

温室气体浓度增加情景下大西洋温盐环流的演变

牟林^{1,2}, 吴德星¹, 周刚³, 陈学恩¹, 马超¹

1. 中国海洋大学物理海洋实验室, 山东青岛 266003

2. 德国 Max-Planck 气象研究所, 德国汉堡 20146

3. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074

摘要: 温室气体浓度增加(以 CO₂ 为主)引起的温盐环流演变在未来气候系统中扮演非常重要的角色. 在最新的温室气体排放情景下, 利用基于德国马普气象研究所为 IPCC 第四次评估报告而最新发展的气候模式(ECHAM5/MPIOM), 对 3 种不同的温室气体排放假设(B1, A1B, A2)进行了可靠的数值模拟. 在此基础上, 就大西洋温盐环流和北大西洋深层水形成的变化, 以及北大西洋不同海区的温盐环流对温室气体浓度增加的响应, 对模拟结果进行了分析. 研究揭示, 到 21 世纪末, 在 3 种 CO₂ 排放情景下, 温盐环流强度分别减弱了 4 Sv(1 Sv=10⁶ m³/s)、5.1 Sv、5.2 Sv, 大体相当于减弱了 20%、25%、25.1%. 由于全球变暖引起副极地海区表层海水变暖变淡, 拉不拉多海(Labrador Sea)和丹麦海峡(Denmark Strait)以南区域的深层对流有所减弱. 而在格陵兰—冰岛—挪威海(GIN Sea)的情况相反, 由于北大西洋暖流的增强, 通过法鲁海峡(Faro-Bank Channel)进入 GIN 海域的高盐水增加, 导致 GIN 海域上层盐度(密度)增加, 进而深层对流加强. 在 A1B 情景下, 由于全球变暖北大西洋的深层水生成率从 16.2 Sv 降到了 12.9 Sv.

关键词: 温盐环流; 温室气体; 深层水.

中图分类号: P714; P733

文章编号: 1000-2383(2007)01-0141-06

收稿日期: 2006-06-20

Changes in Atlantic Thermohaline Circulation under Different Atmospheric CO₂ Scenarios

MU Lin^{1,2}, WU De-xing¹, ZHOU Gang³, CHEN Xue-en¹, MA Chao¹

1. *Physical Oceanography Laboratory, Ocean University of China, Qingdao 266003, China*

2. *Max-Planck Institute for Meteorology, Hamburg 20146, Germany*

3. *Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*

Abstract: Changes in the thermohaline circulation (THC) arising from the increase in the CO₂ concentration in the atmosphere will dominate the future climate regimes. In this paper, a new climate model developed at Max-Planck Institute for Meteorology is targeted at the variation of THC strength, the changes in North Atlantic deep water (NADW) formation and the regional responses of the THC in the North Atlantic to the increasing atmospheric CO₂. From 2000 to 2100, the increase in CO₂ (B1, A1B and A2) will have decreased the strength of THC by 4 Sv, 5.1 Sv and 5.2 Sv, respectively, or equivalently, reduced by 20%, 25% and 25.1% of the present THC strength. This research indicates that oceanic deep convective activity is significantly strengthened in the Greenland-Iceland-Norway (GIN) Seas owing to saltier (denser) upper oceans, but is weakened both in the Labrador Sea and in the south of the Denmark Strait region (SDSR) because of surface warming and freshening derived from global warming. The saltiness of the GIN Seas is mainly initiated by the increase in the saline North Atlantic inflow through Faro-Bank (FB) Channel. Under the scenario A1B, the deep water formation rate in the North Atlantic decreases from 16.2 Sv to 12.9 Sv with a corresponding increase in CO₂.

Key words: thermohaline circulation (THC); greenhouse gases; deepwater.

0 引言

温盐环流 (thermohaline circulation, 简称 THC) 是海洋中全球尺度的循环, 温盐环流受重力作用下高纬较重水团下沉和低纬较轻水团的上升所驱动, 是一种由温度和盐度效应引起的密度梯度驱动密度流, 其输运量约占全球大洋环流带输运的 90%, 当代大洋热盐环流以大西洋输送带环流为特征, 太平洋不存在热盐环流输送带 (Broecker, 1991). 在大西洋中, 大西洋表层暖水向北流动, 北大西洋深层冷而咸的海水回流, 温盐环流对大西洋中纬向热量和淡水输送起着主要作用, 因此 THC 的强度对于大西洋热量输送和欧洲的气候有着非常显著的影响 (Marotzke, 2000).

受工业化以来人类活动的影响, 大气中温室气体 (以 CO_2 为主) 的浓度不断增加, 这种变化使从地球表面到太空的辐射效率降低. 这是因为, 来自地球表面的大部分向外陆地辐射被大气所吸收, 并在高纬和低温下重新射出, 从而导致正的辐射强迫, 使低层大气和地球表面增温, 逃逸到太空的热量减少, 形成增强温室效应. 由于温室效应引起的全球变暖会改变淡水通量和地表径流的分布 (Manabe and Stouffer, 1994). 在全球变暖的情况下, 极地和副极地地区, 由于高纬度降水的增强, 会被输入更多的淡水 (Dai *et al.*, 2001); 副热带地区由于蒸发增强将会失去更多的淡水 (Voss and Mikolajewicz, 2001). THC 的演变可以由表面的浮力扰动触发. 在温室气体浓度增加情景下, 全球变暖, 海表温度升高, 大气中的水汽含量增加, 淡水的经向输运加强, 即副热带地区蒸发增强, 副极地地区降雨增加, 从而降低了高低纬度的海水密度梯度, THC 的强度随之减弱, 进而影响欧洲气候.

以往的很多研究工作主要注重于海表浮力扰动在海盆尺度上对 THC 的作用 (Manabe and Stouffer, 1994; Voss and Mikolajewicz, 2001). 由于 THC 的下沉分支——北大西洋深层水 (NADW) 的形成具有很强的区域性, 主要位于北大西洋拉不拉多海, 丹麦海峡以南区域和格陵兰—冰岛—挪威海. 因此分别对不同区域的海洋过程进行分析是十分必要的. 本文基于德国 Max-Planck 气象研究所的大气海洋环流模式, 同时耦合海冰和陆面过程模式, 对地球系统的未来气候进行预测, 分析 THC 在温室气体浓度增加情景假定下的演变, 着重研究了北大西洋不同海区沿等密度面的海洋过程对全球变暖的响应.

1 模式介绍、试验设计和分析方法

1.1 模式介绍

本文所采用的模式是德国马普气象所最新发展的气候模式, 海洋模式是 Max-Planck Institute Ocean Model (MPI-OM, 嵌套了最新海冰模块), 大气模式是 Max Planck Institute Atmosphere Model (ECHAM5). 这里我们简要介绍这一气候模式的海洋和大气分量: 海洋模式采用了移动坐标曲线正交网格, 2 个坐标投影点一个位于格陵兰岛, 一个位于南极. 通过这样的设计, 我们达到了在北大西洋深层水生成区进行网格加密的目的, 以通过较高的分辨率来细致地刻画深层水的形成, 海洋模式水平网格精度从 20 km 到 180 km, 平均精度 $1.5^\circ \times 1.5^\circ$, 垂直分 40 层. 大气模式采用 T63 的网格, 水平网格分辨率为 $1.875^\circ \times 1.875^\circ$, 垂直分 31 层. 此耦合模式没有 Flux Adjustment, 这是此模式优点之一. ECHAM5 较之以前应用比较广泛的 ECHAM4, 主要改进是更新了可预报的气溶胶模块, 对云覆盖重新进行了参数化过程, 同时对云里面的冰和水进行了不同的过程处理, 大大提高了对降雨过程的模拟; 同时对陆面过程的参数化进行了改进, 引入了新的 vegetation ratio, leaf area index 和 forest ratio (Roeckner, 2003). MPI-OM 相对于以前版本 MPI-OM 的改进, 主要是海表风应力的计算改进, 考虑了局地海流对风应力的影响作用, 对上表层海洋的动力机制刻画更为细致, 同时改进了海冰模块, 对海冰的生长、消亡和输运的刻画更为细致 (Marsland, 2003).

1.2 试验设计

情景场: 在数值研究中, 我们采用了 IPCC (the intergovernmental panel on climate change) 排放情景特别报告中设计的 CO_2 等温室气体情景浓度变化 (图 1). 在图 1 中, 2000 年以前的黑实线代表实测和替代资料反演所得 CO_2 情景浓度. A2 情景, 假设了一个这样的未来世界, 即经济快速增长, 全球人口快速增长, 并未采用新的能源技术, 温室气体迅速增加. A1B 情景, 全球经济和人口迅速增加, 采用一种均衡的燃料使用策略 (均衡是指不过分地依赖某一种能源, 其基本假设是在所有的能源供应和终端利用技术方面具有相似的改进速率), 温室气体的浓度增加相对于 A2 情景有所减弱. B1 框架和情景系列假设全球人口在 21 世纪中达到高峰然后下降, 但其经济结构快速转向服务业和信息产业, 材料消耗强

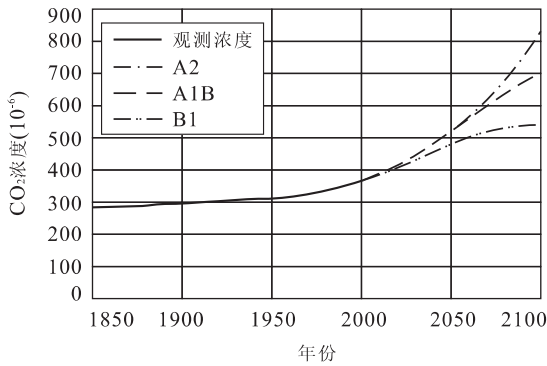


图 1 IPCC 排放情景特别报告的 CO₂ 情景浓度

Fig. 1 CO₂ concentrations of scenarios of IPCC (the inter-governmental panel on climate change) assessment report

度减少,清洁高效资源技术得到利用,温室气体增加缓慢并趋于稳定,是一个乐观的假设情景。

基于上述模式配置,我们在不同的温室气体情景场下,在德国气候中心的巨型计算机上对海洋大气模式进行了耦合运行。首先模式进行了 500 年的“spin-up”,CO₂ 浓度固定在工业化前的水平 280×10^{-6} 。然后模式开始启动,模拟时间为从 1860 年(人类社会工业化前)到 21 世纪末,结果以年平均的形式输出,下面我们将就所得的结果进行初步分析。

1.3 分析方法

把大西洋的海水以密度为标准分成三层来分析耦合模式的输出结果,这 3 个密度层分别代表大西洋表层水(UW)、深层水(DW)和底层水(BW)。在大西洋里表层暖水向北流动,深层水和底层水向南流动。随着全球变暖海洋的密度结构会发生变化,不同密度层的密度标准随之也发生变化。同以往采用固定的密度层的密度标准的方法不同,本文采用了一个新的方法来定义不同密度层的变化了的密度标准。选取大西洋 50°N 作为断面,这主要是由于 THC 在 50°N 强度最大,便于分析。沿着 50°N 断面,把经向速度场转换到密度坐标上。位势密度是由模式输出的温盐数据以 2 000 m 为参考面计算得到的。然后把经向速度场按面积纬向积分,得到每个密度层的经向运输,再把每个密度层的经向运输从表层分别累加到每一个密度层。向北累积运输最大的密度坐标点定义为 σ_1 ,大于 σ_1 且经向累积运输为零的密度坐标点定义为 σ_2 。密度 $< \sigma_1$ 是表层水, $\sigma_1 < \text{密度} < \sigma_2$ 是深层水,密度 $> \sigma_2$ 是底层水。由此我们得到了全球变暖下不同密度层变化的密度标准。全球变暖的

情况下,表层海水吸收的热通量相对较多,因此增温相对于深层水和底层水比较快。表层水的位势密度在全球变暖的 21 世纪由 1 036.72 降到 1 036.28。而深层水和底层水位势密度降低的幅度没有表层水那么大。3 个密度层之间穿越等密度面的运输是由从海底积分到每个密度层沿等密度面运输的散度得到的。

2 CO₂ 浓度增加情景下 THC 的演化

2.1 THC 强度的变化

图 2a 是全球平均海表温度(SST)在不同的温室气体浓度增加情景下随时间的变化曲线(其中,绿线表示 1860 年到 2000 年用实测和替代资料反演所得 CO₂ 情景浓度,2000 年后固定为 2000 年的 CO₂ 情景浓度的模拟结果)。全球平均海表温度的计算,选取全部海洋网格点,按照网格面积对 SST 进行加权平均,输出年平均数据。对 2000 年后的年平均数据作线性回归,从 2000 年到 2100 年,在 B1、A1B、A2 三个情景下,全球海表面的平均温度分别上升了 2.5 °C, 3.5 °C, 4.0 °C, 平均年变化率分别达 $0.025 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$, $0.035 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$, $0.04 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$, 相关系数都超过 0.05 的显著性水平。全球海洋环流的深层水生成区域位于北大西洋副极地地区,在温室气体浓度升高全球变暖的情景下,该区淡水通量增加,温度升高,密度减小,进而使高低纬密度差减小,深层水生成率降低,致使温盐环流 THC 减弱。图 2b 是 THC 强度在不同的温室气体浓度情景下的随时间的变化曲线,从 2000 年到 2100 年的一个世纪中,在 B1、A1B、A2 三个情景下,THC 强度分别减弱了 4 Sv、5.1 Sv、5.2 Sv,大体相当于减弱了 20%、25%、25.1%。THC 强度的减弱趋势十分明显,同时年代际振荡十分强烈。谱分析的结果显示在 95% 的置信度上周期为 20 年的振荡是显著的,这同 Delworth *et al.* (1993)和 Cheng(2000)的模式结果是类似的。

2.2 NADW 生成率的变化

NADW 的主要生成区域位于北大西洋拉不拉多海,丹麦海峡以南区域和格陵兰—冰岛—挪威海(Broecker, 1991)。为了便于有针对性的研究,把 NADW 生成区域分成三部分:拉不拉多海区域(50°~65°N, 45°W 以西)、丹麦海峡以南区域(SDSR, 50°~65°N, 45°W 以东)和格陵兰—冰岛—挪威海(GIN 海域)。

图 3 给出在 A1B 情景下 20 世纪(3a, 3c)和

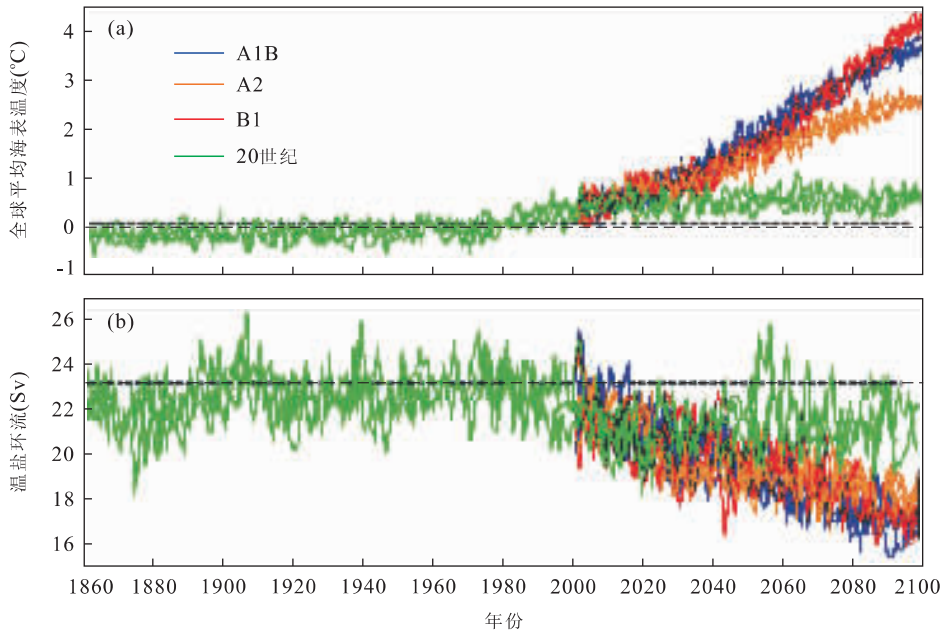


图 2 (a)全球平均海表温度(SST)和(b)温盐环流(THC)强度在不同的温室气体浓度增加情景下的随时间的变化曲线
Fig. 2 (a) Time series of global mean sea surface temperature and (b) the maximum value of the annual mean THC strength with global warming under the different scenarios

21 世纪(3b, 3d)北大西洋沿等密度面输运和穿越等密度面输运。总体来说,随着全球变暖上层海水的副极地环流得到加强。上层海水穿越 50°N 的北向输运增加了大约 3 Sv , 相对于 20 世纪大体增加了 10% 。上层海水通过法鲁海峡进入 GIN 海域的入流增加了大约 1 Sv , 相当于 20 世纪法鲁海峡入流的 10% 。根据 Mauritzen(1996a, 1996b)的理论,这种入流的增加将会加强 GIN 海域的逆时针环流,通过丹麦海峡和法鲁海峡的溢流水将会增加。

穿越等密度面输运的变化在不同海区情况有所不同。在拉不拉多海和 SDRS 海域穿越等密度面的输运随着 CO_2 浓度的增加呈明显减弱的趋势,在拉不拉多海穿越等密度面的输运从 8.2 Sv 降到 5.2 Sv , 在 SDRS 海域穿越等密度面的输运从 2.1 Sv 降到 1.6 Sv 。在 GIN 海域穿越等密度面的输运有所增加,从 5.7 Sv 增加到 6.7 Sv 。穿过丹麦海峡和法鲁海峡溢流水的总和从 5.9 Sv 增加到 6.2 Sv 。NADW 是由三部分组成的:拉不拉多海的深层对流;丹麦海峡和法鲁海峡的溢流水;以及 SDRS 海域的深层水的卷夹。在 20 世纪 NADW 的生成率大约是 16.2 Sv , 其中 8.2 Sv 来自拉不拉多海深层对流, 5.9 Sv 来自丹麦海峡和法鲁海峡溢流水, 2.1 Sv 是 SDRS 海域的深层水卷夹的结果。在全球变暖的 21 世纪 NADW 的生成率降低到 12.9 Sv ,

其中拉不拉多海贡献 5.2 Sv , 丹麦海峡和法鲁海峡溢流水贡献 6.1 Sv , SDRS 海域的深层水的卷夹贡献 1.6 Sv 。

2.3 NADW 生成率变化的原因

正如前面 2.1 所讨论的,在温室气体浓度升高全球变暖的情景下,极地和副极地地区由于高纬度降水的增加将会被输入更多的淡水,海表盐度降低;同时由于全球变暖,北大西洋海表温度(SST)将升高。盐度和温度的共同作用导致表层密度降低,进而拉不拉多海和 SDRS 海域的垂直层结更加稳定,垂直对流和深层卷夹减弱。这就是以上两个海区 NADW 生成率在全球变暖情况下降低的原因。

在 GIN 海域 NADW 生成率的变化同以上两个海区是不同的,变化趋势是升高的。在全球变暖的情况下,副极地风场是加强的。同时法鲁海峡周围的西南风也是加强的,因此有更多的北大西洋表层水通过法鲁海峡进入 GIN 海域。根据 Mauritzen(1996a, 1996b)的理论,丹麦海峡和法鲁海峡溢流水的来源是通过法鲁海峡的入流水。因此法鲁海峡北大西洋入流的增加将导致两个海峡溢流水的增加。法鲁海峡入流的增加将把更多较咸的大西洋水带到 GIN 海域,因此 GIN 海域表层盐度增加。虽然在全球变暖的背景下 GIN 海域的表层温度是升高的,但是 GIN 海域温度升高对密度的减小作用小于盐度升

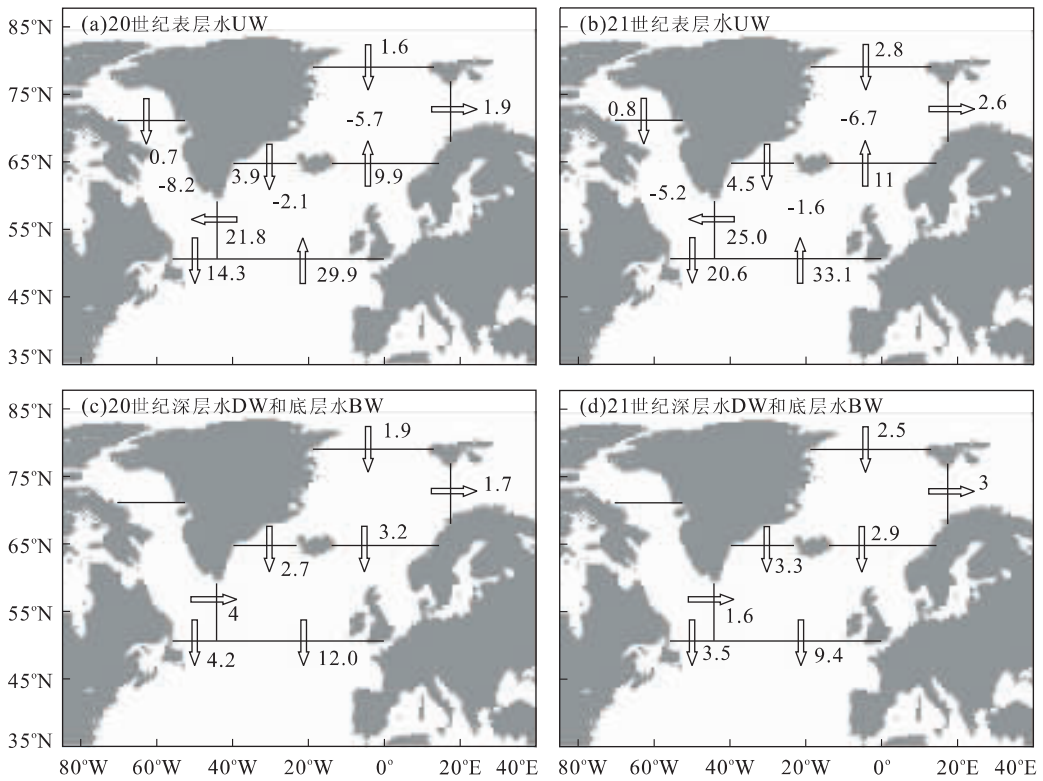


图 3 A1B情景下 20 世纪(a,c)和 21 世纪(b,d)北大西洋的沿等密度面输运和穿越等密度面输运

Fig. 3 Isopycnal and diapycnal fluxes (Sv) under the A1B scenario

UW 代表 THC 的上层分支;DW+BW 代表 THC 的下层分支;箭头的方向代表沿等密度面的运输方向;箭头旁边的数字是体积输运量 (Sv)。位于每个海区中心处的数字表示穿越等密度面的体积输运量(Sv),负值表示上层分支轻的海水进入下层分支变为密度大的海水

高对密度的增加作用,最终总的结果是在 GIN 海域深层对流发生区域表层密度增加。表层密度的增加降低了垂直层化的稳定性,导致 GIN 海域在全球变暖情况下深层对流加强。这也导致了丹麦海峡和法鲁海峡溢流水的增加。

相关。在拉不拉多海和 SDSR 海域,净淡水输入(降水减掉蒸发)的增加和表层海水的增温导致上层海洋层变化稳定性加强,抑止了这些海区的深层对流。在 GIN 海域,通过法鲁海峡的北大西洋入流水的增加导致深层对流的加强和丹麦以及法鲁海峡溢流水的增加。在全球变暖的 A1B 情景下,NADW 生成率总的变化是从 16.2 Sv 降低到 12.9 Sv。

3 结论

本文利用德国马普气象研究所为 IPCC 第 4 次评估报告而最新发展的气候模式(ECHAM5/MPIOM),对 3 种不同的温室气体排放假设(B1, A1B, A2)进行了可靠的数值模拟。在此基础上,本文着重就大西洋温盐环流和北大西洋深层水形成的变化,以及北大西洋不同海区的温盐环流对温室气体浓度增加的响应,对模拟结果进行了深入分析。研究揭示,到 21 世纪末,在 3 种 CO₂ 排放情景下,THC 强度呈现减弱的趋势,CO₂ 排放增加的越快,THC 强度减弱的也就越快。对模式结果的分析表明穿越等密度面的运输的加强(减弱)同上层海洋层化稳定性的减弱(加强)密切

References

Broecker, W. S., 1991. The great ocean conveyor. *Oceanography*, 4: 79-89.

Cheng, W., 2000. Climate variability in the North Atlantic on decadal and multi-decadal time scales: A numerical study (Ph. D. dissertation). University of Miami, Miami, 171.

Dai, A., Meehl, G. A., Washington, W. M., et al., 2001. Ensemble simulation of twenty-1st century climate changes: Business-as-usual versus CO₂ stablization. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 82: 2377-2388.

Dai, A., Wigley, T. M. L., Boville, B. A., et al., 2001. Climates of the twentieth and twenty-1st centuries simulated by the

NCAR climate system model. *J. Climate*,14:485—519.

Delworth, T. ,Manabe, S. ,Stouffer, R. J. ,1993. Interdecadal variations of the thermohaline circulation in a coupled ocean-at-mosphere model. *J. Climate*,6:1993—2011.

Houghton, J. T. ,Ding, Y. ,Griggs, D. J. ,et al. ,2001. Intergovernmental panel on climate change (IPCC),2001: The scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the IPCC. Cambridge University Press, Cambridge.

Manabe, S. ,Stouffer, R. J. ,1994. Multicentury response of a coupled ocean-atmosphere model to an increase of atmospheric carbon dioxide. *J. Climate*,7:5—23.

Marotzke, J. ,2000. Abrupt climate change and thermohaline circulation: Mechanisms and predictability. *Proceedings of the National Academy of Sciences (U. S. A.)*,97: 1347—1350.

Marsland, S. J. ,2003. The Max-Planck-Institute global ocean/sea ice model with orthogonal curvilinear coordinates. *Ocean Modelling* ,5:91—127.

Mauritzen, C. ,1996a. Production of dense overflow waters feeding the North Atlantic across the Greenland-Scotland Ridge. Part 1: Evidence for a revised circulation scheme. *Deep-Sea Research I* ,43:769—806.

Mauritzen, C. ,1996b. Production of dense overflow waters feeding the North Atlantic across the Greenland-Scotland Ridge. Part 2: An inverse model. *Deep-Sea Research I* ,43:807—835.

Roeckner, E. ,2003. The atmospheric general circulation model ECHAM5, part I : Model description. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Report No. 349, 127.

Voss, R. ,Mikolajewicz, U. ,2001. Long-term climate changes due to increased CO₂ concentration in the coupled atmosphere-ocean general circulation model ECHAM3/LSG. *Climate Dyn.* ,17:45—60.

《地球科学——中国地质大学学报》 2007 年 第 32 卷 第 2 期 要目预告

| | |
|--|------|
| 古特提斯多岛洋洋—陆俯冲:木孜塔格蛇绿岩的矿物学证据..... | 兰朝利等 |
| 冰川型海平面变化控制下的台地碳酸盐岩成岩作用:以陕西镇安西口石炭—二叠系界线剖面为例 | 张海军等 |
| 牛庄洼陷“岩性油气藏”油气成因 | 李素梅等 |
| 济阳坳陷地层型油气藏成藏模式 | 熊 伟等 |
| 惠民凹陷古近系碎屑岩次生孔隙纵向分布规律 | 张 莉等 |
| 东营凹陷牛庄洼陷地层压力演化及其成藏意义 | 鲍晓欢等 |
| 油气聚集系数的研究方法及应用 | 祝厚勤等 |
| 降水入渗补给过程中优先流的确定 | 齐登红等 |