-1} 偏大(小)同样可能有利于欧亚北部大范围融雪进程的减慢(加快), T_{FSE-1} 大、小值年份的逐月融雪面积合成(图 13b)

也充分证实了这一推测。有意思的是,对比图 12a 和 12b 后发现:(1)在 3~4 月,欧洲冬季增雪面积 T_{FSE-1} 与融雪面积的关系较 $T_{FSE-1-2}$ 更强,表现为整个显著区范围略大,尤其是其相关系数超过 0.5 的区域明显偏大,而此时的主要融雪区位于欧洲和亚洲西部,这意味着 T_{FSE-1} 与 3~4 月的“欧洲到亚洲西部”这一段融雪进程的关系更强。为证实这一点,将图 13a ($T_{FSE-1-2}$ 的大、小值年合成)和图 13b (T_{FSE-1} 的大、小值年合成)也进行了对比,发现,在 3~4 月, T_{FSE-1} 大值年主要融雪区较之于小值年

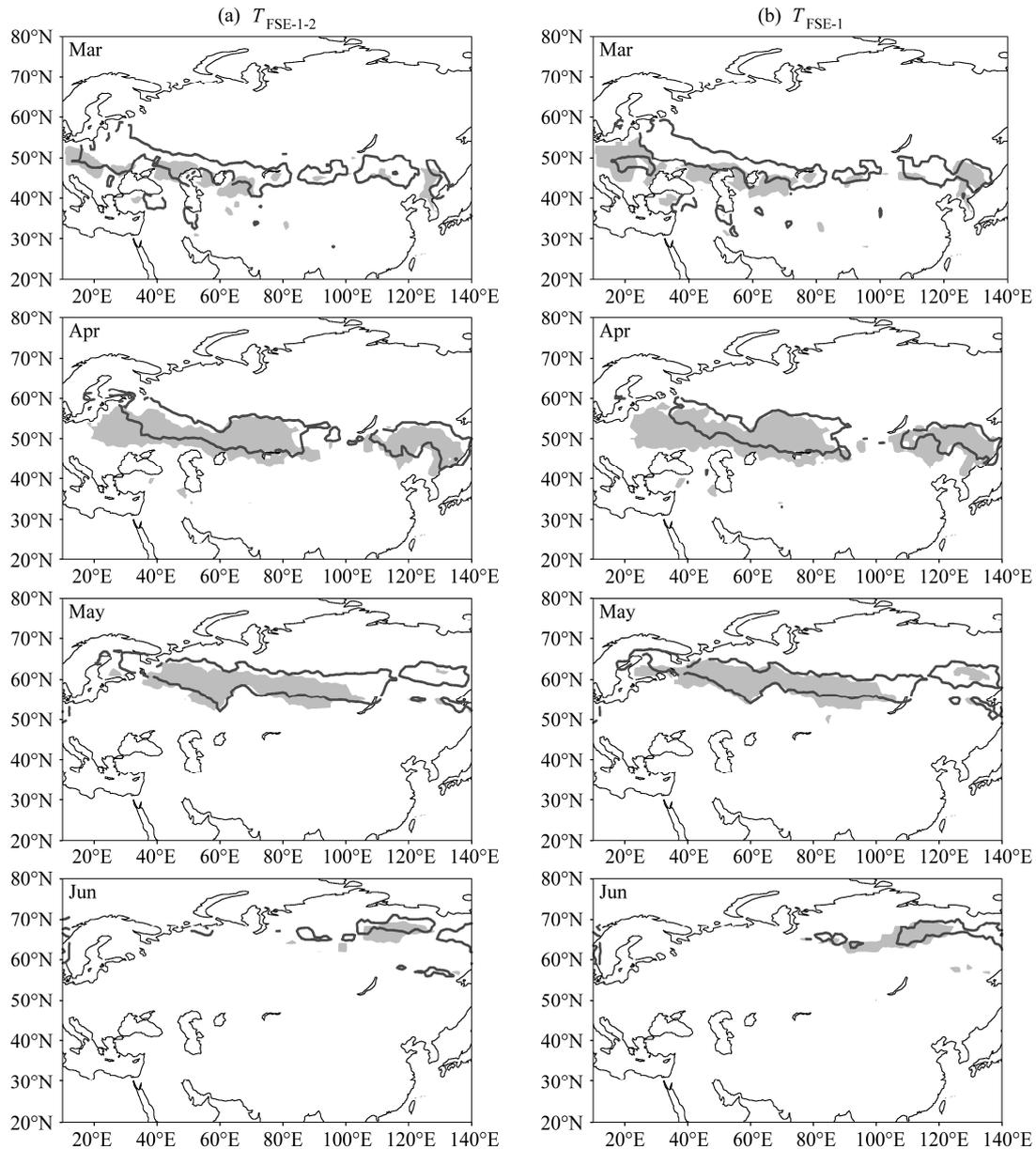


图 13 3~6 月融雪面积覆盖率在 (a) $T_{FSE-1-2}$ 、(b) T_{FSE-1} 大值年份(阴影)和小值年份(等值线)的合成分布。3~6 月的图中仅分别给出 30%、50%、60%、70% 等值线或阴影,以表征其主要融雪区

Fig. 13 Composites of melt-snow area for the (a) $T_{FSE-1-2}$, (b) T_{FSE-1} great-value years (shading) and small-value years (contours) from March to June, only typical coverages of 30%, 50%, 60%, 70% are displayed from March to June, respectively

偏西、偏南的这种差异的确比 $T_{FSE-1-2}$ 的情况更明显；(2) 至 5~6 月，主要融雪区已向东北方向移至欧洲东部和亚洲中西部乃至东亚中高纬地区， T_{FSE-1} 与其融雪面积的关系与 $T_{FSE-1-2}$ 不存在明显差异，仅 T_{FSE-1} 与 6 月东亚高纬融雪的负相关（贝加尔湖以北的东亚中高纬融雪的正相关）略弱（略强）于 $T_{FSE-1-2}$ ，但在相应的合成分析（图 13a、13b）中未见明显差异。

图 12c 也同样给出了亚洲中纬冬季增雪面积 T_{FSE-2} 与 3~6 月融雪面积的相关，发现，其相关关系比较弱， T_{FSE-2} 仅与 6 月东亚高纬融雪面积存在小范围的显著负相关，与 $T_{FSE-1-2}$ 的情况相比较，两者基本没有相似之处。这意味着亚洲冬季增雪面积 T_{FSE-2} 对于 $T_{FSE-1-2}$ 对我国夏季气候异常“影响”机理而言贡献不大，尽管其与我国夏季降水的相关显著。

以上分析表明，和欧亚北部冬季增雪面积 T_{FSE} 相同，欧亚中纬冬季增雪面积 $T_{FSE-1-2}$ 、欧洲中纬冬季增雪面积 T_{FSE-1} 的偏大（小）都有利于欧亚北部大范围融雪进程的减慢（加快），且 T_{FSE-1} 与前半阶段融雪进程的关系更强。这意味着对于 $T_{FSE-1-2}$ 与我国夏季气候异常之间“隔季相关”的物理途径而言，欧洲中纬冬季增雪面积 T_{FSE-1} 的变化应该起到十分重要的贡献作用。

4.1.2 雪盖面积、雪水当量

为了进一步巩固 4.1.1 的结论，本文也考察了各区域冬季增雪面积与 2~6 月欧亚北部雪盖面积本身相关关系的季节演变。需要说明，从气候平均来看，2~6 月积雪主要分布区表现为向东北方向撤退的特点[穆松宁和周广庆（2012）的图 2a]。首先，图 14a 给出了欧亚中纬冬季增雪面积 $T_{FSE-1-2}$ 分别与 2~6 月雪盖面积本身的相关系数分布，可见，在欧亚北部，其显著正相关区由 2 月份的 $40^{\circ}\text{N}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 欧亚中纬区逐渐向东、向北延伸或移动至 6 月份的 60°N 以北的西伯利亚地区。而这些显著正相关区基本为雪盖面积气候态分布的大梯度区，也即年际变化强烈区[穆松宁和周广庆（2012）的图 2a]，这意味着 $T_{FSE-1-2}$ 可能与欧亚北部积雪主要分布区的位置有关，这可由 $T_{FSE-1-2}$ 大、小值年合成的逐月积雪覆盖率分布得到证实（图 15a）：大值年的积雪主要分布区的确较小值年明显偏南、偏西，这种差异在 2~4 月主要表现在欧洲和西亚，在 5~6 月则东移至东亚高纬区，很明显，当 $T_{FSE-1-2}$ 偏大（小）时，欧亚北部积雪主要分布区向东北方向的撤退减慢

（加快）的重要原因就是大范围融雪进程显著减慢（加快）。对欧洲中纬冬季增雪面积 T_{FSE-1} 来说，无论是其与雪盖面积关系的季节演变特点（图 14b）还是其大、小值年份的雪盖面积合成（图 15b）都和 $T_{FSE-1-2}$ 的相应情况一致，但两者存在一些细节上的不同，具体为： T_{FSE-1} 与 2~3 月雪盖面积的关系强于 $T_{FSE-1-2}$ ，表现为位于欧洲的显著正相关区范围偏大，尤其是相当大范围的相关系数超过了 0.5，从 T_{FSE-1} 大、小值年合成图（图 15b）上也能看出，大值年主要积雪分布较之于小值年偏西、偏南的这种差异比 $T_{FSE-1-2}$ 情况（图 15a）明显；至 6 月， T_{FSE-1} 与西伯利亚雪盖面积的显著正相关较 $T_{FSE-1-2}$ 偏弱，尤其是东亚高纬的显著正相关区范围较 $T_{FSE-1-2}$ 偏小， T_{FSE-1} 的这种“6 月偏弱”的情况可能在一定程度上会导致东亚中高纬夏季温度异常弱于 $T_{FSE-1-2}$ 的相应情况。但是，亚洲中纬冬季增雪 T_{FSE-2} 的情况完全不同，其与雪盖面积的关系（图 14c）整体比较弱，与 $T_{FSE-1-2}$ 的情况也完全不一致，但其与 6 月东亚高纬小范围地区的雪盖面积表现为显著正相关，这可能是 $T_{FSE-1-2}$ 与我国夏季气候异常存在显著相关的原因之一。

由于雪水当量 SWE 能更准确地描述积雪变化，本文也考察了 1979~2007 年 $T_{FSE-1-2}$ 分别与欧亚北部冬、春、夏季 SWE 的相关（图 16a），可见，其 SWE 与 $T_{FSE-1-2}$ 的显著正相关区也大体表现为向东北方向的延伸和移动，具体为： 60°N 附近的欧亚中西部地区（冬季）→欧洲北部、西伯利亚、 58°N 附近的东亚（春季）→ 63°N 以北的东亚高纬区（夏季）。经过比较，这种相关关系和 T_{FSE} 的情况[穆松宁和周广庆（2012）的图 3a、3b]几乎完全一致，但 $T_{FSE-1-2}$ 与冬季 SWE、与夏季东亚高纬 SWE 的关系略强。和融雪面积（图 12b）、雪盖面积本身的相应情况（图 14b）类似， T_{FSE-1} 与欧亚北部 SWE 关系的季节演变规律（图 16b）和 $T_{FSE-1-2}$ 的情况相当一致，但两者在细节上也同样略有差异： T_{FSE-1} 与冬春两季 SWE 的显著正相关整体强于 $T_{FSE-1-2}$ ，但与夏季东亚高纬 SWE 的显著正相关略弱。亚洲中纬冬季增雪面积 T_{FSE-2} 与冬春夏三季 SWE 的关系都比较弱，而且与 $T_{FSE-1-2}$ 的情况也完全不一致。

综上所述，第一，对欧亚北部积雪大范围变化而言，欧亚中纬冬季增雪面积 $T_{FSE-1-2}$ 异常时，融雪面积、雪盖面积、雪水当量 SWE 的季节演变异常协调一致，这和 T_{FSE} 的情况相同，同时考虑到 $T_{FSE-1-2}$

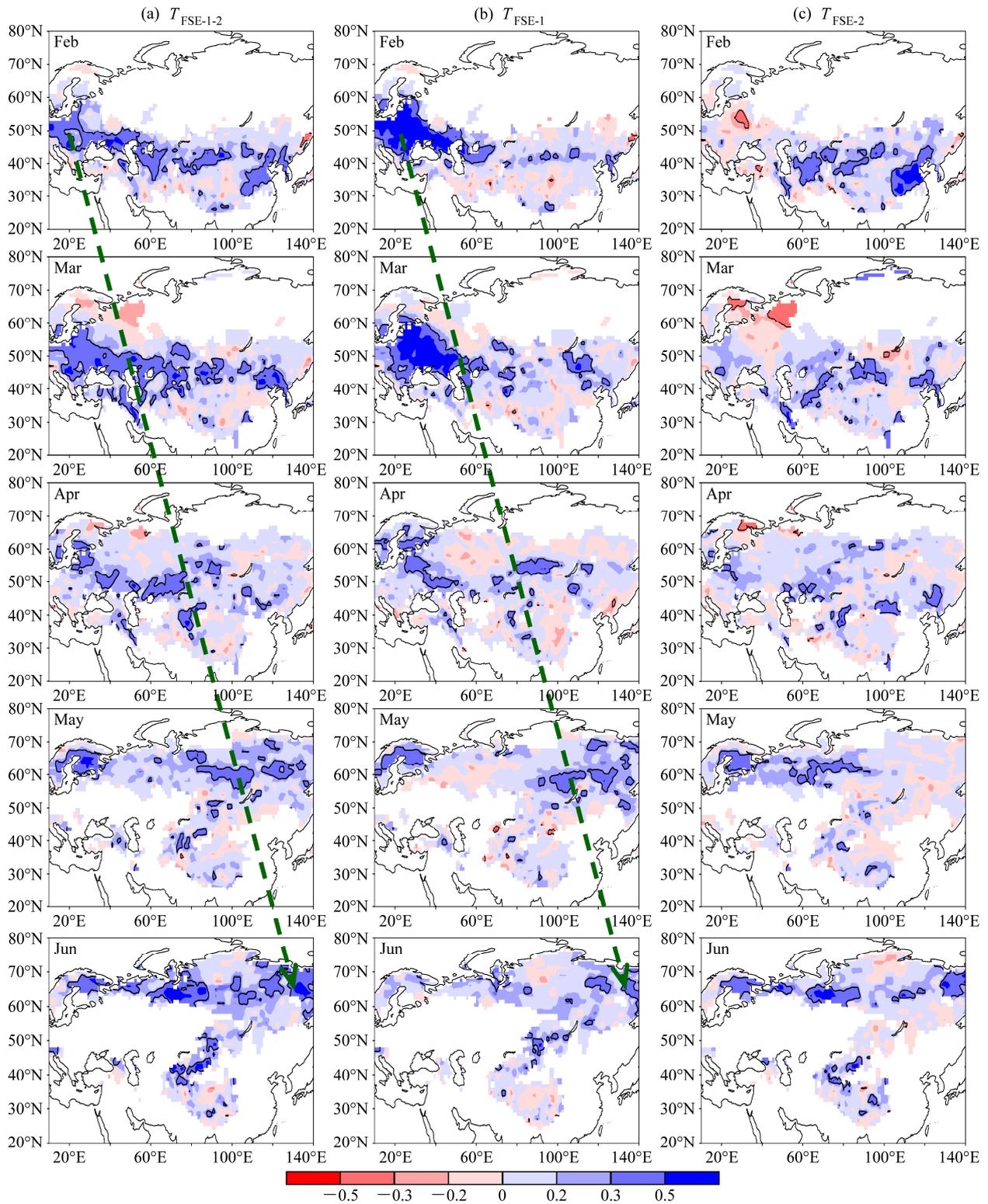


图 14 同图 12, 但为 2~6 月逐月积雪面积的情况

Fig. 14 The same as Fig. 12, but for the snow cover area from February to June

与我国夏季降水具有更强的相关关系, 因此, 在气候预测的意义上, $T_{FSE-1-2}$ 可能可以替代 T_{FSE} ; 第二, 欧洲中纬冬季增雪面积 T_{FSE-1} 、欧亚中纬冬季增雪

面积 $T_{FSE-1-2}$ 与欧亚北部大范围融雪进程具有几乎相同的相关关系, 同时考虑到 T_{FSE-1} 与我国夏季降水具有和 $T_{FSE-1-2}$ 相类似 (但更弱) 的关系, 因此推

断, T_{FSE-1} 变化至少对“ $T_{FSE-1-2}$ 与大范围融雪进程的关系”来说起关键作用。

4.2 土壤温度、冻土

需要说明, 由于土壤温度异常的原因十分复

杂, 因此, 本小节涉及的关于土壤温度异常原因的推测, 均以“陆—气相互作用”及“各陆面要素之间的相互作用”为前提。

图 17a、17b、17c 分别给出了 $T_{FSE-1-2}$ 与冬、春、

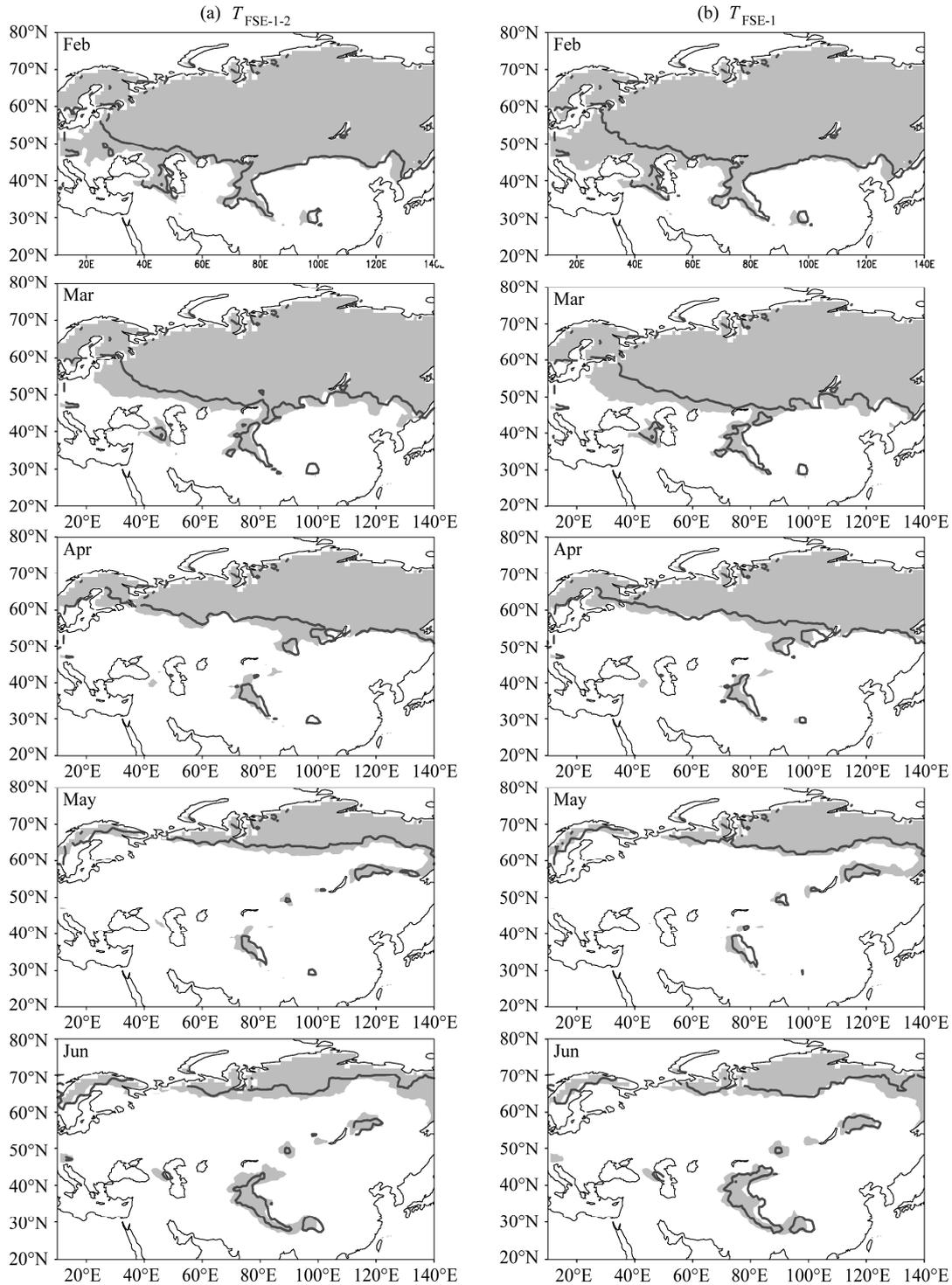


图 15 同图 13, 但为 2~6 月雪盖面积覆盖率的相应情况。2~5 月 (6 月) 的图中仅给出 70% (20%) 的等值线或阴影, 以表征该月积雪的主要分布区域

Fig. 15 The same as Fig. 13, but for the snow cover percentage of Feb to Jun. Only typical values of 70% (20%) are displayed from Feb to May, and 20% for Jun, to mark the main snow cover region

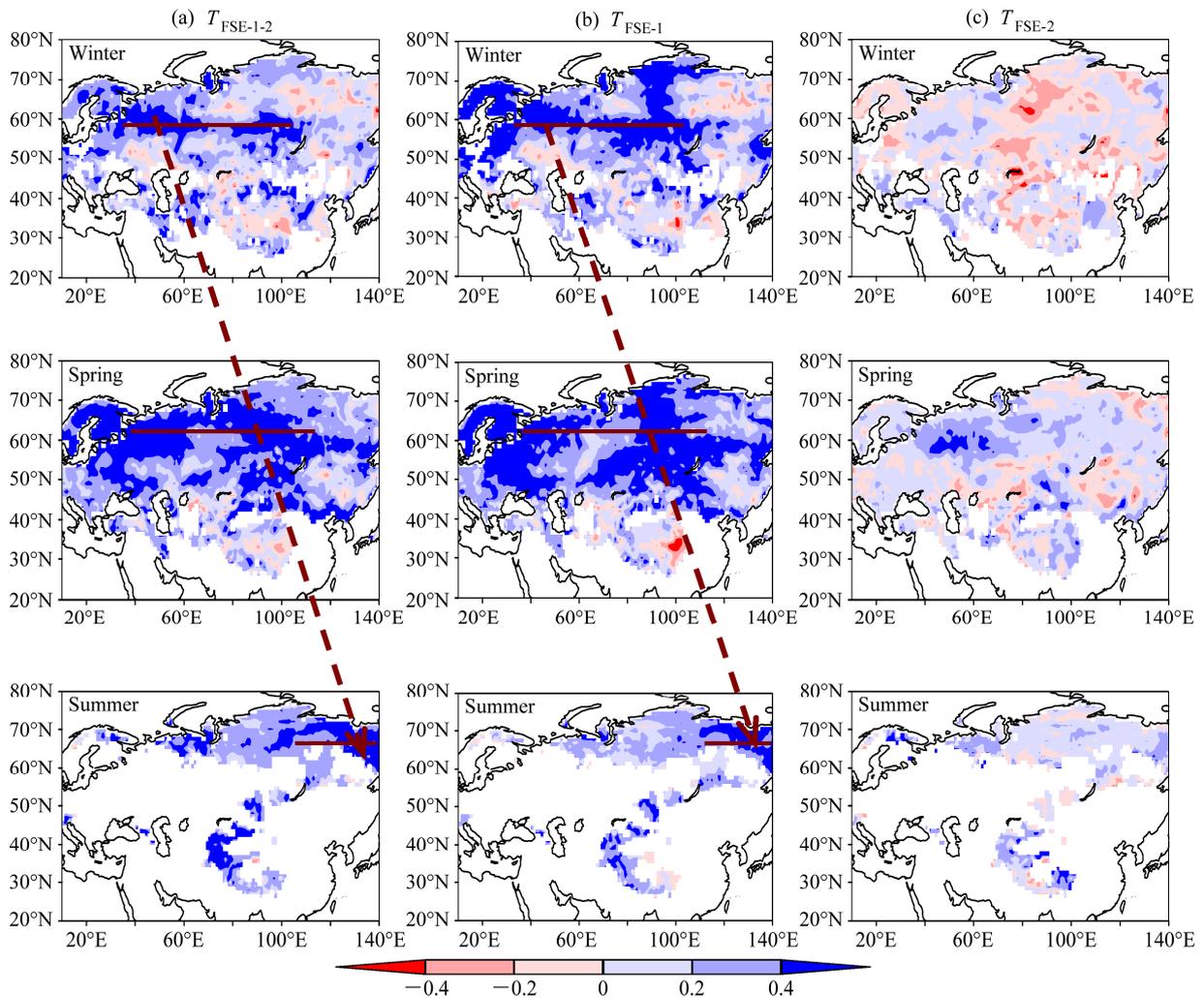


图 16 1979~2007 年 (a) $T_{FSE-1-2}$ 、(b) T_{FSE-1} 、(c) T_{FSE-2} 分别与冬、春、夏季 SWE 的相关系数分布。最深色阴影区通过 95% 信度检验

Fig. 16 Correlation of (a) $T_{FSE-1-2}$, (b) T_{FSE-1} , (c) T_{FSE-2} with Snow Water Equivalent (SWE) in winter, spring, and summer for 1979–2007. The heaviest shading passes 95% confidence level

夏季 1~4 层土壤温度的相关系数分布。为方便分析, 图中同时给出了土壤温度的零度等值线气候态分布(粗等值线), 将其作为大致的冻土分布。可见, 在同一深度上, 欧亚北部冻土分布区大体表现为向东北方向消退的季节演变特点(同积雪)(穆松宁和周广庆, 2012), 事实上, 欧亚北部土壤温度的气候态分布也表现为主要回暖区向东北方向移动的特点(图略)。由图 17 可见, $T_{FSE-1-2}$ 与欧亚北部各季土壤温度大体表现为负相关, 在冬季(图 17a), 其主要的显著负相关区位于欧洲中纬区和俄罗斯高纬区, 另外, 这种显著负相关在浅层最强, 并随深度的增加而减弱, 经对比发现, 浅层的显著负相关区和相应的冬季 SWE 异常区 ($T_{FSE-1-2}$ 与冬季 SWE 的相关系数超过 0.2 的区域, 图 16a) 部分

吻合, 这说明此时的浅层土壤温度异常可能部分受到积雪异常的影响(可能还受异常大气环流的影响); 在春季(图 17b), 显著负相关较冬季的情况明显加强, 具体表现为: 冬季位于欧洲中纬区和俄罗斯高纬区的显著负相关区都分别向东延伸, 除俄罗斯西部的小范围地区外, 欧亚北部几乎均为其显著负相关区, 和冬季一样, 负相关由浅至深而减弱, 这应该与此时大范围春季融雪进程的显著异常有一定关系; 至夏季(图 17c), 显著的负相关关系较春季有所减弱(但仍然很显著), 表现为: 春季位于欧洲的显著负相关区有所减小、位于亚洲的显著负相关区东移至中亚中高纬地区, 和冬春两季不同的是, 这种显著负相关由浅至深而加强(尤其在 1~3 层), 另外还发现, $T_{FSE-1-2}$ 与夏季第 4 层土壤

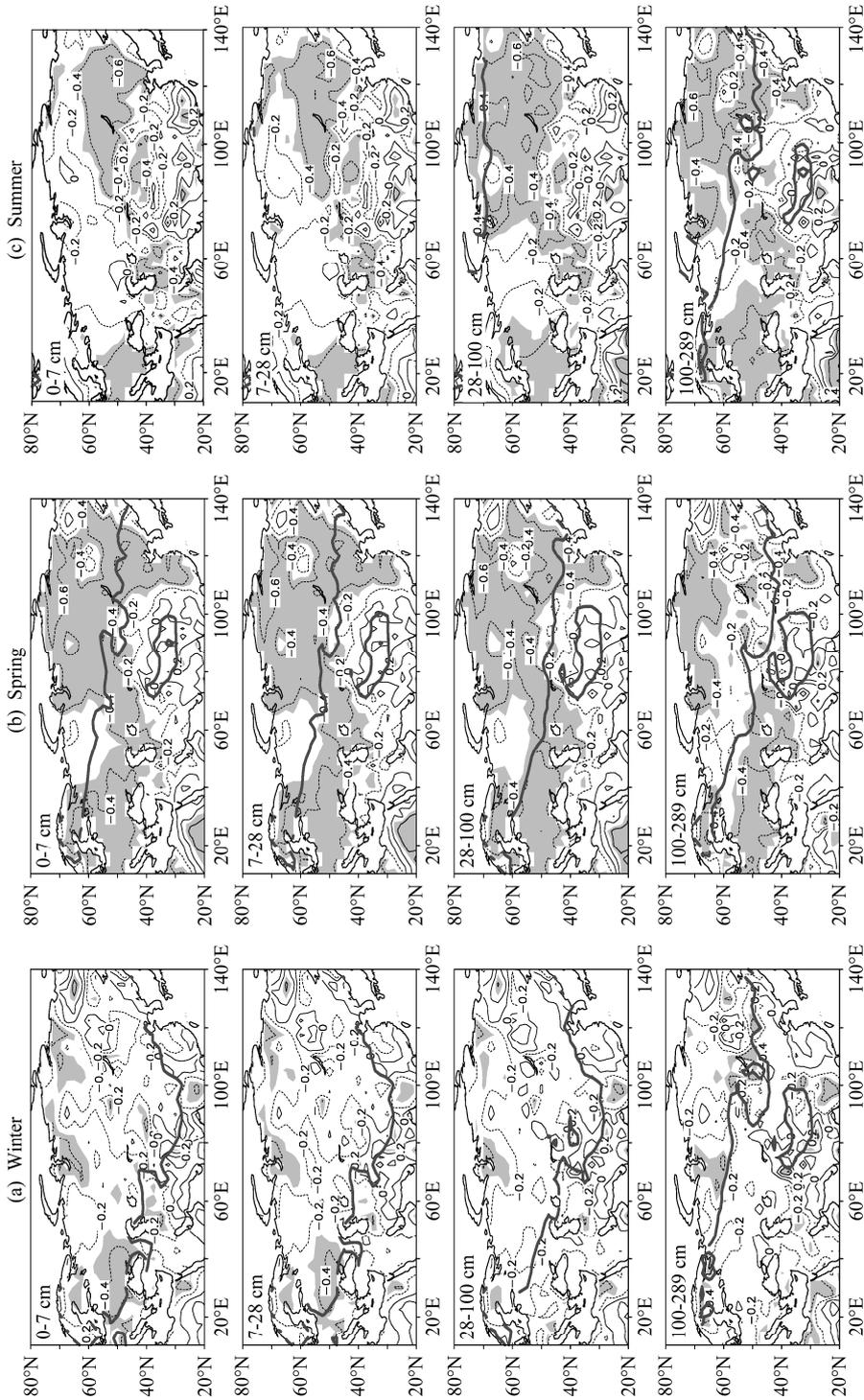


图 17 1967~2002 年 $T_{FSE-1,2}$ 与 (a) 冬、(b) 春、(c) 夏季不同深度土壤温度的相关系数分布。图中粗等值线为土壤温度的 0°C 气候态分布，阴影区通过 95% 信度检验
Fig. 17 Correlation of winter $T_{FSE-1,2}$ with 4-layer soil temperature in (a) winter, (b) spring, and (c) summer for the period of 1967–2002. Shaded regions are above the 95% confidence level, the thick contours represent the soil temperature of 0°C

温度的显著负相关系数(图 17c, 最下方)的空间分布型非常类似于春季第 2~3 层土壤温度的相应情况(图 17b), 这说明, 深层土壤温度具有非常好的缓变性, 因为夏季深层土壤温度可清楚地“记忆”春季的异常信号, 也就是说, 夏季浅层土壤温度异常在一定程度上应由春季土壤温度异常导致(尤其在夏季无雪无冻土的欧洲), 这种位于欧洲中纬和东亚中高纬的土壤温度异常应该会对大气环流产生一定的主动影响。

综合以上分析, 当 $T_{FSE-1-2}$ 偏大(小)时, 在冬季, 欧洲和俄罗斯高纬区的土壤温度由浅至深地降低(升高), 这也许与大气环流异常及地表雪量的异常有一定关系; 其后春季, 欧亚北部大范围土壤温度由浅至深地显著降低(升高), 这应该和欧亚北部大范围融雪进程明显减慢(加快)所导致的积雪偏多(少)有关, 当然也可能与冻土融化异常有关; 至夏季, 由于欧洲中纬区和东亚中高纬区深层土壤温度仍“记忆”春季异常, 而这种深层土壤温度异常能够由深至浅地对浅层土壤温度产生一定影响, 这种浅层土壤温度异常又很可能进一步对夏季大气环流产生主动影响。需要指出, 由于其他的陆面要素(积雪、冻土)和大气的异常信号都能在土壤温度变化上有所反映, 而较深层的土壤温度比积雪更缓变, 因此, $T_{FSE-1-2}$ 与欧亚北部土壤温度关系的季节演变相对于积雪而言更复杂。另外, 和前面所分析的积雪情况类似的是, $T_{FSE-1-2}$ 与土壤温度的显著负相关区也大体表现为从冬到夏的东移, 对于东亚中高纬土壤温度的局地变化来说, 其与冬季 $T_{FSE-1-2}$ 的负相关由春到夏逐渐加强, 在夏季达到最强。这种季节演变异常在 $T_{FSE-1-2}$ 与欧亚北部整层土壤温度(1~4 层加权平均)的相关系数分布(图略)上表现得更清晰。利用 1986~1995 年 GSWP-2 多模式分析 6 层土壤温度资料所进行的同样计算也可证实这一结论(图略)。

经对比, 上述 $T_{FSE-1-2}$ 与土壤温度关系的季节演变和 T_{FSE} 情况[穆松宁和周广庆(2012)的图 4]类似, 但 $T_{FSE-1-2}$ 与土壤温度的关系明显强于 T_{FSE} , 主要表现为其显著负相关区的范围明显偏大, 尤其是夏季东亚中高纬的显著负相关区较 T_{FSE} 大得多, 这就使得 $T_{FSE-1-2}$ 与该区夏季土壤温度的关系表现为非常清晰的由深至浅而减弱的特点, 而 T_{FSE} 的相应情况就复杂得多, 穆松宁和周广庆(2012)曾使用较大篇幅对其进行描述和解释。对 T_{FSE} 与我国夏季

气候异常之间“隔季相关”的物理途径而言, “ T_{FSE} 和土壤温度关系的季节演变”起重要作用(穆松宁和周广庆, 2012), 而 $T_{FSE-1-2}$ 和土壤温度的季节演变特点更为清晰, 因此可推测: $T_{FSE-1-2}$ 和我国夏季气候异常之间“隔季相关”的物理途径应该也更清晰。

经对比还发现, 欧洲中纬冬季增雪面积 T_{FSE-1} 与欧亚北部冬春季土壤温度的相关系数分布(图 18)也与 $T_{FSE-1-2}$ 的情况大体一致, 不同之处主要表现为: 在冬季(春夏两季), T_{FSE-1} 的显著负相关区范围较 $T_{FSE-1-2}$ 的情况偏大(小), 说明 T_{FSE-1} 与冬季(春夏两季)土壤温度的关系更强(弱), 其中, 夏季的情况比较复杂, 具体为: T_{FSE-1} 位于欧洲和东亚中高纬的显著负相关区较 $T_{FSE-1-2}$ 偏小, 尤其是东亚中高纬的显著负相关区明显偏小, 这应该是 T_{FSE-1} 与我国夏季降水的关系明显偏弱的一个比较重要的原因, 另外, T_{FSE-1} 与西亚高纬土壤温度表现为由浅至深减弱的显著负相关(但原因尚不清楚)。但是, 亚洲中纬冬季增雪面积 T_{FSE-2} 与土壤温度的关系则弱得多(图略), 其与 $T_{FSE-1-2}$ 的情况也完全不同, T_{FSE-2} 仅与夏季东亚中纬部分地区的土壤温度表现为由浅至深而减弱的显著负相关。因此, 就欧亚中纬冬季增雪面积 $T_{FSE-1-2}$ 与欧亚北部土壤温度关系的季节演变而言, 欧洲中纬冬季增雪面积 T_{FSE-1} 起重要作用。

考虑到冻土的缓变性及其对气候的重要影响, 本文也辅助性地考察了各区域冬季增雪面积和欧亚北部冻土深度关系的季节演变。发现, $T_{FSE-1-2}$ 、 T_{FSE-1} 与冻土深度的显著负相关关系十分一致(图 19a、19b), 其显著负相关区都表现为随季节向东北方向的移动, 具体为: 欧洲中纬区(冬季)→欧洲中东部到亚洲的中纬区(春季)→东亚中高纬的大范围地区(夏季)。经比较, T_{FSE-1} 与冬春季(夏季)冻土深度的关系较 $T_{FSE-1-2}$ 的情况偏强(偏弱), 表现为显著负相关区的范围偏大(小), 这和积雪的情况也是类似的(T_{FSE-1} 与前半阶段融雪进程关系强于 $T_{FSE-1-2}$)。这说明, 一方面, $T_{FSE-1-2}$ 偏大时, 冬春季冻土深度偏浅, 即, 冻土融化进程减慢(合成图略), $T_{FSE-1-2}$ 偏小时相反; 另一方面, T_{FSE-1} 对“ $T_{FSE-1-2}$ 与欧亚北部冻土融化关系的季节演变”起重要作用。

通过对以上对各区域冬季增雪面积和各陆面要素关系的季节演变分析可知, 第一, 欧亚中纬冬

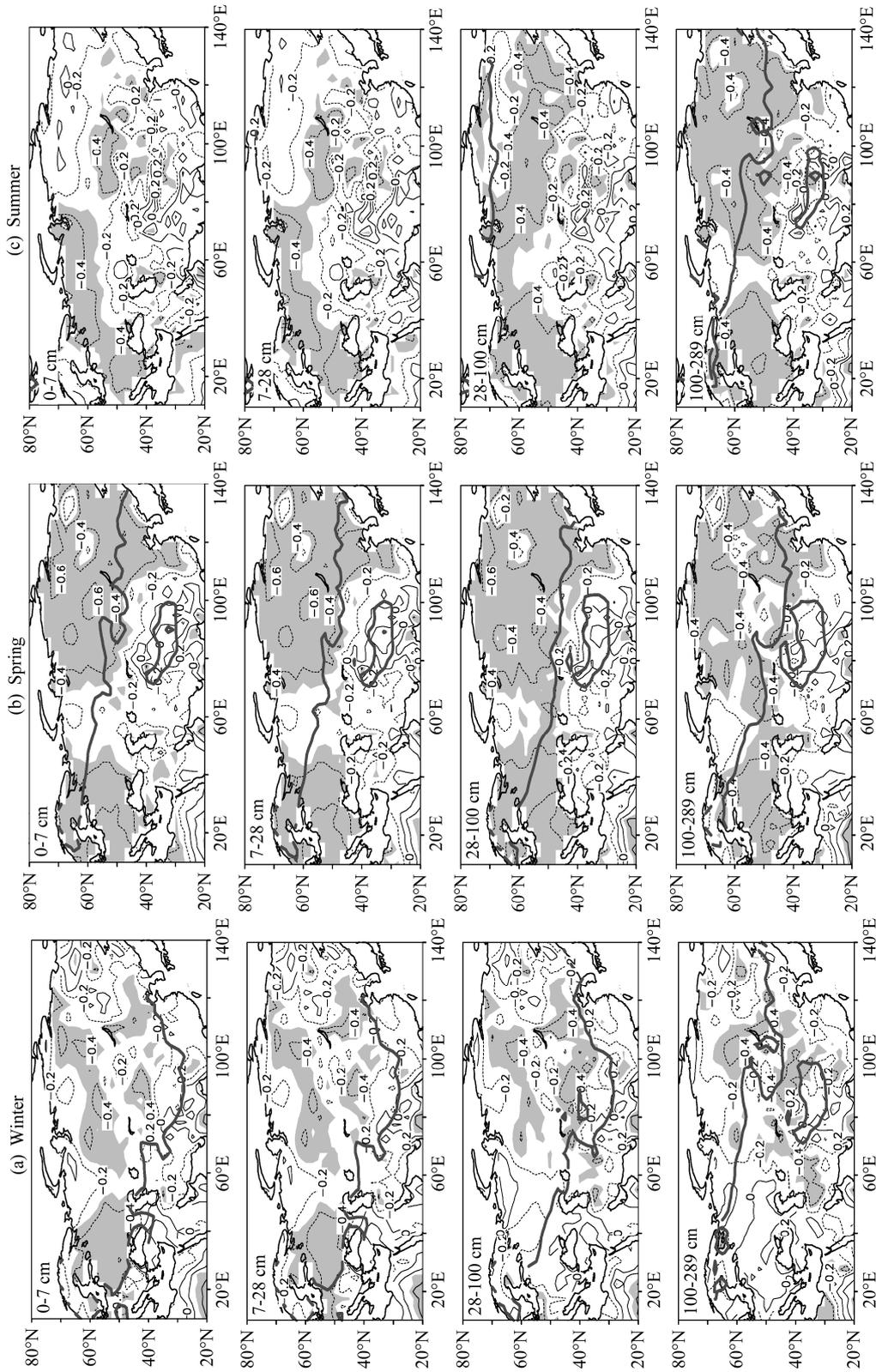


图 18 同图 17, 但为 T_{FSE-1} 的情况
Fig. 18 Same as Fig. 17, but for T_{FSE-1}

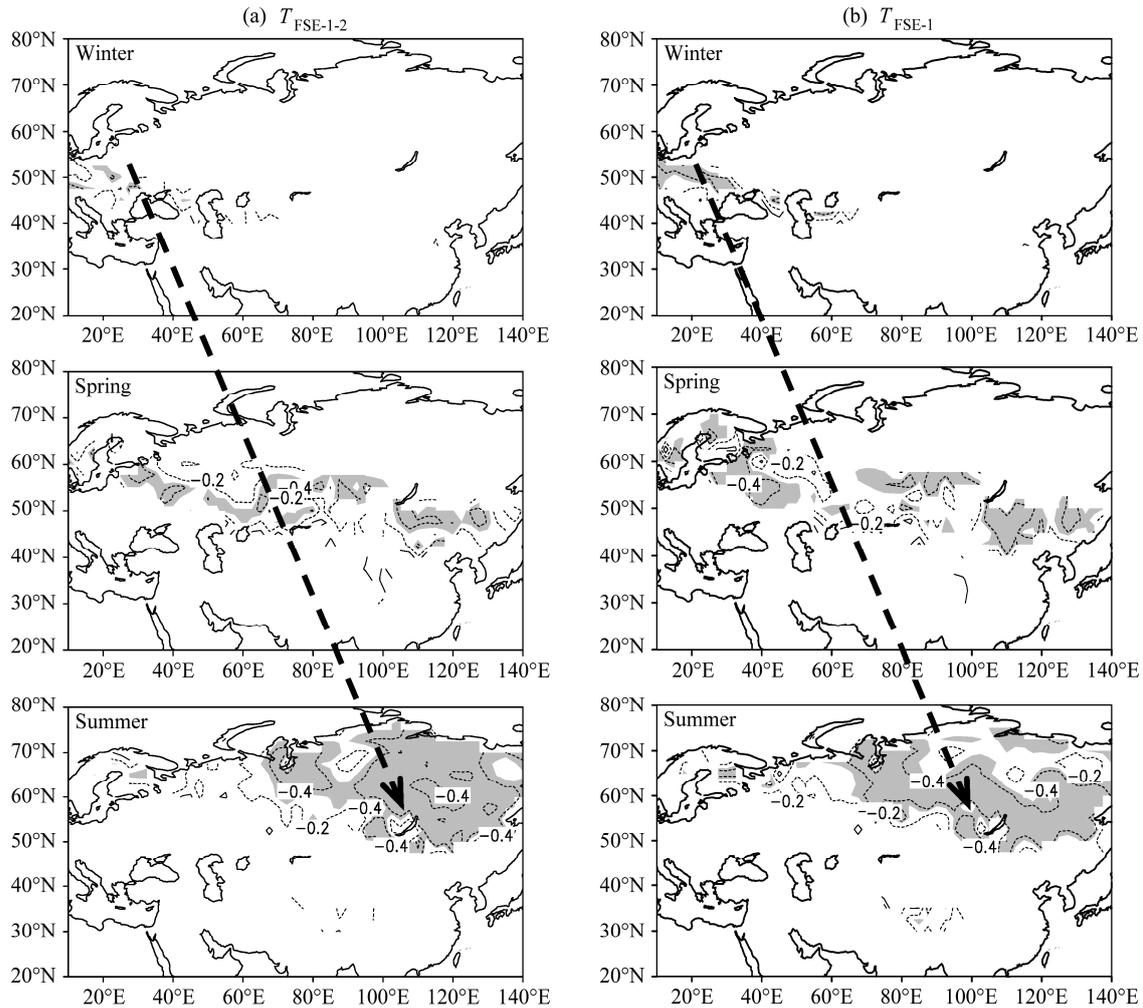


图 19 1967~2002 年 (a) $T_{FSE-1,2}$ 、(b) T_{FSE-1} 分别与冬、春、夏季冻土深度的相关系数分布。阴影区通过 95% 信度检验

Fig. 19 Correlation of (a) $T_{FSE-1,2}$, (b) T_{FSE-1} with frozen soil depth over Eurasia in winter, spring, and summer. Shaded regions are above the 95% confidence level

季增雪面积 $T_{FSE-1,2}$ 和我国夏季气候异常之间隔季相关的物理途径和 T_{FSE} 非常类似而且更为清晰, 同时考虑到 $T_{FSE-1,2}$ 和我国夏季气候异常的关系也更强, 因此, 在气候预测的意义上, $T_{FSE-1,2}$ 可替代 T_{FSE} ; 第二, 欧洲中纬冬季增雪面积 T_{FSE-1} 应该就是 $T_{FSE-1,2}$ (T_{FSE}) 气候效应的关键区, 因为其变化维系了 $T_{FSE-1,2}$ (T_{FSE}) 气候效应的物理途径。

5 欧洲中纬增雪面积、亚洲中纬增雪面积与大气环流关系的季节演变

在陆—气相互作用的角度上, $T_{FSE-1,2}$ 异常时, 大气环流的季节演变异常应该也具有类似于陆面异常的特点, 因此, 图 20a 给出了 $T_{FSE-1,2}$ 分别与冬春夏季 500 hPa 温度场及其大小值年份的风场合成

差值矢量分布。可见, 在欧亚北部, 两者以负相关为主, 其中, 在冬季, 其显著负相关区位于欧洲中纬区, 欧洲东部高纬区盛行异常北风 ($T_{FSE-1,2}$ 偏大时), 这有利于高纬冷空气南下, 进而可能有利于欧洲降雪以及冷冬, 此外还注意到, 亚洲中西部 50°N~60°N 的负相关区 (相关系数小于 -0.2 的区域) 同时也是 “ $T_{FSE-1,2}$ 与冬季雪水当量” 的显著负相关区 (图 16a), 同时, 该区受控于异常北风 (不显著, $T_{FSE-1,2}$ 偏大时), 这说明在冬季, 大气对陆面的影响可能相对主动; 其后春季, 位于欧洲的显著负相关区范围明显减小, 但亚洲中西部高纬区出现了显著负相关区, 该区域也是 $T_{FSE-1,2}$ 与春季雪水当量的显著正相关区 (图 16a), 而此时风场未发生显著异常, 结合 3、4 节的分析 (春季大范围浅层

土壤温度显著异常)可以推测,该区的陆面异常(SWE、土壤温度、冻土)很可能对大气具有相对主动的影响;到夏季,位于欧洲显著负相关区明显减小,但仍然显著,由于大气对异常信号的“记忆”时间很短,再结合前面的分析和推测可知,欧洲冷夏(当 $T_{FSE-1-2}$ 偏大时)应与土壤温度异常偏低有关,另外,春季位于亚洲中西部的显著负相关区向东、向南移至夏季的东亚中纬区,而夏季的这种显著负相关明显加强(表现为显著相关区范围更大),这种东亚中纬区的大范围异常冷夏(当 $T_{FSE-1-2}$ 偏大时)在一方面和大气内部动力过程有关(穆松

宁和周广庆,2012),即,东亚中高纬的异常北风有利于东亚高纬冷空气南侵,进而有利于东亚中纬冷夏,再加上东亚西风带增强的调制作用(穆松宁和周广庆,2010),而东亚高纬区异常偏冷的陆面也有利于东亚中高纬的异常北风的出现(穆松宁和周广庆,2012);另一方面,4.2节的分析表明,东亚中高纬区异常偏低的土壤温度对其应具有相对主动的影响。经过对比发现, $T_{FSE-1-2}$ 和大气环流关系的季节演变特点所反映出来的陆气相互作用较之于 T_{FSE} 的情况更为清晰(也是非常相似的)。

类似地,图20b给出了欧洲中纬冬季增雪面积

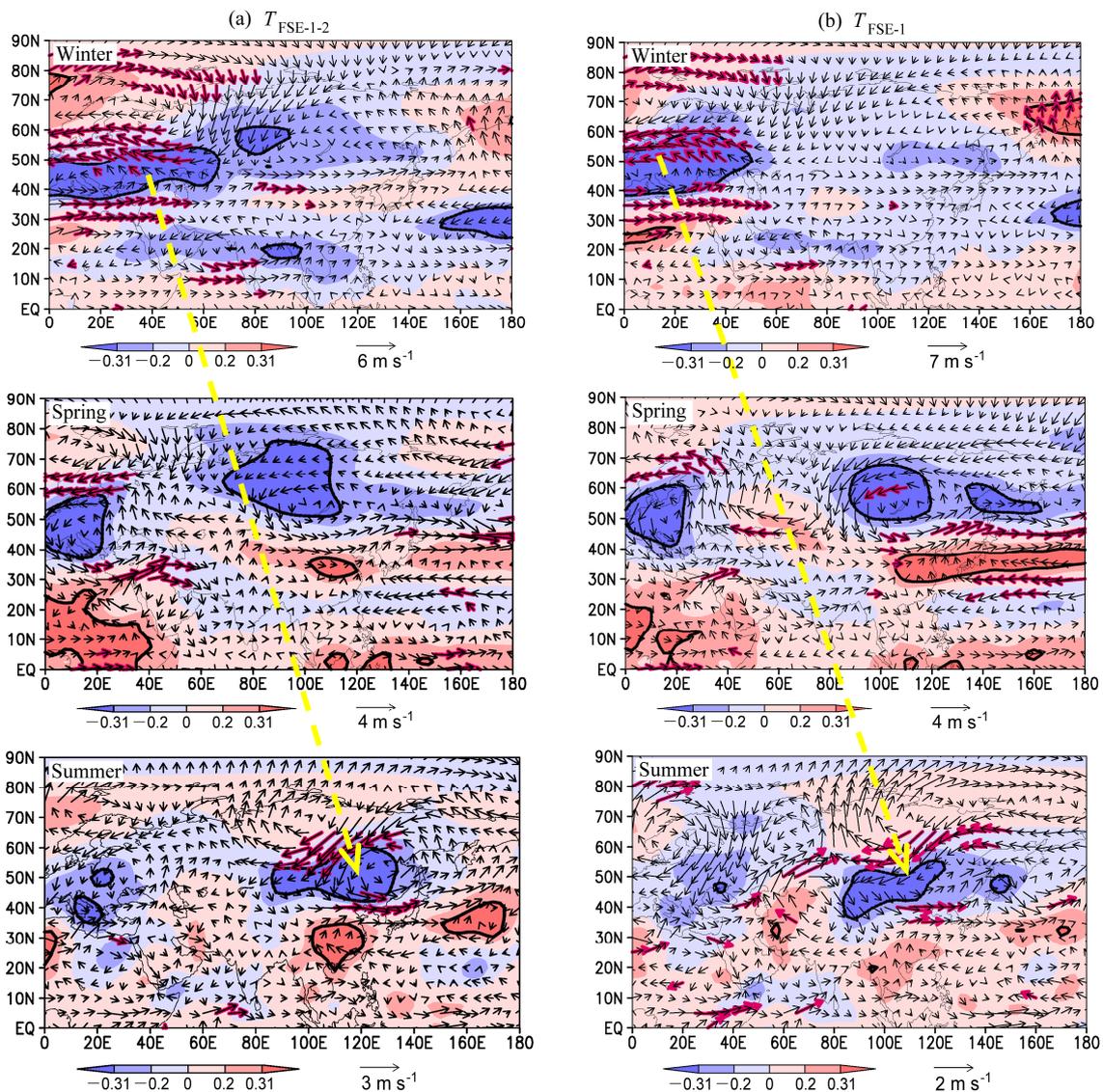


图20 1967~2007年(a) $T_{FSE-1-2}$ 、(b) T_{FSE-1} 分别与冬、春、夏季500 hPa温度场的相关系数分布及相应大、小雪年风场合成差矢量分布。等值线所包含区域的相关系数以及红色粗矢量可通过95%信度检验

Fig. 20 Correlation of (a) $T_{FSE-1-2}$ 、(b) T_{FSE-1} with 500-hPa temperature (shading) in spring and in summer, the corresponding composites of the differences of wind between the heavy- and light-snow years (vectors) for the period 1967–2007. The correlations above 95% confidence level are contoured, and the red vectors for wind also pass the test at 95% confidence level

T_{FSE-1} 与冬春夏季 500 hPa 温度场及其大小值年份的风场合成差值矢量分布, 其情况与 $T_{FSE-1-2}$ 也非常相似, 两者差异主要表现为: T_{FSE-1} 与冬春季 (夏季) 温度场的显著负相关强于 (弱于) $T_{FSE-1-2}$, 其中, T_{FSE-1} 与春季亚洲北部的显著负相关区的向东延伸导致了东亚西风带在春季就出现了明显异常 (T_{FSE-1} 大值年西风带加强), 在异常西风带的调制下, 春季西太平洋副热带高压也出现了明显异常, 然而到了夏季, 东亚中纬温度场与 T_{FSE-1} 的显著正相关区较 $T_{FSE-1-2}$ 的情况偏弱、偏西, 这就使得该区冷夏 (T_{FSE-1} 异常偏大时) 所导致的东亚西风带也偏弱和偏西, 进而导致西太平洋副热带高压的异常不如 $T_{FSE-1-2}$ 的显著, 因此, T_{FSE-1} 与我国夏季降水的关系也不如 $T_{FSE-1-2}$ 显著。但是, 亚洲中纬地区冬季增雪面积 T_{FSE-2} 则仅与夏季大气环流具有显著的相关关系 (类似于 $T_{FSE-1-2}$ 的情况), 与冬春两季的大气环流的关系都很弱, 这也说明 T_{FSE-2} 与我国夏季气候异常之间的“隔季相关”至少不是以陆面的季节演变异常为物理途径的。

综上所述, $T_{FSE-1-2}$ 与欧亚大气环流关系的季节演变特点也大体表现为欧亚北部大气的大范围回暖过程的异常, 这与陆面季节演变异常规律大体一致。另外, 通过本文的分析和推断可知, 在欧亚中高纬, 陆面异常对大气的影 响在春夏季很可能是相对主动的, 同时, 东亚地区的大气内部动力过程也很重要。对于 $T_{FSE-1-2}$ 与我国夏季气候异常之间“隔季相关”的物理途径而言, T_{FSE-1} 起到了至关重要的作用, 因为其变化维系了这种物理途径。

6 结论和讨论

在作者前期工作 (穆松宁和周广庆, 2012) 的基础上, 利用 NSIDC 卫星反演雪盖资料和 ERA40 土壤温度再分析等资料, 对欧亚北部冬季新增雪盖面积 (T_{FSE}) 与我国夏季气候异常之间“隔季相关”的机理进行了更进一步的分析, 目的在于寻找其物理途径的冬季增雪关键区。分析发现, 对于上述“隔季相关”及其机理而言, 起作用的实际上是欧亚中纬冬季增雪面积 ($T_{FSE-1-2}$), 另外, 虽然欧洲中纬冬季增雪面积 (T_{FSE-1}) 与我国夏季气候异常的关系不特别显著, 但其变化维系了上述“隔季相关”的机理。主要结论如下:

(1) 第一, 和 T_{FSE} 相比较, $T_{FSE-1-2}$ 与我国夏季气候异常具有更显著的相关关系, 和 T_{FSE} 相类似,

这种关系比较稳定, 在 1980 年代末之后, $T_{FSE-1-2}$ 与我国江南、淮河流域夏季降水的关系有所增强; 第二, $T_{FSE-1-2}$ 与欧亚北部各陆面要素、与大气环流关系的季节演变规律协调一致, 这和 T_{FSE} 的情况相当一致, 其中, $T_{FSE-1-2}$ 与陆面关系的季节演变规律更显著和清晰, 尤其是与土壤温度关系的季节演变规律较 T_{FSE} 更明确。因此, 综合以上两点可确定, 在气候预测的意义上, $T_{FSE-1-2}$ 可以替代 T_{FSE} 。

(2) 对于 T_{FSE} ($T_{FSE-1-2}$) 与我国夏季气候异常之间的“隔季相关”而言, 欧洲中纬冬季增雪面积 T_{FSE-1} 起关键作用, 因为其变化维系了“隔季相关”的物理途径。

那么, 对于欧亚中高纬冬季增雪面积 $T_{FSE-1-2}$ 的气候效应来说, 为什么欧洲中纬区是冬季增雪面积的关键区? 第一, 图 21a、b、c 分别给出了在欧亚北部, 冬季增雪面积 P_{FSE} 分别与春季雪盖面积本身 P_{SE} 、春季融雪面积 P_{FSE} 、春季雪水当量的相关系数分布, 发现, 欧洲中纬区都是其显著正相关区, 这意味着欧洲中纬区的冬季增雪面积和春季积雪的变化规律比较一致 (相似度比较高), 即, 该区冬季增雪面积变化的异常信号能很好地持续到春季; 第二, 欧洲中纬区是欧亚北部融雪的起点 (西南缘), 这种边界性质的变量往往能比较好地代表其大范围的变化 (如, 西太平洋副热带高压的北界和西界往往能比较好地反映副高的整体变化), 计算表明, 欧洲中纬春季雪盖面积与欧亚北部大范围春季雪盖面积、与大范围春季雪水当量 SWE 都表现为非常显著的正相关 (图略), 也就是说, 欧洲中纬春季雪盖面积变化能较好地反映春季欧亚北部大范围的积雪变化, 可简单表示为: 欧洲中纬冬季增雪与春季积雪相似度高 → 欧洲中纬春季积雪能很好地代表春季欧亚北部大范围积雪变化 → 欧洲中纬冬季增雪也能较好地代表春季欧亚北部大范围积雪变化, 也即, 欧洲中纬冬季增雪面积 T_{FSE-1} 能较好地反映大范围春季融雪进程的异常变化。一方面, 这在很大程度上解释了欧洲中纬冬季增雪面积对 $T_{FSE-1-2}$ (T_{FSE}) 气候效应而言的关键作用, 另一方面, 这也在相当程度上解释了本文的前言所提出的问题: T_{FSE} ($T_{FSE-1-2}$) 如何影响到欧亚春季大范围的融雪进程, 因为恰恰是 T_{FSE-1} 的这种重要作用, 使得 $T_{FSE-1-2}$ (T_{FSE}) 与欧亚春大范围的融雪进程产生关联。

那么, 为什么欧洲中纬冬季增雪 T_{FSE-1} 如此重

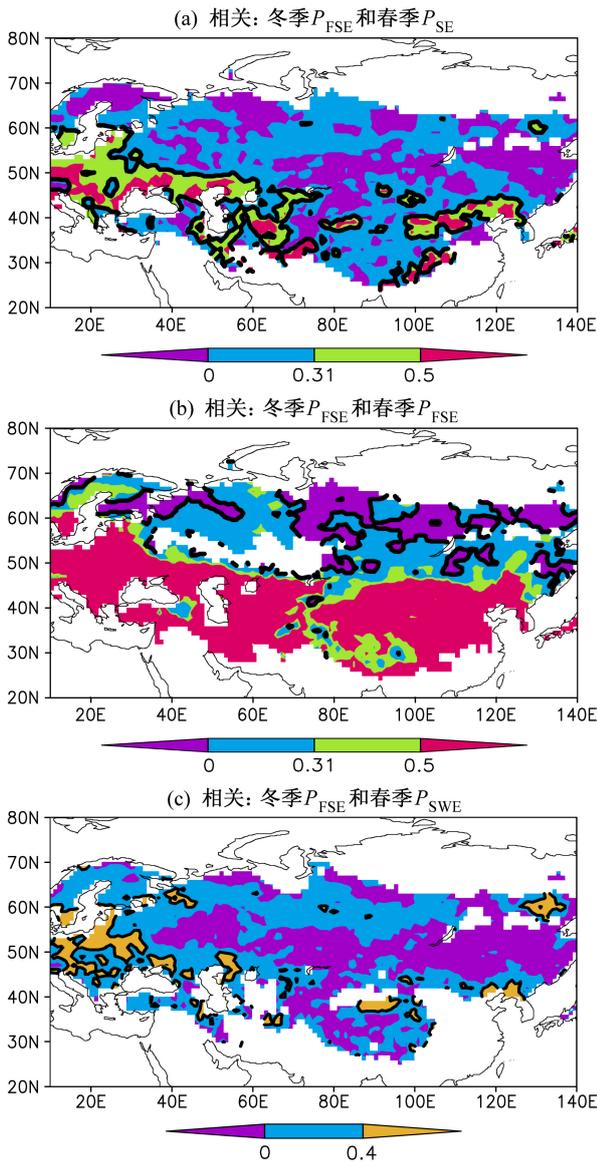


图 21 冬季 P_{FSE} 分别与春季 (a) 雪盖面积 P_{SE} (1967~2007 年)、(b) 融雪面积 P_{FSE} (1967~2007 年)、(c) 雪水当量 SWE (1979~2005 年) 的相关系数分布。等值线所包含区域的相关系数通过 95% 信度检验
Fig. 21 Correlation of P_{FSE} in winter with (a) P_{SE} (1967~2007), (b) P_{FSE} (1967~2007), and (c) SWE (1979~2005) in spring. The contours represent the correlations above 95% confidence level

要、却与我国夏季降水关系不很显著？第一，在十年际变化的角度，由 3.3 节的分析可知， T_{FSE-1} 和 $T_{FSE-1-2}$ 的变化协调一致：在 1980 年代末之后，两者都显著增大、两者关系明显加强、与我国夏季降水的关系也都明显加强（图 9b、11b），即， T_{FSE-1} 和我国夏季降水的关系主要集中在 1980 年代末之后（ $T_{FSE-1-2}$ 亦如此），但亚洲中纬冬季增雪 T_{FSE-2} 则根本不存在类似的十年际变化特点；第二，在年际变化的角度，即使分别扣除 T_{FSE-1} 、 T_{FSE-2} 、 $T_{FSE-1-2}$

的 11 年滑动平均项之后（1972~2002 年）， T_{FSE-1} 和 $T_{FSE-1-2}$ 的相关系数由 0.79 降至 0.68（但仍很显著），而 T_{FSE-2} 和 $T_{FSE-1-2}$ 的相关系数则由 0.66 降至 0.63（变化不大），这说明，十年际变化的贡献对 T_{FSE-1} 的作用来说是较大的。当然，这个解释还不够完善，事实上， T_{FSE-1} 的作用是非常复杂的，本文无法阐述全部，在下一篇文章中作者将继续探讨相关问题。另外，对于亚洲中纬冬季增雪 T_{FSE-2} 而言，虽其与我国夏季气候异常的关系比较显著，但其机理目前还不清楚，其对 $T_{FSE-1-2}$ 气候效应的可能贡献也还有待于进一步研究。

参考文献 (References)

Armstrong R L, Brodzik M J. 2007. Northern Hemisphere EASE-grid weekly snow cover and sea ice extent version 3 [R]. National Snow and Ice Data Center, Boulder, CO, digital media.

陈烈庭. 1998. 青藏高原冬春季异常雪盖与江南前汛期降水关系的检验和应用 [J]. 应用气象学报, 9 (增刊), 9 (S1): 1-8. Chen Lieting. 1998. Test and application of the relationship between anomalous snow cover in winter-spring over Qinghai-Xizang Plateau and the first summer rainfall in southern China [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 9 (S1): 1-8.

陈烈庭, 阎志新. 1979. 青藏高原冬春积雪对大气环流和我国南方汛期降水的影响 [C]//长江流域规划办公室. 中长期水气象预报文集 (第一集). 北京: 水电出版社, 185-194. Chen Lieting, Yan Zhixin. 1979. Impact of Himalayan winter-spring snow cover on atmospheric circulation and on southern Chinese rainfall during the pre-rainy period [M]//Changjiang Water Resource Commission. Collected Papers on Medium- and Long-Term Hydrologic and Meteorological Forecasts (1) (in Chinese). Beijing: Water Conservancy and Power Press, 185-194.

陈乾金, 高波, 李维京, 等. 2000. 青藏高原冬季积雪异常和长江中下游主汛期早涝及其与环流关系的研究 [J]. 气象学报, 58 (5): 582-595. Chen Qianjin, Gao Bo, Li Weijing, et al. 2000. Studies on relationships among snow cover winter over the Tibetan Plateau and droughts/floods during Meiyu season in the middle and lower reaches of the Yangtze River as well as in the atmosphere/ocean system [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 58 (5): 582-595.

陈兴芳, 宋文玲. 2000. 冬季高原积雪和欧亚积雪对我国夏季旱涝不同影响关系的环流特征分析 [J]. 大气科学, 24 (5): 585-592. Chen Xingfang, Song Wenling. 2000. Circulation analysis of different influence of snow cover over the Tibetan Plateau and Eurasia in winter on summertime droughts and floods of China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24 (5): 585-592.

Dash S K, Parth S P, Panda S K. 2006. A study on the effect of Eurasian snow on the summer monsoon circulation and rainfall using a spectral GCM [J]. International Journal of Climatology, 26 (8): 1017-1025.

丁锋, 孙照渤, 刘敬乐. 2009. 青藏高原冬春雪深分布与中国夏季降水的关系 [J]. 南京气象学院学报, 32 (6): 783-791. Ding Feng, Sun

- Zhaobo, Liu Jingle. 2009. Correlations of snow depth over the Tibetan Plateau in winter and spring with precipitation in summer over China [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 32 (6): 783–791.
- Fasullo J. 2004. A stratified diagnosis of the Indian monsoon—Eurasian snow cover relationship [J]. *J. Climate*, 17 (5): 1110–1122.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77 (3): 437–471.
- 李震坤, 武炳义, 朱伟军. 2009. 春季欧亚积雪异常影响中国夏季降水的数值试验 [J]. *气候变化研究进展*, 5 (4): 196–201. Li Zhenkun, Wu Bingyi, Zhu Weijun. 2009. Numerical simulation on effect of spring Eurasian snow cover on summer rainfall in China [J]. *Advances in Climate Change* (in Chinese), 5 (4): 196–201.
- 穆松宁. 2008. 冬季欧亚大陆雪盖面积变化与中国夏季气候异常的关系及其机理研究 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文. Mu Songning. 2008. Relationship between winter northern Eurasian snow extent with summer climate anomalies in China and its mechanism research [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese). Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 143pp.
- 穆松宁, 周广庆. 2009. 欧亚大陆季节增(融)雪盖面积变化特征分析 [J]. *气候与环境研究*, 14 (5): 491–508. Mu Songning, Zhou Guangqing. 2009. Analyses of seasonal fresh snow extent over northern Eurasia [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 14 (5): 491–508.
- 穆松宁, 周广庆. 2010. 冬季欧亚大陆北部新增雪盖面积变化与中国夏季气候异常的关系 [J]. *大气科学*, 34 (1): 213–226. Mu Songning, Zhou Guangqing. 2010. Relationship between winter northern Eurasian fresh snow extent and summer climate anomalies in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 34 (1): 213–226.
- 穆松宁, 周广庆. 2012. 欧亚北部冬季增雪“影响”我国夏季气候异常的机理研究——陆面季节演变异常的“纽带”作用 [J]. *大气科学*, 36 (2): 297–315. Mu Songning, Zhou Guangqing. 2012. Mechanism for the correlation of winter fresh snow extent over northern Eurasia and summer climate anomalies in China: Anomalous seasonal transition of land as a bond [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 36 (2): 297–315.
- 彭京备, 陈烈庭, 张庆云. 2005. 青藏高原异常雪盖和 ENSO 的多尺度变化及其与中国夏季降水的关系 [J]. *高原气象*, 24 (3): 366–377. Peng Jingbei, Chen Lieting, Zhang Qingyun. 2005. Multi-scale variations of snow cover over QXP and tropical Pacific SST and their influences on summer rainfall in China [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 24 (3): 366–377.
- 韦志刚, 罗四维, 董文杰, 等. 1998. 青藏高原积雪资料分析及其与中国夏季降水的关系 [J]. *应用气象学报*, 9 (增刊): 39–46. Wei Zhigang, Luo Siwei, Dong Wenjie, et al. 1998. Snow cover data on Qinghai-Xizang Plateau and its correlation with summer rainfall in China [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 9 (S1): 39–46.
- Wu B Y, Yang K, Zhang R H. 2009. Eurasian snow cover variability and its association with summer rainfall in China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 26 (1): 31–44.
- Wu R G, Kirtman B P. 2007. Observed relationship of spring and summer East Asian rainfall with winter and spring Eurasian snow [J]. *J. Climate*, 20 (7): 1285–1304.
- Wu T W, Qian Z A. 2003. The relation between the Tibetan winter snow and the Asian summer monsoon and rainfall: An observational investigation [J]. *J. Climate*, 16 (12): 2038–2051.
- 许立言, 武炳义. 2012a. 欧亚大陆春季融雪量与东亚夏季风的可能联系 [J]. *大气科学*, 36 (6): 1180–1190. Xu Liyan, Wu Bingyi. 2012a. Linkage between spring Eurasian snowmelt and East Asian summer monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 36 (6): 1180–1190.
- 许立言, 武炳义. 2012b. 欧亚大陆积雪两种物理效应对 2010 年春末夏初华南降水的影响 [J]. *大气科学*, 36 (2): 271–282. Xu Liyan, Wu Bingyi. 2012b. Two physical effects of Eurasian snow cover on the late-spring and early-summer rainfall in South China of 2010 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 36 (2): 271–282.
- 许立言, 武炳义. 2012c. 欧亚大陆积雪与 2010 年中国春末夏初降水的关系 [J]. *高原气象*, 31 (3): 706–714. Xu Liyan, Wu Bingyi. 2012c. Relationship between Eurasian snow cover and late-spring and early-summer rainfall in China in 2010 [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 31 (3): 706–714.
- Yang S, Xu L Z. 1994. Linkage between Eurasian winter snow cover and regional Chinese summer rainfall [J]. *International Journal of Climatology*, 14 (7): 739–750.
- 杨琨, 武炳义. 2009. 欧亚大陆积雪与亚洲季风关系研究进展 [J]. *气象科技*, 37 (3): 263–270. Yang Kun, Wu Bingyi. 2009. Advances in researches on relationship between Eurasia snowcover and Asian monsoon [J]. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 37 (3): 263–270.
- Yasunari T, Kitoh A, Tokioka T. 1991. Local and remote responses to excessive snow cover mass over Eurasia appearing in the northern spring and summer climate—A study with the MRI GCM [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 69 (4): 473–487.
- Ye H C, Bao Z H. 2005. Eurasian snow conditions and summer monsoon rainfall over South and Southeast Asia—Assessment and comparison [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 22 (6): 877–888.
- 张顺利. 1999. 青藏高原对中国东部气候与天气异常的影响及雅鲁藏布江流域的水平衡研究 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 131pp. Zhang Shunli. 1999. Influences of the Tibetan Plateau on climatic and weather anomaly over eastern China and water balance of the Yarlung Zangbo River basin [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 131pp.
- Zhao P, Zhou Z J, Liu J. 2005. Variability of Tibetan spring snow and its associations with the hemispheric extratropical circulation and East Asian summer monsoon rainfall: An observational investigation [J]. *J. Climate*, 20(15): 3942–3955.
- 郑益群, 钱永甫, 苗曼倩, 等. 2000. 青藏高原积雪对中国夏季气候的影响 [J]. *大气科学*, 24 (6): 761–774. Zheng Yiqun, Qian Yongfu, Miao Manqian, et al. 2000. Effect of the Tibetan Plateau snow cover on China summer monsoon climate [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 24 (6): 761–774.
- 朱玉祥, 丁一汇. 2007. 青藏高原积雪对气候影响的研究进展和问题 [J]. *气象科技*, 35 (1): 1–8. Zhu Yuxiang, Ding Yihui. 2007. Influences of snow cover over Tibetan Plateau on weather and climate: Advances and problems [J]. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 35 (1):

- 1-8.
- 朱玉祥, 丁一汇, 徐怀刚. 2007. 青藏高原大气热源和冬春积雪与中国东部降水的年代际变化关系 [J]. 气象学报, 65 (6): 946-958. Zhu Yuxiang, Ding Yihui, Xu Huaigang. 2007. The decadal relationship between atmospheric heat source of winter and spring snow over Tibetan Plateau and rainfall in East China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 65 (6): 946-958.
- 左志燕, 张人禾. 2012. 中国春季降水异常及其与热带太平洋海面温度和欧亚大陆积雪的联系 [J]. 大气科学, 36 (1): 185-194. Zuo Zhiyan, Zhang Renhe. 2012. The anomalies of spring rainfall in China and its relation with tropical Pacific SST and Eurasian snow [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (1): 185-194.
- 左志燕, 张人禾, 武炳义. 2011. 1979~2004 年中国大陆南方地区春季降水的年代际变化特征及其与欧亚大陆积雪的联系 [J]. 中国科学 (D 辑), 41 (11): 1688-1696. Zuo Z Y, Zhang R H, Wu B Y. 2011. Inter-decadal variations of springtime rainfall over southern China mainland for 1979-2004 and its relationship with Eurasian snow [J]. Sci. China (Earth Sci.), 55 (2): 271-278.