



末次盛冰期巽他陆架海平面和植被变化对陆表碳通量影响的数值模拟研究

李金澜, 田 军

Effects of Sunda Shelf exposure and vegetation changes on land-atmosphere carbon exchange during the Last Glacial Maximum

LI Jinlan and TIAN Jun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022021101>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[东海南部陆架水体2011年夏季温盐结构及其对台湾暖流和黑潮入侵的指示](#)

The summer thermohaline structure of 2011 of the southern East China Sea shelf and its implications for the intrusion of Taiwan Warm Current and Kuroshio Current

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 151

[渤海湾西岸晚更新世以来的沉积环境演化及碳埋藏评价](#)

Environmental evolution and carbon burial assessment of the west coast of Bohai Bay since Late Pleistocene

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 194

[东海陆坡—冲绳海槽水体剖面地球化学特征与指示意义](#)

Geochemistry of the water profiles at the slope of East China Sea and Okinawa Trough and its implications

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 102

[南海北部陆坡神狐海域SH-CL38站位的粒度特征及沉积记录](#)

Sediment grain size characteristics of the Core SH-CL38 in the Shenhu area on the northern continental slope of the South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 90

[珠江口内伶仃洋晚第四纪黏土矿物组成特征及对源区气候变化的指示](#)

Late Quaternary clay minerals in the inner Lingdingyang of the Pearl River Estuary, southern China: Implications for paleoclimate changes at the provenance

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 202

[南黄海中部隆起晚新近纪—第四纪沉积序列的地层划分与沉积演化](#)

Stratigraphic classification and sedimentary evolution of the late Neogene to Quaternary sequence on the Central Uplift of the South Yellow Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 25



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李金澜, 田军. 末次盛冰期巽他陆架海平面和植被变化对陆表碳通量影响的数值模拟研究 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(2): 110-118.

LI Jinlan, TIAN Jun. Effects of Sunda Shelf exposure and vegetation changes on land-atmosphere carbon exchange during the Last Glacial Maximum[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(2): 110-118.

末次盛冰期巽他陆架海平面和植被变化对陆表碳通量影响的数值模拟研究

李金澜, 田军

同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

摘要: 末次盛冰期巽他陆架陆地暴露面积比现代增加将近一倍, 该时期东南亚的碳汇能力是否比现代更强? 本文利用 GOSAT 现代卫星数据集、实测碳密度数据集, 对现代森林和草原生态系统碳通量 (陆表碳通量) 进行分析, 发现二者的固碳能力相差较大, 与地球系统模式的结果一致。本文基于末次盛冰期巽他陆架上植被分布类型的争议, 为量化末次盛冰期巽他陆架暴露对大气二氧化碳浓度变化 (陆表碳通量) 的影响, 利用美国国家大气研究中心 (NCAR) 的通用陆地模型 (CLM4), 以巽他陆架的植被、陆地面积为敏感条件进行了两组试验, 考察末次盛冰期巽他陆架植被变化对陆表碳通量的影响。通过敏感试验结果分析, 结合已有的孢粉化石证据, 认为当末次盛冰期巽他陆架暴露且被热带雨林覆盖时, 仅通过陆表碳交换就会使得东南亚的碳汇能力增强约 0.16 PgC/a, 在全球大气二氧化碳浓度的冰期-间冰期旋回中扮演着重要角色, 表明植被重建的可靠性对模拟末次盛冰期巽他陆架的陆地碳循环过程及其对气候的反馈非常重要。模拟结果还表明, 末次盛冰期暴露的巽他陆架应具有较强的储碳能力, 与冰期陆地的碳源角色相反, 值得进一步研究。

关键词: 植被变化; 陆表碳通量; 碳汇; 末次盛冰期; 巽他陆架

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022021101

Effects of Sunda Shelf exposure and vegetation changes on land-atmosphere carbon exchange during the Last Glacial Maximum

LI Jinlan, TIAN Jun

State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: The land exposure area of the Sunda Shelf in the southern South China Sea during the last glacial maximum (LGM) was nearly twice that in modern times. Was the Sunda Shelf a stronger carbon sink at that time? Though the study of the LGM carbon cycle depends on reliable vegetation reconstruction, both GOSAT satellite data and measured carbon density data utilized show that the role of different ecosystems in the carbon cycle could be very different. Whether there were tropical forests or savanna grassland on the Sunda Shelf during the LGM is a controversy. The land-atmosphere carbon exchange of the forest ecosystem is much greater than that of the grassland ecosystem. We used the Community Land Model (CLM4) to carry out two groups of sensitivity cases, aiming at quantifying the impacts of land area increase and vegetation distribution on land-atmosphere carbon exchange. Combining the pollen fossil evidence, our results showed that the exposed Sunda Shelf covered by the forest ecosystem in the LGM absorbed more carbon from the atmosphere at a rate of 0.16 PgC/a than in modern times. It indicated that the Sunda Shelf in LGM was a carbon sink, which was opposite to the role of other terrestrial carbon sources and was worthy of further study.

Key words: vegetation change; land-atmosphere carbon exchange; carbon sink; Last Glacial Maximum; Sunda Shelf

地球表层系统碳库中, 海洋碳储量高达 38000 PgC (1 PgC = 1 皮克 (10^{15} g) 碳), 占据全球碳库的绝大部分, 其中有 700~1000 PgC 储存在表层海水中,

这部分碳可与大气碳库 (约 780 PgC) 发生直接交换, 是全球碳循环的重要组成部分^[1]。陆地生态系统是碳储量最大的生物碳库, 包括植被生物量碳库

资助项目: 国家自然科学基金重点项目“探索晚新生代太平洋中深层经向翻转流与气候演变冰期旋回的关系”(42030403); 国家自然科学基金面上项目“晚中新世大洋碳位移事件的成因机制及其古环境效应”(41776051)

作者简介: 李金澜 (1995—), 女, 博士研究生, 大气物理与环境专业, E-mail: 12031335@mail.sustech.edu.cn

通讯作者: 田军 (1974—), 男, 教授, 从事古海洋学与古环境变化研究, E-mail: tianjun@tongji.edu.cn

收稿日期: 2022-02-11; **改回日期:** 2022-03-06. 文凤英编辑

(植被地上、地下碳库)和土壤碳库两大部分(图 1)。在数量上,现代陆地生态系统总初级生产量(GPP)约为 120 PgC/a,通过植物自养呼吸返还到大气中的碳(autotrophic respiration, AR)约为 59 PgC/a;剩余部分称为净初级生产量(NPP),通过植物组织脱落、死亡、可溶性有机物的根分泌等形式转移到土壤中,当然,大部分的 NPP 也是会通过动物呼吸、微生物呼吸、挥发物排放等形式回到大气中(图 1)。如果从碳循环的角度来考虑,大气碳库中每年都有大约 15%~18%的碳进入到陆地生态系统(大气碳库约为 780 PgC),再考虑到海洋碳库也会与大气进行碳交换,使得大气中的碳每 3~4 年就会完全更新一次(1 除以每年交换的量),这是地球系统各大碳库中流动最强的一部分碳。土壤碳库的更新周期大约为 25 年,植被碳库的更新周期大约为 10 年。事实上,植物的光合、呼吸作用过程充当了全球碳循环的驱动力。

比如在现代的热带地区,孕育着全球约 60% 的植被生物量^[2],热带 NPP 占全球的 50% 以上^[3],仅占全球陆地面积 7%~10% 的热带森林在全球碳循环中的地位十分重要。亚马逊热带雨林因此拥有“地球之肺”的称号,其次是刚果雨林和东南亚雨林,它

们的地上生物量均为亚马逊雨林的一半左右^[4]。除了地上生物量碳库,土壤碳库在陆地生态系统碳库中一般占有更大的份量。热带雨林泥炭地储存了约 6 亿 t 的土壤碳^[5],是重要的陆地碳汇。在现代,陆地碳汇固定了大部分“去向不明”的大气 CO₂,完整未受破坏的热带生物群落估计净碳汇为 1.1±0.3 PgC/a^[6]。

冰期,东南亚雨林则尤为值得关注,因为如今的东南亚是“海洋性大陆”,爪哇岛、马来半岛、苏门答腊岛、中南半岛、婆罗洲等岛屿之间的水域有较大部分的水深不超过 70 m^[7](图 2);在海平面下降约 120 m 的盛冰期,巽他陆架的暴露可使得东南亚的陆地面积增加一倍。在这样的情况下,东南亚是否是一个比现代更强的碳汇呢?当然,末次盛冰期的气候状态与现代相差很大,温度和降水可能都有不同程度的降低^[8],植被分布可能与现代有所不同。目前关于末次盛冰期巽他陆架植被重建有很大争议,不能确定其是否是被热带森林覆盖或已经演变成稀树草原^[9-13]。虽然不同类型的生态系统在碳循环过程和机理上具有一定的相似性,但它们的总初级生产量、呼吸强度、碳滞留时间和碳储量等都具有很大的差异。比如,森林和草原生态系统的

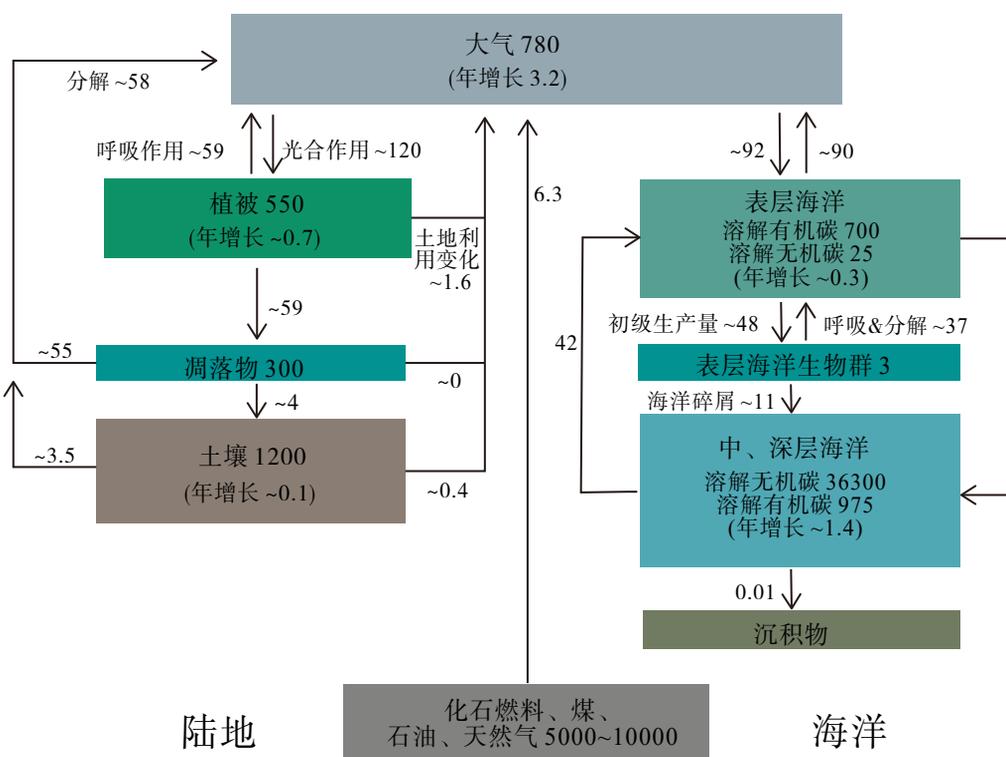


图 1 1990s 全球碳循环^[1]

单位: PgC 或 PgC/a。

Fig.1 Global carbon cycle in the 1990s^[1]

Unit: PgC or PgC/a.

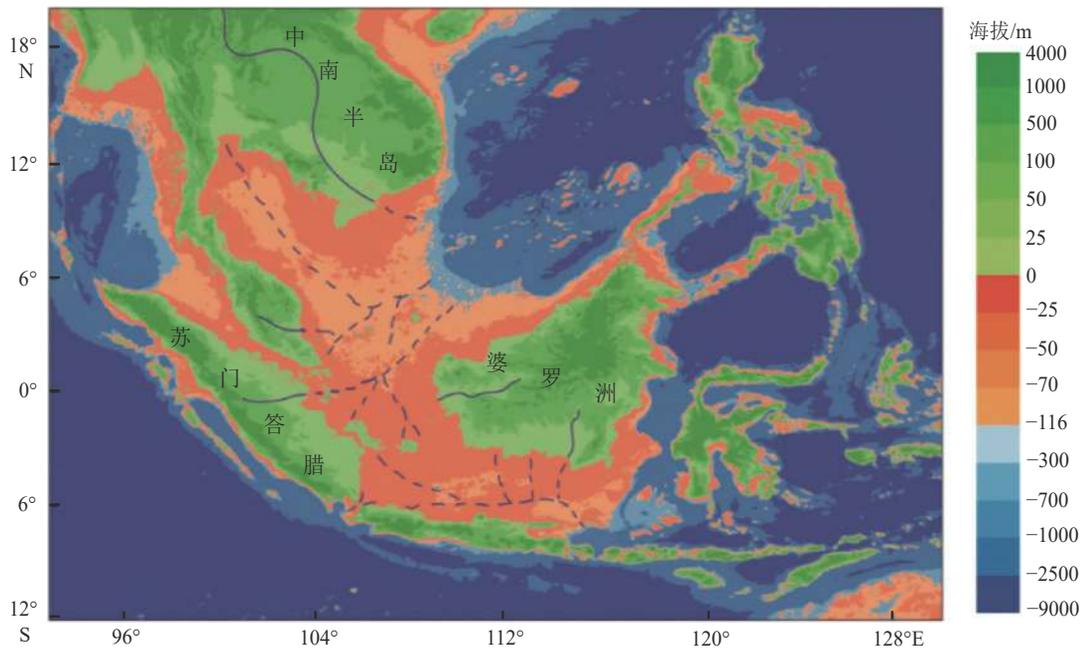


图2 巽他陆架地形与河流

蓝色虚线代表巽他陆架暴露后发育的河流^[9,18]。地形数据来源: NOAA 全球地形数据 ETOPO1 (doi:10.7289/V5C8276M)。原图来自李金澜等^[19]。

Fig.2 Topography and rivers in Southeast Asia

The blue dotted line represents the rivers developed after the exposure of the Sunda Shelf^[9,18]. Terrain data source: NOAA global terrain data etopo1 (DOI: 10.7289 / v5c8276m). The picture is from LI Jinlan et al^[19].

碳密度差别很大。虽然目前暂未有直接计算或监测大范围陆地生态系统的碳储量的方法,但仍可通过实地调查结合计算转换的方法得到^[14-15]。在中国,科学家们做了大量的陆地生态系统碳密度数据的实地监测和文献搜集处理工作,并构建了2010s中国陆地生态系统碳密度数据库^[16]。该数据库有多达15610条数据,其中包括7927条植被生物量碳密度数据和7683条土壤有机碳数据。该数据库中,碳密度最高的生态系统是热带雨林,全国平均的森林生态系统碳密度是草地生态系统碳密度的两倍以上。森林和草原生态系统的碳通量也有很大差别。日本于2009年发射的GOSAT卫星的全球二氧化碳通量产品中,包括全球陆地生态系统表层碳通量数据,该数据集表明热带雨林是全年陆表碳通量最大的区域,而非洲大陆的年均陆表碳通量较低是由于分布着广泛的热带草原。不同类型的生态系统对气候的反馈作用也有所区别,主要体现在地表反照率和蒸腾作用的差异上^[17]。

影响末次盛冰期碳循环的因子众多,海平面下降导致巽他陆架陆地暴露面积增加可能是过去研究中的薄弱点。而且,由于末次盛冰期巽他陆架的植被分布记录有限,一定程度上限制了巽他陆架的

碳循环研究。因此,本研究试图通过数值模拟方法,首先量化极端情形的海陆分布、植被分布对陆表碳通量的影响,再结合已有的植被重建证据,说明末次盛冰期巽他陆架海平面和植被变化在碳循环中的重要性。

1 数据和方法

1.1 CMIP5 数据

在进行巽他陆架的数值试验之前,本文分析了第5次国际耦合模式比较计划(CMIP5)中全球地球系统模型的控制试验(PI试验)、末次盛冰期试验(LGM试验)的模拟结果。该分析的目的是:首先,从数值模型的角度评估末次盛冰期全球气候条件变化、森林面积变化对陆地-大气碳交换的潜在贡献;其次,与本研究陆面模型的模拟结果进行比较、验证。

在CMIP5中,共有9个模式进行了LGM全球试验,但本研究仅对包含了完整碳循环模块的地球系统模式的模拟结果进行了分析,它们分别是德国的MPI-ESM-P模式、日本的MIROC-ESM模式、法

国的 IPSL-CM5A-LR 模式。因为在物理气候系统模式中, 大气 CO₂ 是作为模式固定不变的外强迫, 所以在植被初始场相同或差别不大的情况下, 我们无法从物理气候系统模式的输出结果中, 判断不同模式模拟出的物理场差异是否是由植被不同所引起的。但在包含碳循环的地球系统模式中, 大气 CO₂ 是作为模式的预报量, 不管陆面模式中嵌入的是静态植被模型还是动态植被模型, 模式中的陆地、大气、海洋三者之间的碳通量都是时刻变化的, 各个模式分量也是动态的。以上地球系统模式输出数据由地球系统网格联合会 (The Earth System Grid Federation, ESGF) 提供。对比评估结果见 3.1。

1.2 模型介绍

本研究使用美国国家大气研究中心 (NCAR) 的通用陆面模型 (community land model, CLM4) 和河流运输模型 (river transport model, RTM) 的耦合版本, 大气模块为 1948—1972 年的气象数据, 对陆面模型进行循环驱动^[20]。CLM4 是全球模型, 本文选取了模式的中等分辨率版本, 大气和陆面模块有着相同的网格配置, 空间水平分辨率为 1.9°×2.5°, 陆面垂直方向上共有 15 层。为节约计算成本, 本研究暂不考虑海洋、海冰、陆冰模块分量, 为满足地球系统模型 (CESM1.2.1) 的接口要求, 这些模块分量均使用“存根”版 (stub)。

关于碳循环的模拟, CLM4 中耦合的陆地生物地球化学模型 Biome-BGC (4.1.2 版本)^[21-22], 可对陆地碳、氮循环进行完全预测性处理。但是, 该模型没有考虑地下土壤碳库。对地面植物覆盖的划分, CLM4 中采用的是植物功能型 (plant functional type, PFT) 的概念。植物功能型是一个植物集, 实际是将功能相同或相近的植物物种划分为一种植物功能型。不同植物功能型具有不同的茎叶光学特性、光合参数等, 这些特性决定了它们对太阳辐射的吸收、反射和透射的效果不同, 在光合作用、蒸腾作用和气孔张度等方面也会有所区别。CLM4 中共有 15 种

植物功能型, 其中热带地区主要包括热带常绿阔叶林、热带落叶阔叶林、C3 草本植物和 C4 草本植物。除此之外, CLM4 中还定义了“裸土”覆盖类型, 与植物功能型一起组合成单元网格/次网格内的陆地覆盖。

1.3 试验设置

由于影响末次盛冰期碳循环、陆表碳通量的因子众多, 本研究的重点在于揭示巽他陆架暴露引起的植被变化对陆表碳通量的单独作用效果, 所以除了植被和东南亚的海陆分布外, 其他如冰盖、地形等均采用 1850 年控制试验的标准, 大气二氧化碳含量固定在工业革命前期水平, 为 284.7×10^{-6} 。大气强迫则采用 QIAN 等制作的数据 (1948—1979 年) 对 CLM4 进行循环驱动, 其中包括太阳辐射、降水、气温、风速、气压等^[20]。

本研究设计了如下 4 个试验 (表 1)。首先, 在 1850_XX 和 lgm_XX 实验中, 东南亚地区的海陆分布分别设置为现代情形、LGM 情形 (海平面降低 120 m), 其他区域默认为现代的海陆分布; 因此两者对比得到的是巽他陆架暴露引起的陆表碳通量变化。另外, 在 XX_tree 和 XX_grass 实验中, 分别把东南亚全区的植被设置为热带常绿阔叶林、C4 草原, 其他区域植被均由默认的 MODIS 数据提供。后者 (植被敏感试验) 的设置之所以使用全区雨林、全区 C4 草原两种极端情形, 不仅是基于目前巽他陆架植被重建结果的争议, 而且还因为热带雨林、热带草原生态系统也可能会出现在末次盛冰期巽他陆架上, 这是两种碳密度相差最大的生态系统, 两种极端化的植被分布情形将给出巽他陆架植被对陆表碳通量的最大影响范围。而常绿阔叶林和 C4 草本植物的选择, 则综合考虑了模型中的植被分类以及 LGM 时期巽他陆架可能存在的水热条件。本文采用的 4 个试验结果, 均基于平衡调整后的 30 模式年平均数据进行分析。

表 1 敏感试验设计方案

Table 1 Experimental design

试验简称	海陆分布	植被覆盖
1850_tree	现代的海陆分布	东南亚全区为热带常绿阔叶林
1850_grass	现代的海陆分布	东南亚全区为C4草本植物
lgm_tree	东南亚全区海平面下降120 m	东南亚全区为热带常绿阔叶林
lgm_grass	东南亚全区海平面下降120 m	东南亚全区为C4草本植物

注: 东南亚所指的具体范围是东经95°至130°、南纬10°至北纬20°。

2 结果

2.1 巽他陆地碳库末次盛冰期模拟的可行性分析

通过利用 MPI-ESM-P 模式、MIROC-ESM 模式、IPSL-CM5A-LR 模式试验结果的诊断分析,本文从数值模型角度评估末次盛冰期全球气候条件变化、森林面积变化对陆表碳通量的潜在贡献。主要采取两种比较手段:第一种比较是模式自身的 PI 试验和 LGM 试验的对比。PI 试验即模式的控制试验(将温室气体、臭氧、气溶胶和太阳常数固定在 1850 年的基础上上循环积分,代表没有人类活动影响下的现代强迫条件),其结果常用来与气象要素的现代观测结果进行比较,以评估模式自身的误差或可靠性;而 LGM 试验与 PI 试验的不同之处在于,LGM 试验采用的是末次盛冰期的外强迫条件,其输出结果通常需要与 PI 试验进行比较,以得出末次盛冰期的气候条件在该模式中起到的贡献。第二种比较是不同模式之间的横向对比,可考察不同的植被类型、不同的参数化方案等对陆地碳循环的影响。

陆地总初级生产量(GPP)是大气碳进入陆地生态系统的最主要途径,也是衡量陆地-大气之间碳交换的重要指标。在 MPI-ESM-P、IPSL-CM5A-LR、MIROC-ESM 这 3 个模式的 PI 试验中,它们所模拟的全球陆地 GPP 总和都大致与现代相当(现代约 120 PgC/a,工业革命前期比现代稍小),且末次盛冰期的总初级生产量都要比现代低(图 3),这与其他非数值模拟手段对碳循环的研究结果相符^[1]。与许多研究结果一样,温度和降水是影响陆地生态系统生产量的最主要因素^[23-24],在数值模式中也有这样的体现,比如 IPSL-CM5A_LR 模式所模拟的现代 GPP 总和要比其余两个模式稍高,对应该模式中较高的降水量;而且 IPSL-CM5A_LR 模式所模拟的末次盛冰期 GPP 和现代 GPP 差距最大,这也对应着该模式的末次盛冰期降水量相对现代降低最多。

在诊断巽他陆架对陆表碳通量的潜在贡献上,我们选取东经 95°至 130°、南纬 10°至北纬 20°区域作为分析范围(以下称此区域为东南亚)。表 2 展示了东南亚区域的陆地生态系统 GPP 以及它在全球 GPP 所占的比例;表 3 和表 4 分别展示的是东南亚森林面积、草地面积及在全球森林面积中所占的比例(该区域的植被类型大致只有森林和草原两种)。可以看出,在这 3 个地球系统模式的 LGM 试验中,东南亚区域的陆地 GPP 总和都要比 PI 的高,

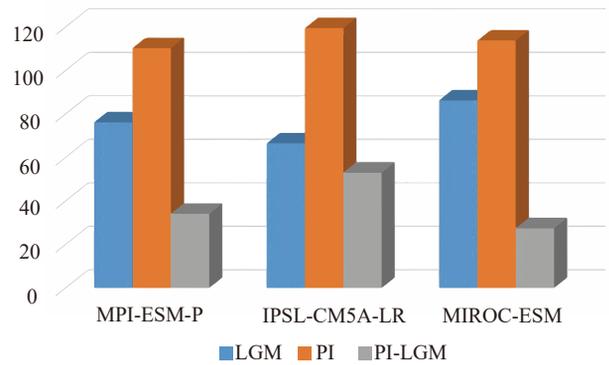


图 3 3 个地球系统模式的 LGM 和 PI 试验对全球陆地总初级生产量 GPP 的模拟结果

单位: PgC/a。

Fig.3 Simulated global terrestrial gross primary production by MPI-ESM-P, IPSL-CM5A-LR, and MIROC-ESM, respectively

Unit: PgC/a.

表 2 东南亚陆地 GPP 总和及其占全球的比例

Table 2 Terrestrial GPP in Southeast Asia and its proportion in the world PgC/a

	LGM	PI	LGM-PI
MPI-ESM-P	7.17 (9.40%)	6.72 (6.09%)	0.45 (3.31%)
IPSL-CM5A-LR	9.63 (14.48%)	0.17 (0.14%)	9.46 (14.34%)
MIROC-ESM	13.52 (15.67%)	10.57 (9.29%)	2.95 (6.38%)

表 3 东南亚森林面积总和及其占全球的比例

Table 3 Total forest area in Southeast Asia and its proportion in the world 10^{14} m²

	LGM	PI	LGM-PI
MPI-ESM-P	4.67 (13.40%)	2.66 (7.31%)	2.01 (6.09%)
IPSL-CM5A-LR	4.93 (9.81%)	2.35 (4.52%)	2.58 (5.29%)
MIROC-ESM	6.24 (7.12%)	3.86 (5.37%)	2.37 (1.75%)

表 4 东南亚草地面积总和及其占全球的比例

Table 4 Total grassland area in Southeast Asia and its proportion in the world 10^{13} m²

	LGM	PI	LGM-PI
MPI-ESM-P	1.81 (0.84%)	0.94 (0.42%)	0.87 (0.42%)
IPSL-CM5A-LR	8.00 (1.78%)	3.05 (0.66%)	4.95 (1.12%)
MIROC-ESM	2.22 (0.93%)	1.04 (0.37%)	1.18 (0.55%)

而且由于末次盛冰期的全球 GPP 总和比现代更低,因此末次盛冰期东南亚区域在对全球 GPP 的贡献上具有更重要的地位。而且在这 3 个地球系统模式的 LGM 试验中,东南亚区域的温度、降水都是降低的,因此该区域之所以能够有更大份量的 GPP,

极有可能是由于陆地面积增大的缘故。比较 IPSL-CM5A-LR 模式与其他两个模式, 可以发现 IPSL-CM5A-LR 模式的 LGM 试验与 PI 试验模拟的东南亚 GPP 差异最大, 这是因为该模式的 LGM 试验中森林和草原面积都增大得最多, 这也说明陆地面积增加会导致陆地-大气碳交换增加。

通过对 3 个地球系统模式的陆地生态系统生产量进行比对分析, 基本可以认为植被变化、陆地面积变化会导致陆地-大气碳交换量的变化。当然, 关于植被分布和生产量的考虑, 只不过是陆表碳通量、碳循环的研究提供参考。要明确知道末次盛冰期巽他陆架在碳循环中扮演的角色, 就必须定量分析陆地生态系统与大气之间的净碳交换量是多少, 这样才能判断它在大气碳库中究竟扮演碳源还是碳汇的角色。

基于以上分析结果, 本研究利用数值模拟手段, 对末次盛冰期巽他陆架的植被分布做出极端化假设, 即考虑全区阔叶林和全区 C4 草本植物两种情况, 以量化末次盛冰期巽他陆架对陆表碳通量的影响范围, 再在这些试验的基础上, 参考有限的地质记录做出具体说明。

2.2 末次盛冰期巽他陆架海平面和植被变化对陆地生产量的影响

表 5 展示了 4 个试验的陆地生态系统生产量输出结果。从数值上来看, 模拟的全球陆地 GPP 总和大致与现代相当, 即现代约 120 PgC/a, 工业革命前期比现代稍小, 也与上文所述 3 个地球系统模式 MPI-ESM-P、IPSL-CM5A-LR、MIROC-ESM 的 PI 试验结果大致相同, 说明本文的试验设计方案没有对模式的稳定性造成影响, NPP 与 GPP 的比值也比较恒定。

分别对比巽他陆架暴露前后的植被敏感试验, 可以看出: 1850_tree 的全球总初级生产量、全球净初级生产量都比 1850_grass 的大, 而 lgm_tree 的全球总初级生产量、全球净初级生产量都比 lgm_grass 的大(表 5), 造成这种差异的主要原因是东南亚区域的植被变化。东南亚陆地覆盖为热带阔叶常绿林时, 对全球碳循环的贡献比陆地覆盖为热带草原时要更大一些(表 5), 这与我们目前对这两种生态系统的碳通量观测结果相符合。同时, 对比表 5 中 lgm_grass 和 1850_tree 的模拟结果, 可以发现这两个试验的全球 GPP 和 NPP 总和相当, 也就是说, 当巽他陆架完全暴露, 即使其全部为草原覆盖, 东南亚的陆地生产量也与现代全为热带森林覆盖时相

表 5 4 个敏感试验的 GPP、NPP 比较

Table 5 Comparison of GPP and NPP in four sensitivity tests

	PgC/a			
	1850_tree	1850_grass	lgm_tree	lgm_grass
全球GPP	117.00	112.53	126.22	118.72
全球NPP	39.52	37.72	42.30	39.34
东南亚GPP	11.66 (9.97%)	7.78 (6.91%)	20.86 (16.53%)	13.65 (11.50%)
东南亚NPP	3.66 (9.25%)	2.12 (5.63%)	6.48 (15.32%)	3.64 (9.27%)

注: 括号内数值是东南亚占全球的比例。

当, 在全球碳循环中的地位不容小觑。当然, 若是森林覆盖, 巽他陆架暴露导致的东南亚在全球碳循环中扮演的角色会更加重要。

从空间分布上来看, 不论巽他陆架是否暴露, 在 XX_tree 与 XX_grass 两个实验中, 陆地总生产量差异 (Δ GPP) 最大值出现在赤道外的热带地区, 如中南半岛; 而净初级生产量差异 (Δ NPP) 的最大值出现在赤道附近区域(图 4)。根据 $GPP = NPP + AR$ (呼吸作用), Δ GPP、 Δ NPP 的地区差异是由呼吸作用差异导致的, 具体表现为: 在赤道附近, 阔叶林、草原都具有极强的呼吸作用, 但在赤道外的热带区域, 阔叶林的呼吸作用比草原更强; 而呼吸作用的地区差异与植被类型、气象条件(如温度、降水)有关。

2.3 末次盛冰期巽他陆架海平面和植被变化对陆表碳通量的影响

在碳循环研究上, 除了对植物生产量的考虑外, 我们还定量地知道陆地-大气之间的净碳交换量 (net ecosystem exchange, NEE), 以明确巽他陆架在碳循环中扮演的角色; 同时, 陆表碳通量的空间分布情况也是我们想了解的, 这对于揭示影响碳循环的机理尤为重要。

在 CLM4 模式中, 与净碳通量相关的变量主要有净生态系统碳交换量 (Net Ecosystem Exchange of carbon, NEE)、净生物群系生产量 (Net Biome Production, NBP)、净生态系统生产量 (net ecosystem production, NEP)。其中, NEE 是陆地和大气之间的净碳交换量, 是最直观的, 包括所有碳收益和损失过程的净碳交换量, NEE 的正、负值分别表明其充当大气碳汇、碳源; NEP 是生态系统中碳的净积累, 是总初级生产量 GPP 减去生态系统呼吸 (total ecosystem respiration, ER) 所消耗的光合产物, 但不包括人类活动导致的碳损失等; 而 NBP 是除去各类自然和人为干扰等非生物呼吸过程碳交换后所剩

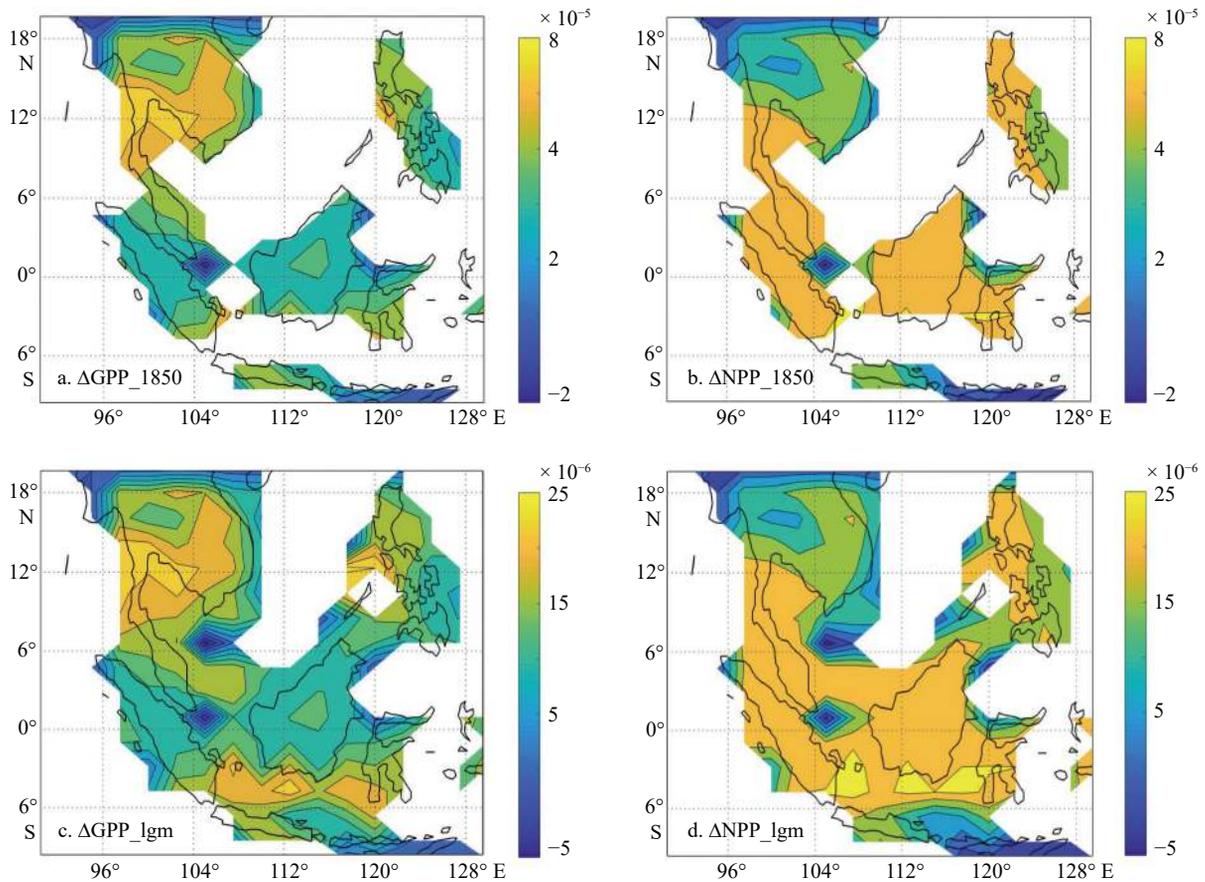


图4 1850_tree与1850_grass的GPP (a)、NPP (b)之差, lgm_tree与lgm_grass的GPP (c)、NPP (d)之差
单位: $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

Fig.4 The differences of (a) GPP and (b) NPP between 1850_tree and 1850_grass, the differences of (c) GPP and (d) NPP between lgm_tree and lgm_grass
Unit: $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

的部分,在绝对数值上与NEE相等。

理论上,通过对NEE或NBP进行计算,就可以定量得出巽他陆架的植被变化、陆地面积变化究竟会对大气 CO_2 浓度产生何种影响。但是,可能由于CESM模式的PI试验对森林、草原两种植物功能型在人类耕种、土地利用等方面处理方式的不同,这两组敏感试验结果的全球NBP总和出现了“XX_tree”变为负数(大气碳源/向大气释放 CO_2)、而“XX_grass”为正数(大气碳汇/吸收大气 CO_2)的情况(表6);根据现代森林和草原生态系统的固碳能力推测,可以认为这并非自然状态下会出现的情形。因此,考虑到本研究的核心是探讨距今2万年之前的末次盛冰期时的巽他陆架,在没有人类活动影响的条件下,我们认为净生态系统生产量(NEP)是一个更适合用于定量研究“末次盛冰期巽他陆架陆-气碳通量”的指标。

从表6的各敏感试验的NEP比较中可以看到,lgm_tree的NEP大于1850_tree的NEP,lgm_

grass的NEP大于1850_grass的NEP。这说明当植被类型未发生改变时,末次盛冰期巽他陆架的暴露(植被覆盖面积增加)会使得东南亚陆表碳通量增加。同理,1850_tree的NEP大于1850_grass的NEP,lgm_tree的NEP大于lgm_grass的NEP,说明陆地面积相同时,森林生态系统对陆表碳通量的影响比草原生态系统更加显著,这符合目前对这两种生态系统的碳通量观测结果。假设现代东南亚的

表6 4个敏感试验的NBP、NEP比较
Table 6 Comparison of NBP and NEP in four sensitivity tests
PgC/a

	1850_tree	1850_grass	lgm_tree	lgm_grass
全球NBP	-0.025	0.0106	-0.0049	0.0093
东南亚NBP	-0.0013	2.08×10^{-4}	-0.001	2.58×10^{-4}
全球NEP	1.711	1.5943	1.8916	1.6121
东南亚NEP	0.1705 (9.96%)	0.032 (2.01%)	0.33 (17.45%)	0.046 (2.85%)

注:括号内数值是东南亚占全球的比例。

植被分布和 1850_tree 相同, 那么在末次盛冰期巽他陆架暴露后、东南亚全区为阔叶林覆盖的情况下, 东南亚的碳汇能力增强约 0.16 PgC/a; 如果东南亚全区为草原覆盖, 则东南亚的碳汇能力减弱约 0.12 PgC/a。

从净生态系统生产量 (NEP) 的空间分布上来看, 同样发现, 赤道附近的 NEP 相比稍微远离赤道的中南半岛等地的 NEP 要小 (图 5a), 这是由于赤道附近生态系统中极高的呼吸消耗, 而热带地区的这种强呼吸作用可能受到温度控制。因此, 在末次盛冰期比现代更冷的气候条件下, 巽他陆架是否就有可能成为一个更大的大气碳汇? 同时, 由于两种植被类型下的 NEP 有所区别 (图 5b), 但差别最大的地方出现在纬度稍高而温度稍低的中南半岛, 而不是在赤道附近。因此, 在比现代更冷的末次盛冰期, 巽他陆架植被类型的改变对碳循环的影响力是否会更加显著? 这些问题在本文的敏感试验中暂时无法解答, 但在未来的耦合试验中我们可以进一步思考, 或者可以针对此问题进行温度敏感试验。

2.4 模拟结果与孢粉化石记录对比

本研究假设了两种相对极端的植被分布情形, 定量分析了末次盛冰期巽他陆架植被变化、陆地面积增加引起的陆表碳通量变化。值得注意的是, 真实气候条件下末次盛冰期巽他陆架的陆表碳通量是诸多因素耦合作用下的综合结果, 而本文通过敏感试验对比分析得出的这些数值并不代表末次盛冰期真实气候条件下的陆表碳通量变化, 仅代表着植被、陆地面积这两个因素单独作用的效果。我们的试验结果表明, 植被变化和陆地面积变化都会影

响末次盛冰期东南亚的陆表碳通量。

尽管此前对于末次盛冰期巽他陆架的植被分布有所争议, 但在苏门答腊、马来半岛、婆罗洲等现代岛屿上, 孢粉化石记录都较为明确地指示, 即使在末次盛冰期热带森林没有减少, 低地雨林孢粉成分在末次冰期仍占主要地位, 而禾本科花粉只在澳洲北部明显增多^[25]。戴璐等^[25]从植物学角度分析了全球各地影响萨瓦纳草原发育的气候因素, 指出降水量对萨瓦纳分布的主导作用, 包括年均降水量和降水量的季节变化; 冰期禾本科花粉明显增多的区域, 就是以现代降水季节性强的区域为中心扩张。而现代 Sunda-Sahul 陆架的萨瓦纳草原只有在澳洲北部才出现, 在低纬度地区是不存在的^[26], 这也为冰期巽他陆架没有出现草原扩张提供了佐证。因此, 结合本研究的 CLM4 数值模拟分析结果, 认为末次盛冰期巽他陆架暴露会使得东南亚的碳汇能力增强约 0.16 PgC/a, 可能使得巽他陆架成为末次盛冰期的又一个“地球之肺”, 在全球大气二氧化碳浓度的冰期-间冰期旋回中扮演着重要角色。

3 结论和展望

本研究利用 CLM4 模型探讨了巽他陆架海平面变化、植被变化两个因素对陆表碳通量的影响。数值模拟结果表明: 末次盛冰期巽他陆架的暴露、植被分布的变化都会显著影响陆表碳通量。结合已有的孢粉化石证据, 当末次盛冰期暴露的巽他陆架被热带雨林覆盖, 这些植被变化会通过影响陆表碳交换使得东南亚的碳汇能力比现代增强约 0.16 PgC/a, 与冰期陆地的碳源角色相反。

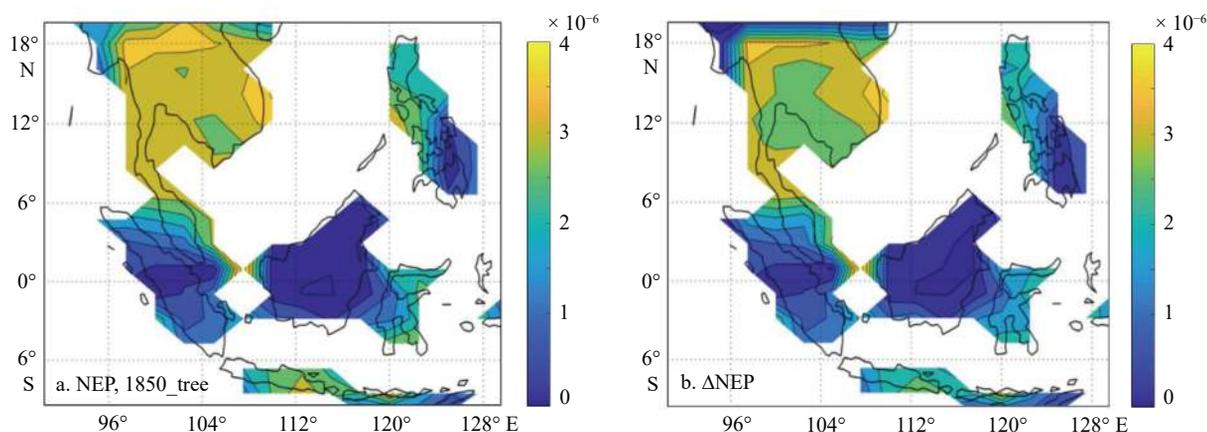


图 5 1850_tree 的 NEP (a), 1850_tree 与 1850_grass 的 NEP 之差 (b)

单位: $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

Fig.5 (a) Simulated NEP in the 1850_tree experiment, (b) the differences of NEP between 1850_tree and 1850_grass

Unit: $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

本研究进行的敏感试验是大气数据对陆地模型的循环驱动,不包含陆地对大气的反馈,因此基于本研究的数值试验,只能分析末次盛冰期巽他陆架暴露导致的陆地面积变化、植被变化这两个因素对陆表碳通量的独立作用结果,而无法分析碳循环对大气的反馈过程。此外,受土壤碳循环参数化及模型开发的限制,本研究只关注了陆面和大气碳交换。因此,未来还需要开展全耦合模型的数值模拟研究。

参考文献 (References)

- [1] Houghton R A. Balancing the global carbon budget [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2007, 35: 313-347.
- [2] Pan Y D, Birdsey R A, Phillips O L, et al. The structure, distribution, and biomass of the world's forests [J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2013, 44: 593-622.
- [3] Melillo J M, McGuire A D, Kicklighter D W, et al. Global climate change and terrestrial net primary production [J]. *Nature*, 1993, 363 (6426): 234-240.
- [4] Saatchi S S, Harris N L, Brown S, et al. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108 (24): 9899-9904.
- [5] Hooijer A, Page S, Canadell J G, et al. Current and future CO₂ emissions from drained peatlands in Southeast Asia [J]. *Biogeosciences*, 2010, 7 (5): 1505-1514.
- [6] Malhi Y. The carbon balance of tropical forest regions, 1990–2005 [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2010, 2 (4): 237-244.
- [7] Tjia H D. The sunda shelf, southeast Asia [J]. *Zeitschrift Für Geomorphologie*, 1980, 24 (4): 405-427.
- [8] De Deckker P, Tapper N J, van der Kaars S. The status of the Indo-Pacific Warm Pool and adjacent land at the Last Glacial Maximum [J]. *Global and Planetary Change*, 2003, 35 (1-2): 25-35.
- [9] Heaney L R. A synopsis of climatic and vegetational change in Southeast Asia [J]. *Climatic Change*, 1991, 19 (1-2): 53-61.
- [10] Taylor D, Yen O H, Sanderson P G, et al. Late Quaternary peat formation and vegetation dynamics in a lowland tropical swamp; Nee Soon, Singapore [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2001, 171 (3-4): 269-287.
- [11] Sun X J, Li X, Luo Y L. Vegetation and climate on the sunda shelf of the South China Sea during the last Glactiation-Pollen results from station 17962 [J]. *Acta Botanica Sinica*, 2002, 44 (6): 746-752.
- [12] Bird M I, Taylor D, Hunt C. Palaeoenvironments of insular Southeast Asia during the Last Glacial Period: a savanna corridor in Sundaland? [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2005, 24 (20-21): 2228-2242.
- [13] Wang X M, Sun X J, Wang P X, et al. Vegetation on the sunda shelf, South China Sea, during the last glacial maximum [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2009, 278 (1-4): 88-97.
- [14] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统的碳库[M]//王庚辰, 温玉璞. 温室气体浓度和排放监测及相关过程. 北京: 中国环境科学出版社, 1996 [FANG Jingyun, LIU Guohua, XU Songling. Carbon pool of terrestrial ecosystem in China[M]//WANG Gengchen, WEN Yupu. Greenhouse Gas Concentration and Emission Monitoring and Related Processes. Beijing: China Environmental Science Press, 1996.]
- [15] Xie Z B, Zhu J G, Liu G, et al. Soil organic carbon stocks in China and changes from 1980s to 2000s [J]. *Global Change Biology*, 2007, 13 (9): 1989-2007.
- [16] 徐丽, 何念鹏. 中国南北样带典型森林土壤属性数据集[J]. *中国科学数据*, 2019, 4 (1): 73-81. [[XU Li, HE Nianpeng. A dataset of forest soil properties in north-south transect of eastern China [J]. *Science Data Bank*, 2019, 4 (1): 73-81.]
- [17] Bonan G B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests [J]. *Science*, 2008, 320 (5882): 1444-1449.
- [18] Molengraaff G A F, Weber M. On the relation between the pleistocene glacial period and the origin of the Sunda sea (Java and South China-sea), and its influence on the distribution of coralreefs and on the land- and freshwater fauna [J]. *Koninklijke Nederlandsche Akademie van Wetenschappen Proceedings*, 1921, 23 (1): 395-439.
- [19] 李金澜, 田军. 末次冰期南海南部暴露的巽他陆架是大气碳汇吗?[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38 (4): 155-163. [LI Jinlan, TIAN Jun. The Sunda Shelf: a carbon sink during the last glacial period? [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38 (4): 155-163.]
- [20] Qian T T, Dai A G, Trenberth K E, et al. Simulation of global land surface conditions from 1948 to 2004. Part I: forcing data and evaluations [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2006, 7 (5): 953-975.
- [21] Thornton P E, Rosenbloom N A. Ecosystem model spin-up: estimating steady state conditions in a coupled terrestrial carbon and nitrogen cycle model [J]. *Ecological Modelling*, 2005, 189 (1-2): 25-48.
- [22] Thomas H, Prowe A E F, Lima D I, et al. Changes in the North Atlantic Oscillation influence CO₂ uptake in the North Atlantic over the past 2 decades [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, 22 (4): GB4027.
- [23] Zhao M S, Running S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009 [J]. *Science*, 2010, 329 (5994): 940-943.
- [24] Zhu L K, Southworth J. Disentangling the relationships between net primary production and precipitation in southern Africa savannas using satellite observations from 1982 to 2010 [J]. *Remote Sensing*, 2013, 5 (8): 3803-3825.
- [25] 戴璐, Yeok F S. 末次冰期时暴露的巽他大陆架可能被热带稀树草原覆盖吗?[J]. *地球科学进展*, 2017, 32 (11): 1147-1156. [[DAI Lu, Yeok F S. Was there savanna corridor on the exposed Sunda shelf during the last glacial period? [J]. *Advances in Earth Science*, 2017, 32 (11): 1147-1156.]
- [26] Lehmann C E R, Archibald S A, Hoffmann W A, et al. Deciphering the distribution of the savanna biome [J]. *New Phytologist*, 2011, 191 (1): 197-209.