

何永利, 丁磊, 李冬冬, 等. 全球变暖过程中海陆增温差异特征研究进展[J]. 干旱气象, 2019, 37(5): 703-712, [HE Yongli, DING Lei, LI Dongdong, et al. Research Review on the Contrast of Land and Ocean Warming Features Under the Global Warming[J]. Journal of Arid Meteorology, 2019, 37(5): 703-712], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2019)-05-0703

全球变暖过程中海陆增温差异特征研究进展

何永利, 丁磊, 李冬冬, 黄建平, 李昶豫, 秘鲁

(兰州大学半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州大学大气科学学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要:全球变暖过程中, 陆表平均升温幅度显著大于海表, 即海陆增温差异现象。随着全球气温持续升高, 海陆气温增幅的差异不断增大, 但海陆增温比基本保持恒定, 海陆增温比最大出现在中高纬地区。本文总结了全球变暖过程中海陆增温差异现象的研究现状, 从气候系统对温室气体等外强迫的瞬时响应和平衡态响应两个角度介绍海陆增温差异的形成机制。结果表明: 海陆热容量差异是海陆增温差异形成的原因之一, 而大气湿度与垂直减温率反馈是造成海陆增温差异的主要原因, 且海表温度强迫和植被蒸腾、地表蒸发、云量、降水和相对湿度的变化对海陆增温差异的形成有一定贡献。模式模拟的海陆增温比与观测结果基本一致, 但在北半球中高纬度地区被严重低估, 这可能与常绿针叶林扩张引起的反照率反馈和阻塞高压与海陆热力差异之间的反馈有关。

关键词:海陆增温差异; 全球变暖; 气候模拟; 反馈机制

文章编号:1006-7639(2019)05-0703-10 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2019)-05-0703

中图分类号:P461+.2

文献标志码:A

引言

自工业革命以来, 大气中二氧化碳(CO_2)等温室气体的浓度不断升高, 引发了以全球变暖为主要特征的气候系统响应。理解气候系统对外强迫的响应机制是气候变化领域最重要的目标之一。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)的第三次评估报告针对温室气体浓度升高进行大量敏感性实验研究, 包括 CO_2 浓度加倍试验($2\times\text{CO}_2$)和每年以1%速率增加试验($1\text{petCO}_2, 1\text{petto}2\text{x}$), 用于探究地表气温的平衡态响应和瞬时响应^[1]。多模式模拟的集合平均结果显示, 地表气温对 CO_2 浓度升高的响应存在两个显著特征, 一是北半球高纬度地区的急剧增温, 也称“北极放大”(Arctic amplification)现象, 二是陆地增温幅度明显大于海洋^[1-3], 即海陆增温差异现象。因此, 理解海陆增温差异的形成机制对预测未来气候变化特征非常重要。

观测资料和气候模式模拟结果发现, 20世纪以来陆地和海洋气温不断升高, 且模式预测增温

很可能在21世纪持续下去^[4-7], 其中干旱半干旱地区是近百年来地表增温最显著的地区之一, 尤其在北半球冬季, 该地区对全球陆地增温的贡献达44%^[8-9], 表明在海陆增温差异持续增大的过程中干旱半干旱区对海陆增温差异的变化有重要贡献。此外, 由于降水稀少、植被稀疏、生态环境脆弱, 干旱半干旱区发生显著增温的同时, 也表现出明显的干旱化趋势。利用历史观测数据对耦合模式比较计划第5阶段(CMIP5)的预测结果进行订正后发现, 在温室气体高浓度排放情景(RCP8.5)下, 全球干旱半干旱区面积在21世纪末将扩展至56%^[10]。因此, 理解海陆增温差异的形成机制有利于认识干旱区的温度变化, 更好地应对未来干旱化趋势。

此外, 理解海陆增温差异现象可能会影响到气候变化适应政策的制定。联合国气候变化框架公约巴黎会议上提出欲将全球平均增温控制在 $2\text{ }^\circ\text{C}$ 甚至是 $1.5\text{ }^\circ\text{C}$ ^[11]。然而, HUNTINGFORD等^[12]模拟结果指出, 当全球平均增温达 $1.5\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 由于海陆增温的差异, 陆地许多地区增温幅度高于 $1.5\text{ }^\circ\text{C}$, 部分地

收稿日期: 2018-09-04; 改回日期: 2019-01-04

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA2006D10301)、国家自然科学基金(4521004, 41705047, 41875083)、兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金(lzujbky-2017-bt04, lzujbky-2017-70)共同资助

作者简介: 何永利(1988-), 男, 河北唐山人, 讲师, 主要从事半干旱气候变化机理研究。E-mail: heyongli@lzu.edu.cn。

通信作者: 黄建平。E-mail: hjp@lzu.edu.cn。

区甚至高于 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。可见,气候政策所给出的增温阈值不足以限制陆地上的过度增温。为了应对未来气候变化,理解海洋和陆地对全球变暖的不同响应对制定气候变化减缓政策也是非常重要的。

近年来,利用数值模式的敏感性试验(通常是 CO_2 浓度加倍试验)研究海洋与陆地增温对全球变暖的瞬时响应和平衡态响应及其物理机制,发现海陆热容量差异并不是海陆增温差异形成的主要原因,而大气垂直减温率、云量、海表温度(SST)、植物蒸腾、大气环流、森林反照率等物理过程在海陆增温差异形成过程中发挥重要作用^[4,6,13-19]。这些研究大大提高了对海陆增温差异形成原因的认识。本文对全球变暖过程中海陆增温差异现象及其平衡态响应和瞬时响应的物理机制进行归纳总结,以期对未来海洋和陆地温度变化机制和模拟研究提供一点借鉴。

1 全球变暖过程中海陆增温差异现象

20 世纪 90 年代以来,随着气候模式模拟能力的显著提高,利用气候模式针对温室气体和其他强迫因子开展了大量敏感性试验研究。STOUFFER 等在 1980—1990 年代进行了 CO_2 浓度敏感性模拟试验(每年以 1% 速率增加),结果反映出瞬时响应与平衡态响应中的海陆增温差异^[20-22],与后来 IPCC 第三次评估报告中描述的模式结果一致。在这个试验中, CO_2 造成的辐射强迫变化与 20 世纪 80 年代以来由温室气体造成的辐射强迫变化几乎等同,说明模式模拟结果与观测具有可比性,但碍于当时观

测资料长度不足,无法进行对比。最近,STOUFFER 等将 1991—2015 年的观测资料与当时的模拟结果进行对比,发现模式模拟结果与观测资料都存在很明显的海陆增温差异现象^[23]。可见,海陆增温差异现象是气候系统对温室气体增加产生的响应特征之一。

海陆增温差异现象的另一主要特征是海陆增温比基本保持恒定^[4,6,13,24]。SUTTON 等^[4]利用 IPCC 第四次评估报告中 20 个气候模式不同试验的模拟结果,研究 CO_2 浓度加倍后海陆增温的响应。试验 1 (1pc - stab)中, CO_2 浓度在工业革命前水平上以每年 1% 的速率增加,在第 70 年时增至 2 倍,之后保持浓度不变继续模拟 70 a;试验 2 (1pc - cont),前 70 a 同试验 1,而后 70 a 的 CO_2 浓度继续以每年 1% 的速率增加,在第 140 年时增至 4 倍,结果见图 1。可以看出,各模式中的海陆增温比在 1.36 ~ 1.84 之间,平均值 1.55,标准差 0.13。试验 1 中,在后 70 a 的模拟中,大部分模式的海陆增温比略有(约 10%)下降,这可能是海洋响应逐渐达到平衡态的结果。尽管后期存在下降,但海陆增温比仍然显著大于 1。试验 2 中,在 CO_2 浓度持续升高情形下,各模式模拟的海陆增温比变化均小于 10%,故认为海陆增温比不随时间变化。JOSHI 等^[6]计算了 IPCC 第四次评估报告中未来情景 A1B 下海陆增温比的变化,得到类似结论,海陆增温比平均为 1.37 ~ 1.53。以上表明,海陆增温比可以独立于气候系统和气候强迫,它并不随 CO_2 浓度增加而发生变化,可成为预测未来增温分布的重要指标。

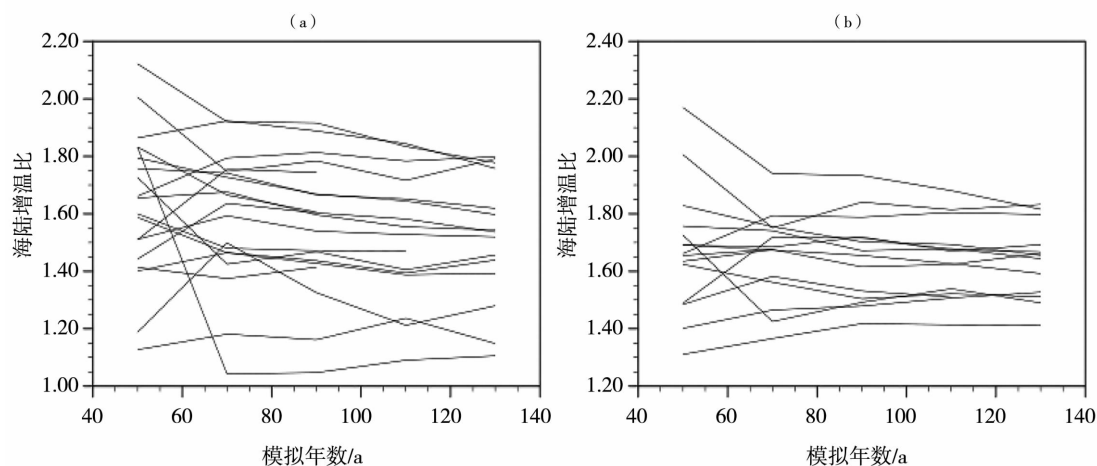


图 1 试验 1(a)和试验 2(b)模拟的海陆增温比年变化^[4]

Fig. 1 The annual change of land and sea warming ratio simulated by 1pc - stab test (a) and 1pc - cont test (b)^[4]

基于海陆增温比恒定现象,SUTTON 等^[4]利用 HadCRUT2v 观测资料进一步对比了模式模拟的海陆增温比随纬度的分布情况(图 2)。结果表明,低

纬度地区海陆增温比最小,多模式平均为 1.2,中高纬地区海陆增温比最大,多模式平均为 1.5 ~ 1.7;与观测对比发现,模式基本模拟出了海陆增温比随

纬度的分布,尤其在低纬度地区,但北半球中高纬度地区模拟与观测的差异最大,大部分模式没能模拟出极大值,表明这些模式可能未抓住导致中高纬海陆增温出现巨大差异的关键物理机制。中高纬度陆表的显著增温与干旱半干旱地区的冬季强化增温联系紧密,而干旱半干旱区相关的物理过程参数化方案,尤其是土壤湿度对温度和降水的响应等^[14-15,25],是模式不确定性的主要来源之一,这可能是中高纬度海陆增温比模式低估的原因。

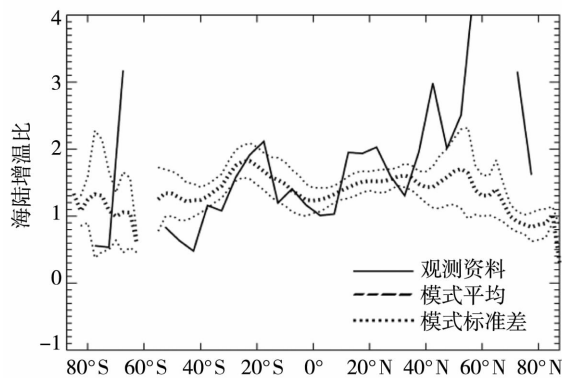


图2 模拟和观测(HadCRUT2v 观测资料)的海陆增温比随纬度分布^[4]

Fig.2 The distribution of simulated and observed (HadCRUT2v data) land and sea warming ratio with the latitude^[4]

2 全球海陆增温差异的形成机制

前文得知,海洋和陆地的热容量差异并不是海陆增温差异的最主要原因。在 CO_2 浓度加倍试验中,当陆地和海洋表面气温对温室气体辐射强迫的响应达到平衡态后,海陆增温并未趋于一致,海陆增温比仍然显著大于1,说明平衡态中海陆热容量差异并不是造成海陆增温差异的主要因素^[4,6,13]。

此外,一些研究也从其他方面尝试解释海陆增温差异的形成。BOER 等^[16]通过耦合气候模式中大气层顶的平均辐射通量,研究气候反馈参数的空间分布,发现尽管地表气温变化存在明显的海陆差异,但是气候反馈参数的海陆差异并不明显,大气层顶 CO_2 的辐射强迫也不存在海陆差异;人类活动产生的气溶胶的辐射强迫虽然存在海陆差异,但是气溶胶辐射效应减缓了陆地的增暖,进而减小海陆增温差异。可见,海陆增温差异也并不是气候反馈参数、 CO_2 和气溶胶辐射强迫存在海陆差异造成的。

排除上述因素,JOSHI 等巧妙设计了一组实验,寻找海陆增温差异形成的线索^[6]。他利用大气环流模式(HadGAM1),在控制试验(AMIP)中以观测

的月平均海表温度(SST)作为下边界条件;扰动试验中,分别将 SST 均匀增加 4 K (AMIP +4K) 和减小 4 K。试验中不存在其他外部辐射强迫输入,陆上升温(降温)的能源(能汇)只能是海洋。结果发现,在扰动试验中,陆地气温升高(降低)幅度超过 4 K,陆地与海洋气温升高(降低)幅度之比约 1.4(1.3),与 CO_2 浓度加倍试验中得到的海陆增温比相当。在该试验中,尽管初始时刻能量分配海陆差异巨大,但最终的海陆增温比仍与 CO_2 浓度加倍试验的结果相当,说明海陆增温差异可能由海陆局地反馈机制的差异造成,而不是 CO_2 辐射强迫造成的。BYRNE 等通过湿静力能守恒推导出陆地增温幅度由同纬度海表温度决定,这也证明了陆地增温是对海洋增温的响应^[17-19]。这组实验首次发现局地反馈机制的重要性,为后续研究平衡态响应和瞬时响应奠定了基础。

2.1 平衡态响应中的反馈机制

许多学者^[4,6,13]认为,海洋和陆地上大气湿度不同,因而全球变暖过程中与大气湿度相关的局地反馈机制存在海陆差异,是海陆增温差异产生的重要因素。

JOSHI 等^[6]建立一个简单的概念模型,以大气垂直减温率变化来解释平衡态响应中海陆增温差异现象,并使用大气环流模式(HadGAM1)模拟结果证实了该理论模型。该概念模型假设大气中存在一个临界高度,在此高度之上不存在海陆增温差异,而在此高度之下海洋和陆地上的局地反馈过程——大气垂直减温率存在差异。根据 HadGAM1 模式的模拟结果,此临界高度平均为 4000 m(600 hPa)。如图 3 所示,控制试验(control)中,在临界高度(4000 m)以上,大气垂直减温率不存在海陆差异,而在临界高度之下,大气垂直减温率存在海陆差异,且陆地上的大气垂直减温率大于海洋。这是因为陆地上空气相对湿度较低,大气垂直减温率 Γ_l 更接近于干绝热递减率 Γ_d ,而海洋上空气相对湿度高,大气垂直减温率 Γ_o 更接近于湿绝热递减率 Γ_w 。根据克劳修斯-克拉伯龙方程得知,随着全球气温的升高,大气饱和比湿 q_s 增加,湿绝热递减率 Γ_w 随之减小,而干绝热递减率 Γ_d 不变。因此,随着全球气温的升高, Γ_l 减小的幅度小于 Γ_o ,这一推测为数值试验所证实。另外,相对于控制试验,扰动试验(AMIP +4K)中陆地大气垂直减温率减小的幅度确实小于海洋大气垂直减温率减小幅度。从图 4 也可以看到,海洋上大气垂直减温率减小的幅度总体上大于 $0.5 \text{ K} \cdot \text{km}^{-1}$,陆地总体上则小于 $0.5 \text{ K} \cdot \text{km}^{-1}$ (绿色、蓝色)。

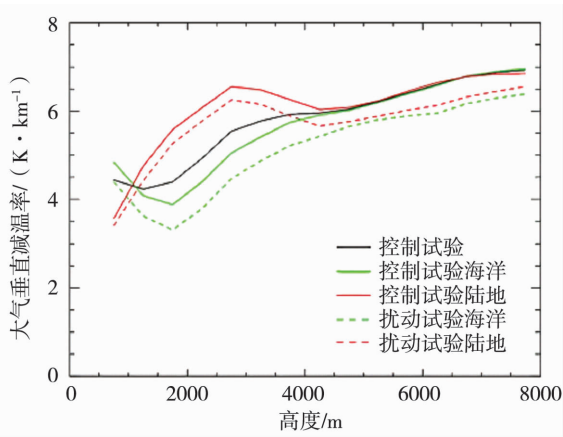


图3 HadGAM1 模式模拟的大气垂直减温率^[6]

Fig. 3 The lapse rates simulated by the HadGAM1 AMIP and AMIP + 4K experiments^[6]

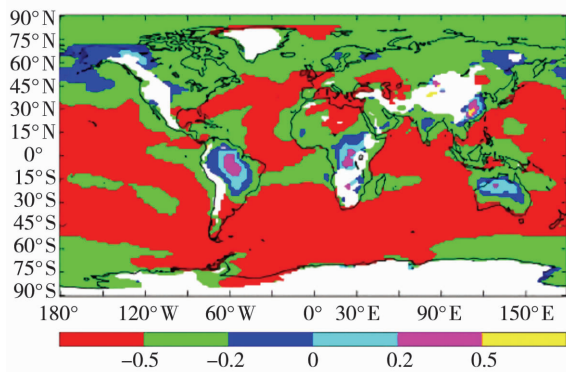


图4 HadGAM1 模式中扰动试验 (AMIP + 4K)

与控制试验 (AMIP) 模拟的 1000 ~ 3000 m 大气层平均垂直减温率之差 (单位: $K \cdot km^{-1}$)^[6]

Fig. 4 The difference of simulated average lapse rate from 1000 m to 3000 m between the HadGAM1 AMIP and AMIP + 4K experiments (Unit: $K \cdot km^{-1}$)^[6]

假设在临界高度之上陆地和海洋上的大气增温幅度相同,由于陆地大气垂直减温率 Γ_l 减小的幅度小于海上大气垂直减温率 Γ_o 。减小幅度,则陆地表面大气的增温幅度比海洋表面大。假如,地面上空 3 km 处气温从 280 K 升至 281 K,而地面上空边界层的大气垂直减温率 Γ 可表示为:

$$\Gamma \approx 0.5(RH \times \Gamma_w + (1.0 - RH) \times \Gamma_d) \quad (1)$$

式中:RH 为大气相对湿度; Γ_w 为湿绝热递减率,而 Γ_d 为干绝热递减率 ($K \cdot km^{-1}$)。

根据大气垂直减温率可反推出地表气温的变化幅度。当相对湿度 $RH = 0.7$ 时,地表气温增幅 0.78 K;当相对湿度 $RH = 0.65$ 时,地表气温增幅 0.79 K;当相对湿度 $RH = 0.2$ 时(非常干的大气),地表气温增幅 0.94 K。一般而言,陆地大气边界层的相对湿度远小于海洋,在全球变暖过程中陆表气温增幅大于海表气温增幅。另外,相对湿度越小的

地区(如干旱半干旱区),地表空气升温幅度越大,这种大气湿度-垂直减温率反馈机制可用来解释北半球中纬度干旱半干旱地区冷季强化增温现象^[8]。相较于湿润地区,干旱半干旱地区的大气水汽含量较少,大气垂直减温率更趋向于干绝热减温率,当温度升高时,相较于湿润地区的大气垂直减温率的减小幅度更小。因此,当在临界高度之上有相同的增温时,干旱半干旱地区的地表增温较湿润区更加显著。

此外,在全球变暖过程中陆地土壤水分对蒸发的限制也可增大陆地局地升温幅度^[6]。全球变暖使得陆上局地蒸发增加,土壤水分随之消耗。当土壤湿度下降到一定程度时,水分蒸发受到限制(越是干旱地区,土壤蒸发越容易被限制,而在湿润地区和海上则不存在这种限制),大气边界层从土壤水分蒸发过程中获得的水汽减少,边界层的相对湿度随之降低,进而使得陆上的大气垂直减温率增加,增大陆表大气的升温幅度,导致海陆增温差异加大。因此,大气湿度和垂直减温率反馈机制被认为是平衡态响应中海陆增温差异的主要原因。

2.2 瞬时响应中的反馈机制

大气湿度-垂直减温率反馈主要是针对平衡态响应或年平均尺度上响应的情形,而针对瞬时响应或短时间内海陆增温差异的形成过程可能并不适用。因此,需研究更短时间尺度上(几天至几周)大气对外强迫的瞬时响应过程中海陆增温差异的形成机制。

DONG 等^[13] 利用 HadAM3 大气环流模式分别进行 CO_2 浓度突然加倍(SST 为 1961—1990 气候态平均)和 SST 突然增加(取 HadAM3 与海洋环流模式耦合模拟的 CO_2 浓度加倍试验中 SST 升高的幅度)试验,研究在几天至几周时间尺度上初始海陆增温差异的形成机制。结果发现,在 CO_2 浓度突然加倍试验中,由于 SST 固定不变,海陆增温比仅 0.5 左右;在 SST 突然增加试验中,不论 CO_2 浓度是否加倍,海陆增温比均超过或接近 1。这说明 SST 强迫是海陆增温差异形成的主要原因,它可以分别解释 12 月和 6 月海陆增温差异的 80% 和 64%。另外,植物气孔阻抗(气孔阻抗是指大气中的 CO_2 向叶片内部扩散、叶片内的水汽向大气扩散时,在叶片内部遇到的阻力)变化导致的植物蒸腾量减少在 6 月海陆增温差异形成过程中发挥重要作用,植物气孔响应可能比 SST 强迫更敏感、更快。

因此,综合 SST 强迫、气孔阻抗、辐射变化等因子的瞬时响应,在外强迫作用下海陆增温差异的演变过程可总结如下:(1)在响应的第 1 天,在 CO_2 浓

度加倍试验中,温室效应导致陆地接收的向下长波辐射增加,陆地表面气温升高,而海洋上空大气的温室效应则很弱;在 SST 增加试验中,陆地升温很小,而海洋表面向上的热通量、蒸发、降水都迅速增加,大气边界层增温非常迅速。(2)在响应的第2至5天,在 CO₂ 浓度加倍试验中,植物气孔阻抗作用的变化使得植物蒸腾量减少,大气中水汽和云量随之减少,陆地接收的短波辐射增加,造成陆表增温加剧,但在第5天,地表与对流层气温的响应已接近平衡态;在 SST 增加试验中,海上对流层大气的温度和湿度都迅速增加,且自海表向上蔓延,而陆地表面升温很慢,且增温现象同时发生于整个对流层。(3)在响应的第6至20天,在 CO₂ 浓度加倍试验中,陆地和海洋上空大气调整相当小;在 SST 增加试验中,陆地和海洋上空大气继续升温,最大升温区位于对流层上部。对流层上部(包括陆地和海洋上空)的增温是由湿绝热递减率的减小造成^[6]。在第20天,整个对流层的响应已接近于平衡态。虽然在 CO₂ 浓度加倍试验和 SST 增加试验中,云量减少引起的向下短波辐射增加均导致陆地剧烈增温,但两试验云量减少的原因不同。其中,前一试验中植物阻抗变化导致蒸腾量减少,从而造成陆地上空云量减少,但土壤湿度是增加的;而后一试验中由于海洋输送到陆地上空的水汽减少造成陆地上空云量减少,而陆上蒸发量略有增加,故而土壤湿度下降。

综上所述,在大气对 CO₂ 辐射强迫的瞬时响应过程中,大气对 SST 变化的响应是海陆增温差异形成的主要因素,且与植物蒸腾、地表蒸发、云量、降水、相对湿度等因子有关的反馈机制对海陆增温差异的形成发挥重要作用。需要注意的是,在实际气候变化中,SST 并不是一种强迫,而是气候系统的一部分,部分 SST 的变化是对于外强迫的响应,它可能在年代际尺度上产生作用。

3 中高纬度海陆增温差异的反馈机制

前文归纳的研究侧重于解释全球平均海陆增温差异的形成机制,但对于中高纬地区表现的海陆增温比最大的现象没有给出解释,且所有的机制解释(大气垂直减温率、植物蒸腾、地表蒸发、云量、降水等)均与大气湿度变化有关,而对气候系统中其他因子(如大气环流、海洋环流、植被覆盖、冰雪覆盖等)的反馈作用几乎没有涉及,这显然是不全面的。在全球变暖背景下,非均匀增暖现象不仅存在于海陆之间,陆地增温也表现出极强的非均匀性,如干旱半干旱区增温、极地增温、高海拔地区的增温均高于

全球平均值。最近的一些研究给出了造成陆地非均匀增温的反馈机制,指出北半球中高纬海陆热力差异的变化与大气阻塞高压环流变化之间存在正反馈机制,加剧中高纬陆地表面的增温幅度^[26-27];全球变暖与西伯利亚地区常绿针叶林扩张之间存在正反馈机制,加剧西伯利亚地区的局地增温^[28]。这两种正反馈机制在一定程度上解释了中高纬海陆增温比出现极大值的原因。

3.1 海陆热力差异与大气阻塞高压的正反馈机制

北半球海陆热力差异随着季节变化而变化,并影响着海陆间温度梯度的方向和大小,有利于推动季风的形成和海陆间大气质量的交换。大气质量的海陆间迁移通过影响永久性和半永久大气活动中心,进而对中国乃至北半球气候产生重要影响^[29-32]。阻塞高压(简称阻高)作为一种对地面温度有重要影响的天气系统,在全球变暖背景下如何响应?这对陆地增温有重要意义。最新研究表明,阻高的变化与海陆热力差异之间存在正反馈机制。在北半球中高纬度,冬(夏)季陆地为冷(热)源,海洋为热(冷)源,在全球变暖过程中冬季纬向海陆热力差异减小,夏季纬向海陆热力差异则增大。此外,在地形和热力强迫作用下,大气环流可出现经向型(大振幅阻高环流)和纬向型(平直西风环流)两种平衡态环流,纬向热力差异的增大和经向热力差异的减小有利于经向型环流的出现^[33-35]。SHABBAR 等^[36]研究了北大西洋涛动(NAO)位相与阻高发生频率和持续时间的关系,发现在 NAO 正位相时(强西风),由于大气阻高活动减少,地表气温呈现“冷海洋/暖大陆(COWL)”分布型。LUO 等^[37]研究指出,当西风风速较大时,大气阻塞高压活动减少且持续时间缩短。因此,全球变暖过程中,纬向海陆热力差异、西风风速的变化可导致大气阻高流型发生频率变化。

HE 等^[26]利用观测资料研究发现,在全球变暖过程中,北半球冬季阻高发生频率显著减小,与海陆热力差异减小形成正反馈,进一步增大冬季陆地增温的幅度。其机制是,当北半球大气因温室效应开始变暖时,冬季地表温度距平呈现“冷海洋/暖大陆”的分布型,导致纬向海陆热力差异减小,不利于大气阻高的出现。另外,纬向海陆热力差异减小也导致行星波活动减弱,使得北半球 60°N 以北地区高层大气 EP 通量辐合减弱,在中高纬度出现自下而上的西风正异常,不利于大气阻高的出现和维持。大气阻高的减少、纬向型环流的增多,不仅减弱大气经向热量交换,而且西风气流向大陆西岸平流输送

更多海洋上的暖湿空气,有利于陆地增温幅度增大,海陆热力差异进一步减小。因此,冬季海陆热力差异变化与大气阻高环流变化之间形成正反馈。

近几十年来夏季的海陆热力差异正逐渐加大,且未来这种现象仍然存在^[38-40]。HE 等^[27]研究了夏季大气阻高、海陆热力差异与双急流波导之间的正反馈机制(图 5),发现当大气中 CO₂ 浓度不断上升时,夏季陆地逐渐变得比海洋更暖,海陆热力差异逐渐增大。不断增大的海陆热力差异作为一种外强迫,引起行星波在高纬度中高层大气中 EP 通量辐合减弱,导致 70°N 附近西风正异常。当海陆热力差异处于较大的正距平时,高纬度西风正异常较大,激发出极锋急流,与副热带西风急流形成双急流结构。然而,CO₂ 的辐射强迫导致副热带急流位置北移,夏季海陆热力差异增大使得极锋急流南移,导致双急流间距变得更为狭窄^[41-42]。依据 PETOUKHOV 的理论^[43-44],通常情况下纬向波数为 6~8 的自由行星波的振幅较小,其能量可以有效地向极地和赤道频散。当纬向西风在 45°N 和 70°N 处形成双急流结构时,自由波的能量被捕获于双急流结构内,很少向急流边界外频散,且当捕获的 6~8 波自由波与热力、地形强迫产生的行星波波数相近时,可产生共振,致使 6~8 波自由波的振幅显著增大,进而增大阻高的振幅或发生频率。夏季,阻高事件易造成陆地上高温热浪事件的频发,进一步增大海陆热力差异。因此,夏季海陆热力差异、双急流结构和大气阻高之间形成的正反馈机制,加剧了北半球中高纬度陆地夏季的增温幅度。可见,冬季和夏季的反馈机制都是在 CO₂ 等温室气体强迫下海陆热力差异发生变化时被激发,进而造成北半球中高纬度阻高影响区域显著增温,导致该纬度海陆增温差异偏大。

3.2 常绿针叶林扩张与局地增温的正反馈机制

在全球变暖过程中,生态系统也发生着显著变化,进一步改变局地气候,产生显著增温现象,如西伯利亚地区常绿针叶林的扩张。西伯利亚地区位于全球最剧烈的增温中心区域,水分利用效率、生长季温度的变化以及干扰机制(火灾、冻土等)均能够显著影响森林的组成、结构与功能^[45-47]。KHARUK 等^[48-49]通过野外观测试验,发现西伯利亚地区的落叶针叶林正向常绿针叶林转变。与落叶针叶林相比,常绿针叶林反照率更小,吸收太阳辐射更多。需要注意的是,在冬季落叶林落叶之后,积雪覆盖地表,落叶林对地表反照率的影响不大(约为 0.3),而常绿针叶林常年不落叶,对冬季积雪和地表反照率的影响较大(约为 0.15)^[50-52]。HE 等^[27]研究发现,

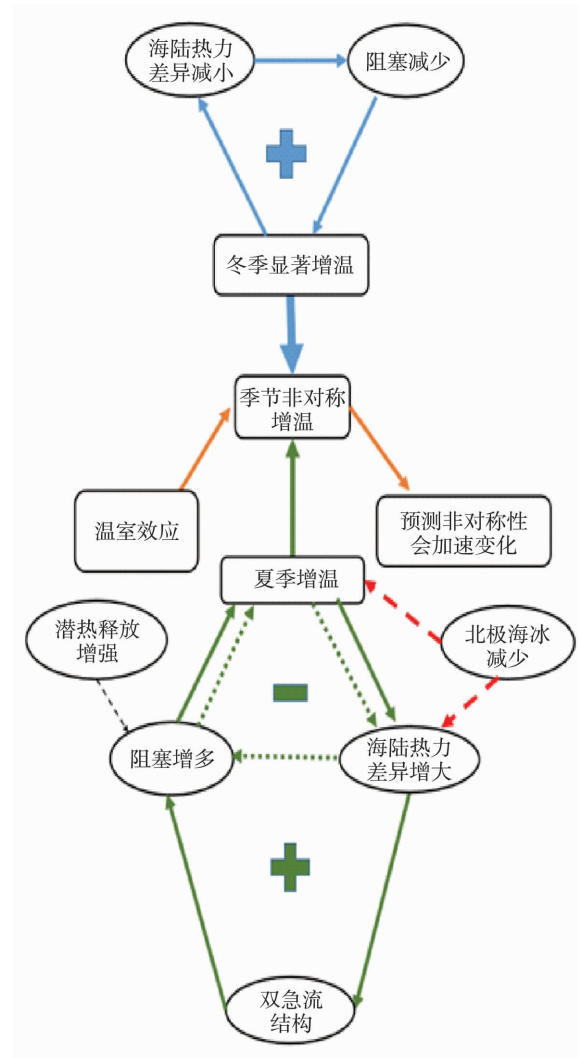


图 5 冬季和夏季海陆热力差异与大气阻高反馈机制示意图^[27]

Fig. 5 The schematic diagram of feedback mechanism between land-sea thermal difference and atmosphere blocking in winter and summer^[27]

2001—2012 年间西伯利亚地区常绿针叶林的面积增加了近 40%,而落叶针叶林的面积减少了近 40%,混合林也呈现逐渐增加趋势。西伯利亚森林树种的分布在短短 12 a 内发生如此巨大的改变令人惊讶。经过稳定性处理,降低数据不确定性,排除卫星反演算法的误判和火灾的影响,西伯利亚地区常绿针叶林扩张的现象真实存在,但扩张面积存在很大不确定性,估计在 10% 左右。常绿针叶林扩张区域极大地降低了冬季地表反照率,导致地表接收的太阳辐射大幅增加,这与该地区冬季显著增温非常一致。

进一步研究发现,在全球变暖过程中,由于冬季显著增温,常绿针叶林幼苗的死亡率降低,致使在

春、夏季相比于落叶针叶林获得更大的生长优势。因此,落叶针叶林区域很可能转变为常绿针叶林,进而降低地表反照率,增加地表接收的太阳辐射,森林局地气温进一步升高,从而形成正反馈机制。最新研究还证明了常绿针叶林扩张现象对气候振荡不敏感。SHUMAN等^[53-54]利用美国弗吉尼亚大学森林模型(UVAFME)模拟每棵树木的生长与死亡,探究西伯利亚森林在个体水平和树种水平对气候变化的响应,发现全球变暖导致的常绿针叶林的扩张很可能是以突变的形式发生。森林对缓慢的温度变化表现出迟滞响应,在温度超过临界值时,树种组成迅速调整以适应新的气候环境。由于迟滞响应,增温过程中突变的临界温度与降温过程中突变的临界温度并不相同,即临界值依赖于温度变化方向。因此,常绿针叶林扩张导致的反照率反馈机制一旦发生,其造成的局地增温效应将持续,即便在增温减缓期间仍然有效。

3.3 干旱半干旱地区的显著增温机制

干旱半干旱区占全球陆地面积42%,其经历的冬季显著增温现象^[55-57]对海陆增温差异产生重要贡献。除了大气湿度和垂直减温率反馈机制以及上述两种反馈机制,还有以下三方面物理机制:

(1)能量平衡机制。地表有效能量可以通过感热和潜热的形式输送给大气,而感热和潜热的分配主要由地表性质决定,特别是土壤湿度。随着地表接收太阳辐射的增加,感热和潜热随之增加,其中在湿润地区潜热增加的更多,而在干旱半干旱地区潜热受土壤湿度限制无法持续增加,为了维持地表能量平衡,较低的土壤湿度和植被覆盖使得地表温度增加以获得较大的感热通量^[55,58-59]。

(2)沙尘气溶胶与云的相互作用。干旱半干旱地区沙尘气溶胶对云的特性有明显影响,沙尘气溶胶使水云云滴的蒸发增大,从而减少了云水路径与低云覆盖,大大降低云与气溶胶的冷却效应,导致更强的增暖效应,即沙尘气溶胶的半直接效应^[60]。然而,湿润区上空的云更接近纯云,其平均粒子半径和直径更大,主要以水云的冷却效应为主^[61]。这也部分解释了干旱半干旱地区的显著增温。

(3)人类活动的影响。中国多年平均遥感气溶胶光学厚度分布显示,由于东部湿润区人口稠密、经济发达,以人类活动产生的人为气溶胶排放为主,其光学厚度高于西部人口稀少的干旱半干旱地区^[62],说明人为气溶胶对于湿润地区的冷却效应强于干旱半干旱地区。

上述三方面因素既加剧了干旱半干旱区与湿润

区的增温差异,又对陆地显著增温作出重要贡献。

4 总结和展望

本文总结了全球变暖过程中海陆增温差异现象的研究进展,发现海陆增温差异随着全球气温的持续升高不断增大,但海陆增温比则基本保持恒定。众多研究认为,海陆巨大热容量差异不是海陆增温差异形成的主要原因,在全球变暖过程中,与大气垂直减温率、云量、海表温度、植物蒸腾、降水、大气湿度、大气环流、森林反照率等物理因子有关的反馈机制在海陆增温差异形成过程中发生重要作用。由于目前气候系统对温室气体辐射强迫的响应不太可能完全达到平衡态,故笔者认为,海陆热容量差异可能对海陆增温差异的形成发挥着不可忽视的作用。

尽管上述理论极大丰富了人们对海陆增温差异形成机制的认识,但目前的研究仍存在以下问题:

(1)目前的研究只是对海陆增温差异现象给出了各种机制解释,但对“海陆增温比基本保持恒定”现象几乎没有解释,且对“中高纬海陆增温比最大”现象的机制解释也较少。

(2)各种物理因子和反馈机制究竟能在多大程度上解释观测到的不同时间尺度的海陆增温差异的形成,仍然缺少定量研究。

(3)东亚是典型的季风气候,夏季风和冬季风都十分明显,而海陆热力差异是形成季风的主要因素之一。本文总结的海陆热力差异变化的研究几乎都是针对全球平均或纬向平均而言,其研究结果不能直接用来解释和预测东亚季风系统的变化。

鉴于此,笔者认为未来对于全球变暖过程中海陆增温差异现象的研究,应该侧重以下几个方面:

(1)从全球气候系统(大气圈、水圈、岩石圈、冰冻圈、生物圈)的角度出发,研究气候系统中更为重要的大尺度物理因子对全球变暖过程中海陆增温差异形成的作用。大气环流和海洋环流直接改变全球能量和水分的时空分布,而青藏高原和北极地区对全球气候变化的影响十分重要。应当关注大气环流、海洋环流、青藏高原和北极气候变化对海陆增温差异形成的作用。

(2)定量研究各种物理因子及其反馈机制对海陆增温差异形成的贡献,找到不同时间尺度和空间区域上(如中高纬度、东亚)影响海陆增温差异形成的主要因子和反馈机制。

(3)加强全球变暖过程中海陆增温差异不断增大对气候影响的研究。如中高纬陆地强化增温现象对陆地干旱化和植被覆盖的影响、海陆热力差异变

化对东亚季风系统的影响。

参考文献:

- [1] CUSBASCH U, MEEHL G A, BOER G J, et al. Projections of future climate change 2001: The Scientific Basis [R]. New York: Cambridge University Press, 2001:525 – 582.
- [2] BRAGANZA K, KAROLY D J, HIRST A C, et al. Simple indices of global climate variability and change: Part I – variability and correlation structure[J]. *Climate Dynamics*, 2003,20(5):491 – 502.
- [3] BRAGANZA K, KAROLY D J, HIRST A C, et al. Simple indices of global climate variability and change Part II: attribution of climate change during the twentieth century[J]. *Climate Dynamics*, 2004, 22:823 – 838.
- [4] SUTTON R T, DONG B W, GREGORY J M. Land/sea warming ratio in response to climate change: IPCC AR4 model results and comparison with observations [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007,34(2):L02701. Doi:10.1029/2006GL028164.
- [5] HUGO LAMBERT F, CHIANG J C H. Control of land – ocean temperature contrast by ocean heat uptake[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007,34(13):L13704.
- [6] JOSHI M M, GREGORY J M, WEBB M J, et al. Mechanisms for the land/sea warming contrast exhibited by simulations of climate change[J]. *Climate Dynamics*, 2008,30:455 – 465.
- [7] BYRNE M P, O’GORMAN P A. Link between land – ocean warming contrast and surface relative humidities in simulations with coupled climate models[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013,40: 5223 – 5227.
- [8] HUANG J, GUAN X, JI F. Enhanced cold – season warming in semi – arid regions[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12:5391 – 5398.
- [9] 黄建平,季明霞,刘玉芝,等. 干旱半干旱区气候变化研究综述 [J]. *气候变化研究进展*,2013,9(1):9 – 14.
- [10] HUANG J P, YU H P, GUAN X D, et al. Accelerated dryland expansion under climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2015, 6:166 – 171.
- [11] UNFCCC. Adoption of the Paris Agreement [R]. Proposal by the President. Draft decision – /CP.21. 2015. <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/109r01.pdf>.
- [12] HUNTINGFORD C, MERCADO L M. High chance that current atmospheric greenhouse concentrations commit to warmings greater than 1.5 °C over land[J]. *Scientific Reports*, 2016,6:30294. DOI:10.1038/srep30294.
- [13] DONG B, GREGORY J M, SUTTON R M. Understanding land – Sea warming contrast in response to increasing greenhouse gases. Part I: Transient adjustment [J]. *Journal of Climate*, 2009,22: 3079 – 3097.
- [14] 程善俊,黄建平,季明霞,等. 中国华北暖季土壤湿度的变化特征[J]. *干旱气象*,2015,33(5):723 – 731.
- [15] 李耀辉,周广胜,袁星,等. 干旱气象科学研究——“我国北方干旱致灾过程及机理”项目概述与主要进展[J]. *干旱气象*, 2017,35(2):165 – 174.
- [16] BOER G J, YU B. Climate sensitivity and response [J]. *Climate Dynamics*, 2003,20:415 – 429.
- [17] BYRNE M P, O’GORMAN P A. Land – ocean warming contrast over a wide range of climate: convective quasi – equilibrium theory and idealized simulations[J]. *Journal of Climate*, 2013,26:4000 – 4016.
- [18] BYRNE M P, O’GORMAN P A. Understanding decreases in land relative humidity with global warming: conceptual model and GCM simulations[J]. *Journal of Climate*, 2016,29:9045 – 9061.
- [19] BYRNE M P, O’GORMAN P A. Trends in continental temperature and humidity directly linked to ocean warming[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018,115:4863 – 4868.
- [20] STOUFFER R J, MANABE S, BRYAN K. Interhemispheric asymmetry in climate response to a gradual increase of atmospheric CO₂ [J]. *Nature*, 1989,342:660 – 662.
- [21] MANABE S, STOUFFER R J, SPELMAN M J, et al. Transient responses of a coupled ocean – atmosphere model to gradual changes of atmospheric CO₂. Part I: Annual – mean response [J]. *Journal of Climate*, 1992,4:785 – 818.
- [22] MANABE S, SPELMAN M J, STOUFFER R J. Transient responses of a coupled ocean – atmosphere model to gradual changes of atmospheric CO₂. Part II: Seasonal response [J]. *Journal of Climate*, 1992,5:105 – 126.
- [23] STOUFFER R J, MANABE S. Assessing temperature pattern projections made in 1989[J]. *Nature Climate Change*, 2017,7(3): 163 – 165.
- [24] SENIOR C A, MITCHELL J F B. Carbon dioxide and climate: the impact of cloud parameterization[J]. *Journal of Climate*, 1993,6: 393 – 418.
- [25] 管晓丹,程善俊,郭瑞霞,等. 干旱半干旱区土壤湿度数值模拟研究进展[J]. *干旱气象*,2014,32(1):135 – 141.
- [26] HE Y L, HUANG J P, JI M X. Impact of land – sea thermal contrast on interdecadal variation in circulation and blocking[J]. *Climate Dynamics*, 2014,43(12):3267 – 3279.
- [27] HE Y L, HUANG J P, LI D D, et al. Comparison of the effect of land – sea thermal contrast on interdecadal variation in winter and summer blockings[J]. *Climate Dynamics*, 2018,51:1275 – 1294.
- [28] HE Y L, HUANG J P, SHUGART H H, et al. Unexpected evergreen expansion in the Siberian forest under warming hiatus [J]. *Journal of Climate*, 2017,30:5021 – 5039.
- [29] 胡潮,管兆勇,李明刚. 北半球大洋与大陆区域间大气质量分布的季节循环[J]. *中国科学:地球科学*,2014,44(7):1519 – 1531.
- [30] 胡潮,卢楚翰,管兆勇,等. 9个CMIP5模式模拟的大气质量海陆间迁移的季节循环[J]. *大气科学学报*,2015,38(5):588 – 598.
- [31] 周游,管兆勇,张茜,等. 秋季大气质量海陆间迁移与南北涛动年际变化不同位相配置及其对中国气温异常的影响[J]. *气象学报*,2016,74(3):367 – 379.
- [32] 奚子惠,管兆勇,张茜,等. 春季欧亚—北太平洋上空大气质量迁移规律及其对中国同期气候异常的可能影响[J]. *大气科学*,2016,40(6):1261 – 1272.
- [33] CHARNEY J G, DEVORE J G. Multiple flow equilibria in the atmosphere and blocking[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*,

- 1979,36:1205-1216.
- [34] 朱正心. 地形和热力共同作用下超长波的非线性平衡态与阻塞形势[J]. 大气科学,1983,7(1):13-22.
- [35] HUANG J P, XIE Y K, GUAN X D, et al. The dynamics of the warming hiatus over the Northern Hemisphere[J]. *Climate Dynamics*, 2017,48(1/2):429-446.
- [36] SHABBAR A, HUANG J P, HIGUCHI K. The relationship between the wintertime north Atlantic oscillation and blocking episodes in the north Atlantic[J]. *International Journal of Climatology*, 2001,12(3):355-369.
- [37] LUO D H, YAO Y, DAI A G, et al. Increased quasi-stationarity and persistence of winter Ural blocking and Eurasian extreme cold-events in response to Arctic warming. Part II: a theoretical explanation[J]. *Journal of Climate*, 2017,30(10):3569-3587.
- [38] KAMAE Y, WATANABE M, KIMOTO M, et al. Summertime land-sea thermal contrast and atmospheric circulation over East Asia in a warming climate—Part I: Past changes and future projections[J]. *Climate Dynamics*, 2014,43(9/10):2553-2568.
- [39] KAMAE Y, WATANABE M, KIMOTO M, et al. Summertime land-sea thermal contrast and atmospheric circulation over East Asia in a warming climate—Part II: Importance of CO₂-induced continental warming[J]. *Climate Dynamics*, 2014,43:2569-2583.
- [40] SHAW T A, VOIGT A. Tug of war on summertime circulation between radiative forcing and sea surface warming[J]. *Nature Geoscience*, 2015,8:560-566.
- [41] GRISE K M, POLVANI L M. The response of midlatitude jets to increased CO₂: Distinguishing the roles of sea surface temperature and direct radiative forcing[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014,41(19):6863-6871.
- [42] KAWATANI Y, HAMILTON K, NODA A. The effects of changes in sea surface temperature and CO₂ concentration on the quasi-biennial oscillation[J]. *Journal of the Atmosphere Sciences*, 2012,69(5):1734-1749.
- [43] PETOUKHOV V, RAHMSTORF S, PETRI S, et al. Quasiresonant amplification of planetary waves and recent Northern Hemisphere weather extremes[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013,110(14):5336-5341.
- [44] PETOUKHOV V, PETRI S, RAHMSTORF S, et al. Role of quasiresonant planetary wave dynamics in recent boreal spring-to-autumn extreme events[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016,113(25):6862-6867.
- [45] PIAO S L, FRIEDLINGSTEIN P, CIAIS P, et al. Growing season extension and its impact on terrestrial carbon cycle in the Northern Hemisphere over the past 2 decades[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007,21(3):GB3018. Doi:10.1029/2006GB002888.
- [46] SCHWARTZ M D, AHAS R, AASA A. Onset of spring starting earlier across the Northern Hemisphere[J]. *Global Change Biology*, 2006,12:343-351.
- [47] FLANNIGAN M D, STOCKS B J, WOTTON B M. Climate change and forest fires[J]. *Science of the Total Environment*, 2000,262:221-229.
- [48] KHARUK V V I, DVINSKAYA M L, RANSON K J. The spatio-temporal pattern of fires in northern taiga larch forests of central Siberia[J]. *Russian Journal of Ecology*, 2005,36(5):302-311.
- [49] KHARUK V, RANSON K, DVINSKAYA M. Evidence of evergreen conifer invasion into larch dominated forests during recent decades in central Siberia[J]. *Eurasian Journal of Forest Research*, 2007,10(2):163-171.
- [50] KHARUK V I, ALSHANSKY A M, YEGOROV V V. Spectral characteristics of vegetation cover: factors of variability[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1992,13(17):3263-3272.
- [51] KHARUK V I, DVINSKAYA M L, RANSON K J, et al. Expansion of Evergreen conifers to the larch-dominated zone and climatic trends[J]. *Russian Journal of Ecology*, 2005,36(3):164-170.
- [52] SHUMAN J K, SHUGART H H, O'HALLORAN T L. Sensitivity of Siberian larch forests to climate change[J]. *Global Change Biology*, 2011,17(7):2370-2384.
- [53] SHUMAN J, SHUGART H, KRANKINA O. Testing individual-based models of forest dynamics: Issues and an example from the boreal forests of Russia[J]. *Ecological Modelling*, 2014,293:102-110.
- [54] SHUMAN J, TCHEBAKOVA N M, PARFENOVA E I, et al. Forest forecasting with vegetation models across Russia[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2015,45(2):175-184.
- [55] HUANG J, LI Y, FU C, et al. Dryland climate change: Recent progress and challenges[J]. *Reviews of Geophysics*, 2017,55:719-778.
- [56] 季飞,黄建平,管晓丹,等. 北美和欧亚大陆冬季快速增温与地表干湿变化[J]. 气候变化研究进展,2012,8(6):440-447.
- [57] 冉津江,李明霞,黄建平,等. 中国干旱半干旱地区的冷季快速增温[J]. 高原气象,2014,33(4):947-956.
- [58] 郭瑞霞,管晓丹,张艳婷. 我国荒漠化主要研究进展[J]. 干旱气象,2015,33(3):505-514.
- [59] 杨扬,左洪超,王丽娟,等. 干旱区荒漠草原过渡带快速变化的陆面过程特征观测分析[J]. 干旱气象,2015,33(3):412-420.
- [60] HUANG J P, LIN B, MINNIS P, et al. Satellite-based assessment of possible dust aerosols semi-direct effect on cloud water path over East Asia[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016,33:L19802. Doi:10.1029/2006GL026561.
- [61] SU J, HUANG J P, FU Q, et al. Estimation of Asian dust aerosol effect on cloud radiation forcing using Fu-Liou radiative and CERES measurements[J]. *Atmospheric Chemistry Physics*, 2008,8:2763-2771.
- [62] 郑小波,罗宇翔,赵天良,等. 中国气溶胶分布的地理学和气候学特征[J]. 地理科学,2012,32(3):265-272.

Research Review on the Contrast of Land and Ocean Warming Features Under the Global Warming

HE Yongli, DING Lei, LI Dongdong, HUANG Jianping, LI Changyu, BI Lu

(Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Under global warming, the mean warming trend over land surface was much faster than that over ocean surface, therefore, there was difference of warming between land and ocean. As the increase of global mean surface air temperature, the difference between land and ocean warming also gradually increased, but the warming ratio between land and ocean was nearly constant, and it was the maximum in mid-high latitude of the Northern Hemisphere. The current situation of researches on land-ocean warming contrast under global warming was summarized and reviewed in this paper. The transient and equilibrium responses of climate system to external forcing such as greenhouse gases were investigated to explore the mechanism of land-ocean warming contrast. The results show that the difference of heat capacity between land and ocean was not main reason, while the atmospheric humidity and lapse rate feedback was main reason of land-ocean warming contrast, and SST forcing and change of vegetation evapotranspiration, surface evaporation, cloud amount, precipitation and relative humidity all contributed to the land-ocean warming contrast in short time scale. The simulated land-ocean warming ratio was basically consistent with the observations. However, it was excessively underestimated in mid-high latitude of the Northern Hemisphere, which might be related to the feedback of albedo induced by evergreen broad-leaf forest expansion and between blocking and land-sea thermal contrast.

Key words: land and ocean warming contrast; global warming; climate simulation; feedback mechanism

欢迎订阅 2019 年《干旱气象》

《干旱气象》由中国气象局兰州干旱气象研究所、中国气象学会干旱气象学委员会主办,是我国干旱气象领域科学研究的专业性学术期刊,反映有关干旱气象监测、预测和评估的最新研究成果,充分展示干旱气象领域整体的研究和应用水平。期刊主要刊载干旱气象及相关领域有一定创造性的学术论文、研究综述、简评,国内外干旱气象发展动态综合评述、学术争鸣以及相关学术活动。具体包括:国内外重大干旱事件分析、全球及干旱区气候变化、干旱气象灾害评估及对策研究、水文、生态与环境、农业与气象、可再生能源开发与利用、地理信息与遥感技术的应用等。本刊还免费刊载干旱气象研究成果、研究报告、学术活动、会议消息等。《干旱气象》已被《中国学术期刊(光盘版 CAJ-CD)》、万方数据-数字化期刊群、中国核心期刊(遴选)数据库、中国科技论文统计源期刊、重庆维普中文科技期刊数据库、教育阅读网、台湾华谊线上图书馆等全文收录。

《干旱气象》内容丰富、信息量大、研读性强,适合广大气象科研业务工作者、各相关专业技术人员、大专院校师生阅读。

《干旱气象》为双月刊,国内外公开发行。2019 年正刊 6 期,每期定价 36 元,全年 216 元。欢迎广大读者订阅,并可以随时邮局款汇购买,款到开正式发票。

编辑部地址:甘肃省兰州市东岗东路 2070 号 中国气象局兰州干旱气象研究所 《干旱气象》编辑部
邮政编码:730020 联系电话:0931-2402270 电子信箱:ghs_ghqx@sina.com; ghqx@iamcma.cn
银行汇款:建设银行嘉峪关路支行 户名:中国气象局兰州干旱气象研究所
账号:62050138000800000057