

DOI: 10.5846/stxb201403270577

张小敏, 张秀英, 朱求安, 江洪, 李新会, 程敏. 中国陆地自然植物有氧甲烷排放空间分布模拟及其气候效应. 生态学报, 2016, 36(3): - .
Zhang X M, Zhang X Y, Zhu Q A, Jiang H, Li X H, Cheng M. Spatial distribution simulation and the climate effects of aerobic methane emissions from terrestrial plants in China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(3): - .

中国陆地自然植物有氧甲烷排放空间分布模拟及其气候效应

张小敏^{1,2}, 张秀英^{1,2,*}, 朱求安³, 江洪^{1,2}, 李新会^{1,2}, 程敏^{1,2,4}

1 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210023

2 江苏省地理信息技术重点实验室, 南京 210023

3 西北农林科技大学林学院生态预测与全球变化实验室, 杨凌 712100

4 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023

摘要:区域尺度陆地植物有氧条件下排放甲烷及其气候效应研究不仅对甲烷收支平衡研究具有重要意义,对于全球变化研究也具有重要推动作用。本研究通过改进 Keppler 提出的公式,模拟了中国区域植物有氧甲烷排放的时空分布。利用 IBIS 模拟的 NPP 数据结合相关文献统计生物量与 NPP 的比值,计算得到中国区域自然植物叶片生物量,以及叶片甲烷排放。结果显示,2001 年至 2012 年中国植物生物量与植物叶片甲烷排放量在 SresA2 和 SresB1 两种情景下差异不明显;但是气候变化模式差异的影响会随着时间的推移而扩大。在 SresA2 情景下,中国地区年均植物生物量为 10803.22Tg C,叶片生物量为 1156.15Tg C。如果不考虑天气对光照的影响,植物叶片甲烷排放年均 2.69Tg,约是全国年甲烷排放总量 7.01%,是中国稻田甲烷排放总量的 29.05%。在各植被类型中,草地叶片甲烷排放量最高,达到 47.53%,其次是混交林。森林(针叶林、阔叶林、混交林)是主要的植物甲烷排放源,占中国区域植物甲烷排放总量的 51.28%,其次是草地,占 47.47%。中国区域植物叶片甲烷排放南高北低,东高西低的分布状态主要由地表植被覆盖类型决定,光照和温度也是重要影响因素。对 SresA2 和 SresB1 两种气候情景下中国植物甲烷排放预测分析,中国区域植物甲烷排放不断增加,在 SresA2 情景下不同时期的平均增长率为 9.73%,高于 SresB1 情景的 5.17%,且两种情景下的增长率都在降低。本世纪 SresA2 和 SresB1 变化情景下,年均植物排放的甲烷 CO₂ 当量分别为 83.18Tg 和 77.34Tg,约占中国年均二氧化碳排放总量的 1.39%和 1.29%。

关键词:甲烷; 植物; IBIS; 生物量; 空间分布

Spatial distribution simulation and the climate effects of aerobic methane emissions from terrestrial plants in China

ZHANG Xiaomin^{1,2}, ZHANG Xiuying^{1,2,*}, ZHU Qiu'an³, JIANG Hong^{1,2}, LI Xinhui^{1,2}, CHENG Min^{1,2,4}

1 International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

2 Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information Science and Technology, Nanjing 210023, China

3 Laboratory for Ecological Forecasting and Global Change, College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

4 Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China

Abstract: Until recently, it was commonly accepted in the scientific community that methane was produced only under anaerobic conditions through microbial metabolism. However, in 2006, Keppler et al. showed that methane can be released from plants under aerobic conditions. Subsequent experimental studies have demonstrated that aerobic methane is released from plants, and that the emission rate of aerobic methane is constant at a given temperature demonstrate biomass may be

基金项目:博士点基金资助(20100091120017);自然科学基金项目(41471343)

收稿日期:2014-03-27; 网络出版日期:2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangxy@nju.edu.cn

the source of plant aerobic methane. Although the exact mechanism underlying plant aerobic methane emission has not been identified to date, these experiments suggest that it is dependent on light and temperature. Over the past 20 years, atmospheric methane content has decreased due to an unknown mechanism and there seems to be an unidentified methane source, which may be related to plant aerobic methane emissions. Thus, quantitative research on methane emissions from plants under aerobic conditions and its effects on climate are critical to calculating a global methane budget. Based on a modified Keppler's model and net primary productivity (NPP) simulated by the Integrated Biosphere Simulator (IBIS), this study simulates and predicts spatial and temporal variation in methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions in China. It then rebuilds patterns of plant aerobic methane emission suited for China with leaf biomass, and explores the spatial and temporal characteristics of terrestrial plant aerobic methane emissions and variations in emissions among plant types. We also simulated the effect of aerobic methane emissions on climate change, especially the greenhouse effect, under different scenarios, e.g., doubled CO₂. Biomass accumulation ratios, which were used to establish quantitative relationships between NPP and biomass, and ratios of leaves and intact plant biomass were collected from previous studies. Although simulated biomass and methane emissions under the IPCC scenario A2 and B1 were generally similar between 2001 and 2012, significant differences between them emerged later in the simulation. Under the SresA2 scenario, the total annual biomass was 10803.22 Tg, leaf biomass was 1156.15Tg, and methane emissions were 2.69Tg, accounting for 7.01% of the annual national methane emissions and 29.05% of methane emissions from rice. Grassland showed the highest methane emissions under aerobic conditions, accounting for 47.53% of the annual national total emissions; mixed forests ranked the second. Forests, including coniferous forests, broadleaved forests, and mixed forests, accounted for 51.28% of the total aerobic plant methane emissions in China, while grassland accounted for 47.47%. Methane emissions were higher in south China than in the north, and higher in the east than in the west, mainly due to the different land cover and climatic conditions. Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions are expected to increase in the future under both the SresA2 and the SresB1 scenarios, according to our model. The average annual growth rate of methane emissions is 9.73% under the SresA1 scenario, higher than that under the SresB1 scenario (5.17%). However, these growth rates are expected to decline under both scenarios. In the 21st century, the carbon dioxide equivalent of annual plant methane emissions will be 83.18 Tg under the SresA2 scenario, and 77.34 Tg under the SresB1 scenario, accounting for 1.39% and 1.29% of China's annual carbon dioxide emissions, respectively.

Key Words: methane; plants; IBIS; biomass; spatial distribution

甲烷是重要的温室气体之一,对其源汇的研究一直是全球变化研究的热点。甲烷排放源有自然源和人为源^[1]。之前科学界一致认为,生物产生甲烷主要是产甲烷菌在厌氧条件下进行,但2006年Keppler等^[2]提出陆地植物在有氧条件下排放甲烷,之后的相关实验研究^[3-11]确定植物组织有氧条件下甲烷排放的事实。Wang等^[3]研究发现7种灌木离体叶片有氧环境释放甲烷,证明植物体有氧环境释放甲烷,并且指出山地生态系统中木本植物释放的甲烷可能在全球气候变化中扮演重要角色。

不同生活型的植物释放甲烷的能力差异很大,在不同的环境条件下植被甲烷排放也不相同。在紫外线和高温环境下,植物甲烷释放速率会大大提高^[4, 8, 12-17],而缺少紫外线辐射可能是Bowling^[18]研究中没有检测到甲烷排放的原因。Keppler^[5]曾指出甲烷产生可能源自存在于细胞壁中的果胶甲氧基团,而果胶甲基酯酶能够降低果胶释放甲烷的速率^[14],同位素标记方法表明有氧环境下,植物果胶在紫外光和温度作用下发生光化学反应产生甲烷。Austin和Vivanco^[20]认为紫外辐射胁迫导致了植物组织的光降解,植物排放的甲烷可能是植物细胞物质降解的副产物。但Makoto^[21]认为植物甲烷产生过程不受酶的影响。有研究^[7, 8, 22]认为活性氧(ROS)在果胶和植物叶片甲烷产生中有重要作用,同时Wang^[23]研究得到在物理伤害和无氧条件下(没有生物菌)将增强植物甲烷排放,受到环境胁迫,如物理伤害,60种植物鲜叶短暂的甲烷平均排放速率达到53.4

ng/(g DW h) (0—687ng/(g DW h))。Makoto^[21]发现甲烷排放速率与比叶重有明显负相关,比叶重较高的植物通常拥有复杂结构和大面积细胞壁,叶片结构是不同种类植物有氧甲烷排放速率存在差异的重要影响因素。以上研究表明,虽然植物甲烷排放机理仍然不是特别确定^[24-25],但是植物在有氧条件下确实排放甲烷,而且排放速率受光照、温度等影响。

在区域尺度植物甲烷排放研究方面,Kepler^[2]估计了全球的陆地植物有氧甲烷排放量为 62-236Tg/a,约占全球甲烷排放总量的 10%—30%。Parsons 等^[26]在 Kepler 的基础上,利用植物的叶生物量和非叶(枝,干等)生物量来代替 NPP 进行计算,得到全球植物甲烷排放量为 52.7Tg/a;Kirschbaum 等^[27]采用叶生物量代替 NPP 和用光合速率修正 NPP 两种方法估算,得到的排放量为 10—60Tg/a;2008 年谢旻等^[28]基于 Kepler 的研究建立了中国地区的陆地植物甲烷排放模式,并通过利用 NOAA 气象卫星 AVHRR 归一化植被指数 (NDVI) 计算得到的中国植物第一净生产力 (NPP, net primary productivity),定量估计了中国地区植物甲烷排放总量及其空间分布。

本研究将学习 Parsons 的思路,基于 Kepler 陆地植物甲烷排放计算模式,利用 IBIS 模拟的长时间序列 NPP 数据,以及生物量累计比建立 NPP 和生物量之间数量关系,通过叶片生物量重新建立适合中国的陆地植物甲烷排放模式,探讨在 CO₂ 倍增,不同未来气候变化情景下中国地区植物有氧甲烷排放的时空分布格局,进而定量模拟对未来气候变化的影响。

1 数据与研究方法

1.1 建立陆地植物甲烷排放模式

给定温度下恒定的甲烷排放速率表明生物量可能是植物有氧甲烷排放的来源^[14],在区域尺度的甲烷排放研究中,也大多以单位生物量甲烷排放速率 (ng CH₄/(g DW h)) 为基础进行计算。Bruhn^[14]研究表明甲烷释放速率随温度呈指数增加,与 UVB (280nm—320nm) 辐射强度线性相关,UVB 对甲烷排放速率影响高于 UVA (320—400nm),而可见光对甲烷排放速率没有作用。紫外线照射下,C3 植物甲烷排放速率为 301ng/(g DW h) 高于 C4 植物甲烷排放速率 180ng/(g DW h)^[16]。在 McLeod^[8] 研究中,UVB 强度在 1.3—3.93W/m² (总强度在 3.69—9.48W/m²) 的甲烷排放速率为 249—660.8ng/(g DW h),平均值为 429.58ng/(g DW h)。Qaderi 和 Reid^[15, 29] 同样从完整植物监测到高的甲烷排放 (100—300ng/(g DW h))。这些研究数据和 Kepler^[2] 用于计算全球尺度植物甲烷排放的甲烷排放速率相近 (光照条件下,植物体甲烷排放速率均值 374ng/(g DW h)),因此在该研究中将使用 Kepler 研究的甲烷排放速率参与计算。

本研究所用植被 CH₄ 排放模型基于 Kepler^[2] 的方法建立。Parsons^[22] 曾指出 Kepler 计算全球植物甲烷排放量时是基于植物增长速度 (NPP) 而并不是植物生物量,因为在 Kepler 研究中并没有直接表明生长速度与甲烷排放速率之间的直接关系,并且在计算过程中用单位质量生物量甲烷排放速率乘以生产力 NPP,然后又乘以生长季长计算年甲烷排放,相当于两次乘了以生长时间。另外,Parsons^[22] 认为叶生物量用来衡量植物甲烷排放更合适,并以此重新计算全球植物甲烷排放量,较 Kepler 计算结果降低了 72%。在 Christopher^[30] 的研究中也没有将 NPP 直接参与植被有氧甲烷估计,原因之一就是 NPP 代表植被所有器官和组织的碳汇效率,包含植被各部分积累的含碳量。同时对植物甲烷排放的研究大多是基于叶片的甲烷排放进行,并且基于 Kepler 对有损和完好无损的植被甲烷排放测量结果显示,植物体叶生物量部分是植物有氧甲烷排放的主要来源。所以本研究将植物净初级生产力 (NPP) 替换为植物叶片生物量,通过 NPP 与生物量之间统计的比例因子转换得到植物叶生物量,计算甲烷排放。

根据 Kepler 植物甲烷计算模型中,每天的甲烷排放量 ER_{day} :

$$ER_{day} = (ER_{sun} \times h_{sun}) + (ER_{nosun} \times h_{nosun}) \quad (1)$$

其中, ER_{sun} 和 ER_{nosun} 是有/无太阳直接辐射的甲烷排放速率,单位是 ng/(g DW h); h_{sun} 和 h_{nosun} 分别是一天有无太阳直接辐射的时间, $h_{sun} + h_{nosun} = 24$ h。Kepler 研究中植物甲烷排放速率见表 1^[2],然后乘以生长季和日光

照时间计算得到研究时段(年)植物有氧甲烷排放量。

因为植物残落物的甲烷排放量很小,在本研究中将忽略不计;对紫外线和温度影响植物甲烷排放的研究表明,没有紫外线照射就没有甲烷排放,但植物甲烷排放速率会随着温度升高而增大。所以在本研究中计算符合地上植物体(本研究中也即叶片)有氧甲烷释放的光照和温度条件下的排放量,排放速率 $ER = 374 \text{ ng}/(\text{g DW h})$ 。根据数据源情况,本研究基于 2001—2012 年地表覆盖类型图的每个网格对应的不同植被类型,模拟时间段内甲烷排放时间长度(h , 小时)将由日光照数据和温度等参数获得。

$$E(\text{CH}_4) = 2 \times \text{NPP} \times f \times c \times ER \times h \quad (2)$$

其中, $E(\text{CH}_4)$ 是模拟时间段内每个网格甲烷排放量,单位是 ng/a ; NPP 是净初级生产力,单位是 $\text{ng C}/\text{a}$; f 为生产力与生物量之间的转换因子,将 NPP 转换为植物生物量,不同植被覆盖类型各异; c 是叶片生物量与植株生物量的比值, c 和 f 通过查阅近期中国植物生物量和生产力相关文献统计获得; 因子 2 是将以碳含量表示的生物量转换成干物质质量($\text{ng DW}/\text{a}$)表示的生物量,植物生物碳量与干物质质量的转换系数比值在不同的植物之间不同,国际上一般取 0.45 或 0.50^[31], 针叶树叶片平均含碳率 0.5096, 阔叶树为 0.4905, 灌木为 0.4937^[32], 本研究采用碳量与干物质质量 0.5 的比值转换因子。

表 1 Keppler 研究 ER_{sun} 和 ER_{nosun} 的测量值/ $(\text{ng}/(\text{gDW h}))$

Table 1 Measurement of ER_{sun} and ER_{nosun} of Keppler's study

植物和光照状态 Different samples with/without sunlight	ER_{sun}		ER_{nosun}	
	植物体 Intact plants	植物残落物 Detached leaves	植物体 Intact plants	植物残落物 Detached leaves
均值 Mean value	374	8.7	119	1.6
最低 Minimum value	198	1.6	30.7	0.1
最高 Maximum value	598	15.8	207	4.4

ER_{sun} : 有太阳直接辐射的甲烷排放速率, Emission rate with sunlight; ER_{nosun} : 无太阳直接辐射的甲烷排放速率, Emission rate without sunlight。

1.2 集成生物圈模拟器 IBIS 模拟数据 NPP

集成生物圈模拟器 IBIS (Integrated Biosphere Simulator) 是由美国康斯卫星大学全球环境与可持续发展中心的 Foley 等于 1996 年开发的^[33-34]。IBIS 是一个综合的陆地生物圈模型, 充分考虑了植被组分和结构对环境变化的响应。在一个集成框架内实现对陆表水热过程、陆地生物地球化学循环和植被动态的模拟, 描述了陆面过程, 包括土壤、植被与大气之间的能量、水分和动量交换^[33, 35-36]。IBIS 的输入数据包括气象数据、植被类型数据、土壤数据、地形数据、陆面掩膜数据以及不同气候变化情景下气候变化数据(主要为降水、气温、相对湿度和云量因子)等。利用 IPCC 相关气候模式生成的历史及未来的气候情景数据作为 IBIS 模型的输入数据, 以研究气候变化条件下中国未来的碳的演变趋势。本研究中气候情景 IBIS 数据是在 CO_2 倍增, CGCM3 模式下 SresA2 和 SresB1 两种情景模拟数据。

A2 和 B1 属于 IPCC 排放情景特别报告 (SRES) 中的两种排放情景 (IPCC, 2007)。A2 情景描述的是一个很不均衡的世界, 自给自足, 保持当地特色。各地域间生产力方式的趋同异常缓慢, 导致人口持续增长。经济发展主要面向区域, 人均经济增长和技术变化是不连续的, 低于其他情景的发展速度; B1 描述了一个趋同的世界, 全球人口数量与 A2 情景族相同, 峰值也出现在本世纪中叶并随后下降。不同的是经济结构向服务和信息经济方向迅速调整, 伴之以材料密集度的下降, 以及清洁和资源高效技术的引进。其重点放在经济、社会和环境可持续发展的全球解决方案, 其中包括公平性的提高, 但不采取额外的气候政策干预。^[36]

本研究中 IBIS 模型模拟的 1960 年至 2006 年全国 NPP 总量变化范围在 $1.6 \text{ Gt C}/\text{a}$ 至 $2.0 \text{ Gt C}/\text{a}$ 的区间上, 上升变化幅度约为 $52 \text{ Mt C}/10 \text{ a}$ ($P < 0.0001$)。Fang (2003) 利用 CASA 模型模拟的 1982—1999 年中国植被净第一性生产力结果由 $1.34 \text{ Gt C}/\text{a}$ 增加至 $1.59 \text{ Gt C}/\text{a}$, Cao (2003) 利用 CEVSA 模型和 GLO—PEM 模型对中国 1981—2000 年模拟结果分别为 $2.89 \text{ Gt C}/\text{a}$ — $3.37 \text{ Gt C}/\text{a}$ 和 $2.77 \text{ Gt C}/\text{a}$ — $3.33 \text{ Gt C}/\text{a}$, 该模型在相应时段内模拟结果处于 Fang 和 Cao 结果之间, 年际变化格局与两者结果基本一致。相应时间段内 IBIS 模型模拟结果

低于季劲军(2008)利用 AVIM2 在 1981—2000 年的 NPP 模拟结果,与 Feng(2007)利用 Beps 模拟的 2001 年结果相近。^[36]

1.3 NPP 到植物叶片生物量的转化计算

某一时刻的生物量是一种现存量,而生产力是某一时间段内活生物体新生产出的有机物质总量。不同植物的 NPP 与植物生物量之间的关系不同,像热带森林 NPP 较生物量小,而温带草原 NPP 却比生物量大^[26]。不同的植被叶片生物量占植株生物量的比例也不同,因此需要根据不同的地表覆盖植物类型,得到生物量与生产力之间和叶片生物量与植株生物量之间的关系(c 和 f)。利用全国 2001—2012 年土地覆盖分类图,通过查阅文献统计计算中国地区包括针叶林、阔叶林、混交林、灌木、草原和沙漠或荒原的生物量与生产力(NPP)以及叶片生物量占植株生物量的比例,根据比值结合 NPP 分布数据推导出生物量的分布。

土地覆盖植物类型的生物量与 NPP 比值(f)以及叶生物量比例因子(c)的确定分别查找描述中国植物生产力和生物量的相关文献得到,根据我国近期植被生产力和生物量研究数据得到的统计结果列于表 2,以及与 Webb^[37]对美国生产力研究结果和 Lieth、Whittaker 的生物量累积比的比较。

表 2 不同植物类型生物量与 NPP

Table 2 Grow and environmental indicators of different plants

类型 Plant type	叶生物量/植株生物量 ⁽¹⁾ leaf biomass/plant biomass, c	生物量/NPP ⁽¹⁾ biomass/NPP, f	生物量/NPP ⁽³⁾ biomass/NPP, f	ANPP/NPP ⁽¹⁾	ANPP/NPP ⁽²⁾
针叶林 Needleleaf forests	0.069	9.478	10—50	0.84	0.716
阔叶林 Broadleaf forests	0.055	7.5	10—50	0.735	0.664
混交林 Mixed forests	0.063	8.06	10—50	0.889	—
灌木 shrub	0.142	2.633	2—12	0.667	—
草地 Grasslands	0.341 ⁽⁴⁾	2.017	1.5—3	0.341	0.353
裸地或荒原 Barren or sparsely vegetated	0.112 ⁽⁴⁾	2.0 ⁽³⁾	2—10	0.112 ⁽²⁾	0.112

(1)来源于文献[31, 34, 38-70]统计平均值;(2)来源于 Webb[37]对美国生产力研究;(3)Lieth 和 Whittaker[71]提出生物量累积比;(4)假设草地或者荒原地上植物部分均算作叶生物量,其叶生物量与植物生物量的比值就等于地上净初级生产力与植株净初级生产力之比,根据文献得到的 ANPP 与 NPP 比值。

NPP:净初级生产力,net primary productivity;ANPP:地上净初级生产力,above-ground net primary productivity。

1.4 植物全年照射时间的计算

模拟时间段内每个网格甲烷排放量由(2)式计算,其中模拟时段内总甲烷排放时间(h)由日光照数据和温度等参数决定。多年研究表明,植物甲烷排放受到光照(主要是紫外线)和温度的影响。紫外线提高植物甲烷排放速率,黑暗状态下没有或很少甲烷排放。在中国中纬度地区春夏季节紫外线强度高,一年中紫外线辐射(280—400nm)均可达到 30—44W/m²^[72],达到 15—30W/m²的天数占 49%,日平均紫外辐射强度达到 28.26W/m²,10W/m²以上的天数平均占全年的 60.4%,一天中 8.5—15 时左右,紫外线强度均在 5W/m²以上^[73],夏季地表户外紫外线(UVB)强度由中纬度到热带为 2—4W/m²^[74]。这与前面论述的其他研究中紫外线辐射下甲烷排放速率与 Keppler 研究数据相近表明将 Keppler 研究数据应用于自然植物甲烷排放的计算是合理的。紫外线辐射强度会随着纬度降低和高度增大而增大^[75]。在杨燕华等^[10]研究中,参与实验的亚热带常见树种在温度 10℃时,植物就会有甲烷释放,当达到 20℃时,所有植物均产生甲烷,高于 30℃时,叶片平均排放速度是 10—30℃时均值的 3.96 倍。易黎明^[11]研究表明 21 种植物叶片在 12—20℃下释放甲烷。所以计算一定太阳光照条件(本研究以某一地点天文总辐射强度达到 600W/m²以上,保证到达地面 UVB 强度至少在 1W/m²)且温度在 10℃以上的时间作为该研究甲烷排放时间。光照表明紫外线照射,而温度则能反映一个栅格位置的气候特征。

各位置有无太阳光照及达到光照条件的时长根据 DEM 得到^[76-78],温度则由旬平均温度(2010 年 MODIS 月旬平均温度)确定,不考虑天气状况。两种数据叠合得到某点位置一年内符合植物甲烷排放的时间

长度(h)。

2 结果分析与讨论

2.1 生物量时空分布

研究利用 IBIS 模拟的 NPP 数据,结合 2001—2012 年中国土地覆盖类型以及通过查阅文献资料得到的生物量与 NPP 比值,计算 2001—2012 年中国区域植物生物量。两种情景模式下 2000—2012 年植物生物量数值差别不明显,相应年份差值绝对值最大相对于两者平均值的 4.46%,最小为 0.02%,平均为 2.16%,叶片生物量 SresA2 情景模式下范围为 1072.99Tg C—1211.53Tg C, SresB1 情景模式下为 1092.24Tg C—1218.92Tg C,相差平均为 1.97%。

中国区域 2001 年至 2012 年年平均植物生物量在 SresA2 模式情景下为 10803.22Tg C,叶片生物量为 1156.15Tg C。森林(包括针叶林、阔叶林和混交林)生物量为 8768.72Tg C,比郭兆迪等^[79]研究的中国 2004—2008 年年均森林总生物量 6868Tg C 高。其中混交林植物生物量最高,达到 7322.14Tg C,占该模式情景下全国年均生物量总量的 67.78%;全国草地叶生物量最高,达到 577.00Tg C,是叶生物总量的 49.91%。原因主要是中国混交林分布广及其植株生产力和生物量较高,针叶林和阔叶林虽然植株生产力和生物量高但是在中国区域分布面积较混交林小,而草地面积很大,虽然植株年净初级生产力和生物量比较低,但是其叶生物量基本占据整个地上生物量,所以年总量较高。

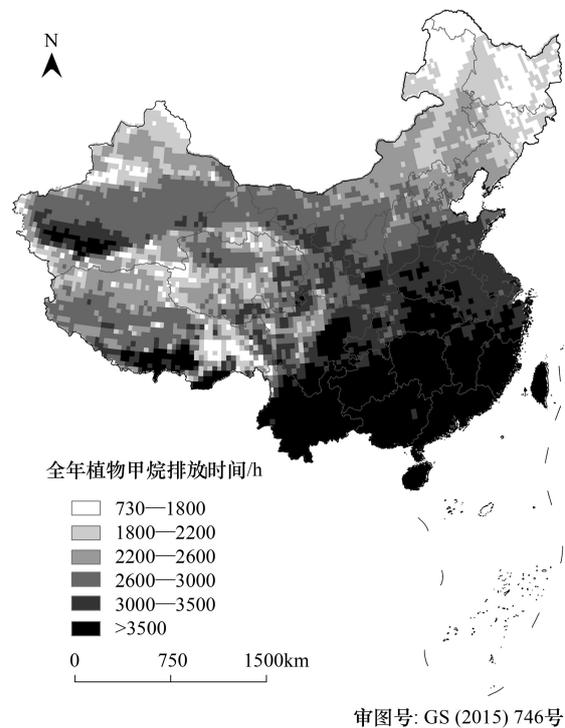


图 1 全年甲烷排放时间

Fig. 1 Duration of methane emission from plant

表 3 SresA2 模式下 2001—2012 年生物量(Tg C)

Table 3 Biomass of year 2001—2012 under SresA2 scenarios

年份 Year	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
植株生物量 Plant biomass	9829.14	10221.21	10377.01	10152.64	10903.95	10814.26	10703.90	11131.61	11770.00	11997.63	10889.28	11952.40
叶生物量 Leaf biomass	1115.16	1151.68	1181.29	1072.99	1211.53	1143.86	1171.80	1165.07	1177.45	1187.17	1103.37	1192.48

表 4 SresA2 模式下 2001—2012 年各类植物(地表覆盖类型)年均生物量(Tg C)

Table 4 Annual biomass of plant species from 2001—2012 under SresA2 scenarios

植被类型 plant species	针叶林 Needleleaf forests	阔叶林 Broadleaf forests	混交林 Mixed forests	灌木 Shrub	草地 Grasslands	沙漠、荒原 Barren or sparsely vegetated	年总量均值 Annual inventory
植株生物量 Plant biomass	73.75	1372.83	7322.14	30.94	1902.48	101.07	10803.22
叶生物量 Leaf biomass	5.21	80.55	476.36	4.65	577.00	12.38	1156.15

2.2 植物有氧甲烷排放时空分布

由于水稻田是典型的厌氧甲烷排放源,去除农田等共统计了 6 种植物覆盖类型,包括针叶林、阔叶林、混交林、灌木、草地和沙漠或荒原。在 21 世纪初,两种气候变化情景模式下植物甲烷的排放量比较接近。在 2001—2012 年间,甲烷排放趋势起伏较小,但是整体呈现微弱上涨趋势。SresA2 情景模式下,各类型植物甲

烷排放总量占中国区域总植物叶片甲烷排放量比例最高的是草地和混交林,分别达到 47.53% 和 42.92%, 然后是阔叶林,为 8.03%, 针叶林和灌木占比总和不到 1%。

表 5 不同气候变化模式下 2001—2012 年植被排放甲烷 (Tg)

Table 5 Methane emissions of year 2001—2012 under different scenarios

气候模式 Climate scenario	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
SresA2	2.63	2.70	2.73	2.51	2.81	2.65	2.67	2.70	2.73	2.76	2.59	2.80
SresB1	2.60	2.73	2.71	2.57	2.67	2.62	2.68	2.72	2.74	2.78	2.67	2.81

表 6 不同气候变化模式下 2001—2012 年各类植被(地表覆盖类型)年均甲烷排放/(10^{-3} Tg)

Table 6 Annual methane emissions of plant species from 2001—2012 under different scenarios

气候模式 Climate scenario	针叶林 Needleleaf forests	阔叶林 Broadleaf forests	混交林 Mixed forests	灌木 Shrub	草地 Grasslands	沙漠、荒原 Barren or sparsely vegetated	年总量均值 Annual inventory
SresA2	7.89	216.17	1154.67	9.90	1278.71	23.12	2690.46
SresB1	7.64	215.99	1157.36	10.40	1275.80	23.81	2691.00

中国 2001 至 2012 年年均植物甲烷排放量约为 2.69Tg, 远远低于谢旻^[28]等模拟的结果(11.84Tg), 甚至低于其模拟的最低值(4.83Tg)。主要原因是本研究中采用了叶片生物量代替 NPP 以及植株生物量进行模拟, 并且没有模拟无光照情况下的甲烷排放, 也没有进行凋落物甲烷排放的模拟。根据 Streets 等^[80]的估计, 中国地区 2000 年总的甲烷排放量为 38.36Tg/a, 则自然植物有氧条件下甲烷的排放量是中国甲烷排放总量的 7.01%, 是中国稻田甲烷排放量的 29.05%^[81], 而 NCAR 的一项研究发现植物叶片暴露在阳光下时排放的甲烷量却不到地球甲烷总排放量的 1%^[82]。在谢旻^[28]等的研究中, 中国地区森林、耕地、草地、其他植物类型的甲烷排放量占总排放的比例分别为 43%, 28.3%, 19.0% 和 9.7%, 森林占森林、草地和其他植物类型甲烷排放的 59.97%, 草地占 26.5%。中国地区耕地的甲烷排放量占总排放的比例为 28.3%, 且中国耕地和水域面积总和占全国各类植被覆盖面积的 22.2%, 但由于稻田是典型厌氧甲烷排放源, 所以我们没有统计农田植被对有氧甲烷排放的贡献量, 这也是使得计算结果偏小的原因。在本研究中, 森林植物(针叶林、阔叶林和混交林)作为植物甲烷排放的主要来源与谢旻研究结果一致, 针叶林、阔叶林和混交林占植物甲烷排放总量的 51.28%, 而草地占 47.47%, 与谢旻研究中相差较大, 因为在本研究中主要计算植物叶片生物量而不是植株净初级生产力或者植株生物量的甲烷排放, 草地虽植株生物量以及生产力较小, 但是其地上部分基本上是叶片生物量, 草地叶片生物量相对占比较大, 且中国草地分布面积较广。

中国区域植物甲烷排放高的区域分布在中国南部和西南部地区, 主要有台湾岛、海南岛和华南以及云南地区甲烷年排放量较高。中国区域植被甲烷的分布主要是由中国自然植被分布以及该位置年排放时间所决定, 在中国南部区域由于自然气候条件较好, 温度适宜, 雨水充沛, 光照充足, 使得该区域植被生长旺盛, 生长期较长, 年净初级生产力和生物量比较高, 更加符合植物的甲烷排放条件。2012 年中国北方地区主要分布为农作物, 所以华北一带在本研究中被定义成为自然植物有氧甲烷排放的“空白区”。而在中国西部地区, 主要是西北区域分布沙漠和荒原, 植物生长稀少, 生物量密度低, 植物甲烷排放低。

另外, 对本世纪植物甲烷排放预测使用的均为 2012 年地表植被覆盖数据, 每个时期中国区域地表覆盖不变, 但实际上在 IBIS NPP 模拟过程中随着气候的变化, 地表覆盖类型及其面积是变动的, 所以在长时间序列植物生物量以及甲烷计算结果的时空分布上难免偏差。同时通过统计计算和查阅资料得到的叶生物量、植株生物量与净初级生产力(NPP)数据三者之间关系比值以及利用 DEM 数据模拟的日光照时间和 MODIS 月旬温度数据得到的全年符合植物叶片甲烷排放条件的的时间, 该研究中设定某位置天文辐射强度大于 $600\text{W}/\text{m}^2$ (到达地面理论 UVB 强度至少为 $1\text{W}/\text{m}^2$) 与温度大于 10°C 的时间属符合植物叶片产生甲烷的时间, 并且没有考虑天气的影响, 这些都会给结果带来偏差。

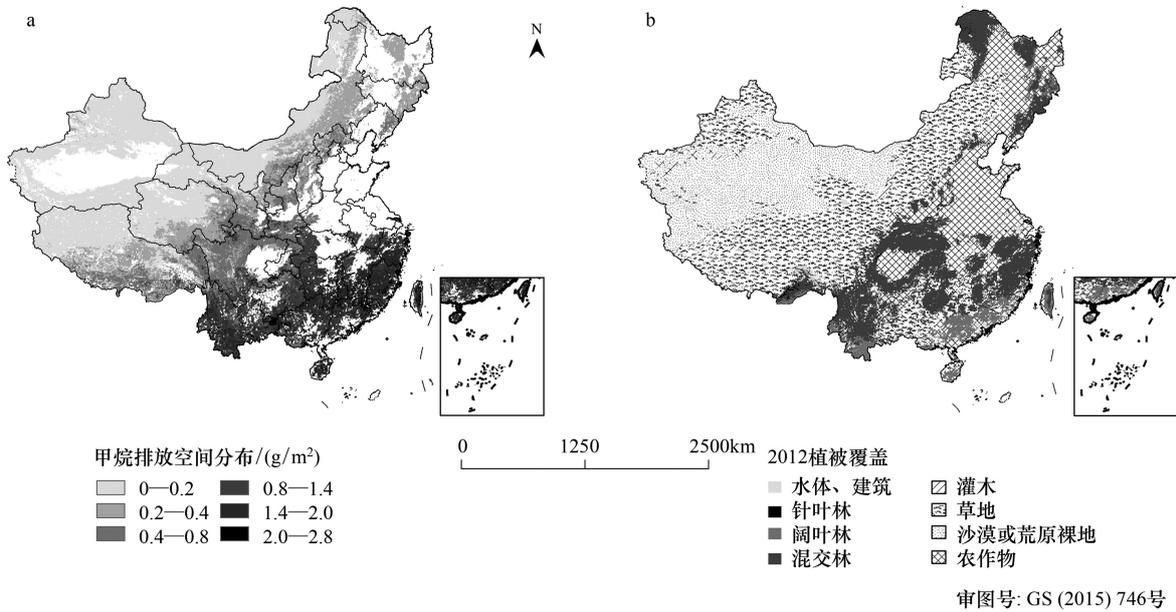


图2 SresA2 情景模式下 2012 年中国区域植物平均甲烷排放空间分布 (a, g/m^2) 以及 2012 年植被覆盖图 (b)

Fig. 2 Spatial distribution of annual methane emissions (g/m^2) in China and the land cover of year 2012 under SresA2 scenario

2.3 未来气候变化模式下中国区域有氧甲烷排放预测及其气候效应

2.3.1 有氧甲烷排放模拟预测

以 2012 年的全国植被覆盖数据为依据,利用 IBIS NPP 数据计算得到 2000—2099 年 100 年的植物有氧甲烷排放的变化规律。图 3 是 SresA2 和 SresB1 情景下 2000—2099 年不同时期中国区域植物甲烷排放量。由图表对比来看,除 2000—2019 年段外,SresA2 情景下不同阶段的甲烷排放量比 SresB1 情景下高。在两种情景模式下,本世纪植物叶片甲烷的排放均持续增长。本世纪后期,植物叶片甲烷排放增长率下降,SresB1 情景下甲烷增长速度低于 SresA2 情景。到世纪末,SresB1 情景下植物有氧甲烷的释放已趋于平稳,增长率下降为 1.52%,而 SresA2 情景下仍然有增长潜力。

在 SersB1 气候变化情景下,2000—2099 年每 20 年阶段有氧甲烷排放年增长率平均值为 5.17%,植物甲烷排放平均增长率较高的是沙漠、荒原和针叶林,分别为 5.79% 和 5.62%,其次是灌木 4.93%。在 SersA2 模式下,植被甲烷排放阶段年平均增长率为 9.73%,其中灌木和沙漠、荒原增长率较高,达到 12.80% 和 12.65%,其次是草地,增长率为 9.34%。

2.3.2 植物有氧甲烷的温室效应

为了便于比较各种不同温室气体对温室效应的影响程度,通常使用综合温势 (Global warming potential, GWP, 也作:全球变暖潜势或全球升温潜能值) 来衡量温室气体对全球暖化的影响。甲烷是仅次于二氧化碳的第二大温室气体,虽然在大气中的含量不多,但是按照 100 年的全球变暖潜势的评估时间,甲烷的 GWP 是二氧化碳的 25 倍。

过去 20 年,大气甲烷温室气体的浓度以一种未知的机理在降低^[83],表现为迷失的甲烷汇^[84]。原因可能

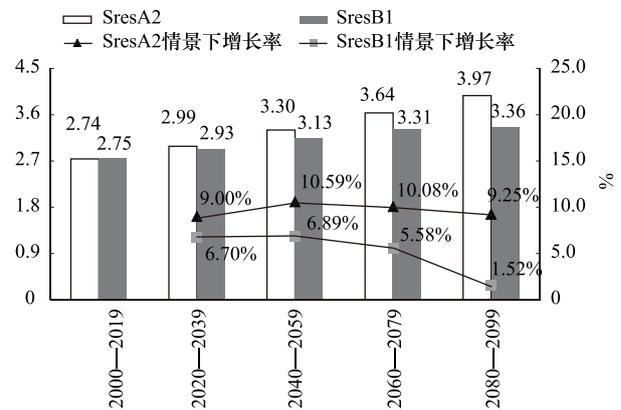


图3 2000—2099 年不同气候变化模式下中国区域不同阶段植物甲烷排放量年均值 (Tg)

Fig. 3 Changes of different stages' methane emissions (Tg) under different scenarios of year 2000—2099 in China

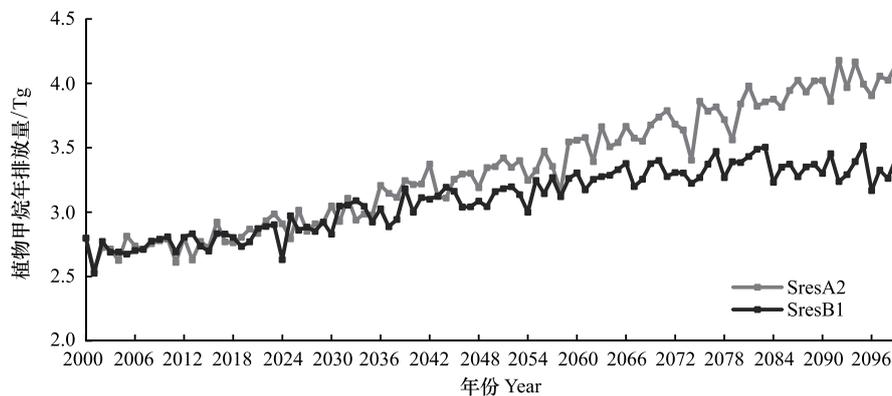


图 4 2000—2099 年植被甲烷排放变化

Fig. 4 Change of methane emissions of year 2000—2099

是近年人类活动乱砍滥伐导致植被覆盖的减少,土壤的裸露与干旱化促进土壤对大气甲烷的氧化,但是有没有可能是因为植物大面积的减少,导致植物甲烷排放减少。根据 IBIS 在 SresA2 和 SresB1 模式下模拟的结果显示,未来全球气温升高,植物生产力将增加,全球植被覆盖情况会随之变动。未来大尺度植被格局变化所引起的大气温室气体甲烷、二氧化碳等浓度变化所产生的温室效应将远大于直接的温度效应^[85]。全球变暖可能增加植物甲烷排放。据预测,到 21 世纪末,全球气温将上升 1.8—4.0℃。以上结果显示,在未来气候变化、CO₂倍增的情况下能够带来 NPP 增加,这在某种程度上增强植物的碳汇能力,从而有助于减缓温室效应。但是植物有氧甲烷的排放,增加了大气中甲烷的浓度,反而对温室效应起到了一定的促进作用。

在 CO₂倍增,两种气候变化情景模式下,植物有氧甲烷排放增加。在 2000—2099 年期间,植物排放的甲烷对温室效应的作用逐渐增加。在 SresA2 和 SresB1 情景下,本世纪中国植物甲烷排放年平均 CO₂当量分别为 83.18Tg 和 77.34Tg,约占中国年均 CO₂排放总量(每年约 60 亿吨^[86])的 1.39%和 1.29%。本世纪初 20 年间,两种气候变化情景模式全国平均每年植物排放 CH₄的全球变暖潜势基本相同的情况下,平均相当于 68.56 Tg CO₂对全球温度升高的贡献量。随着时间的推移两种气候情景模式下植物甲烷的排放差距增大,两者之间甲烷全球变暖潜势差距也变大。本世纪最后 20 年期间,SresA2 情景下增加到了相当于 99.29Tg/a CO₂的增温潜势,SresB1 情景下为 83.91Tg/a CO₂的增温潜势,两者之间有 15.38Tg/a CO₂的差距。可见在 SresA2 气候变化情景下,植物甲烷排放在未来对全球升温的影响将会更大。

3 结论

中国自然植物有氧甲烷排放强度空间分布特征为南高北低,西高东低,主要受地表覆盖的影响。2001 年至 2012 年 SresA2 与 SresB1 两种情景下植物生物量和甲烷排放量差别不明显。在 SresA2 情景下,中国自然植被 2001—2012 年年均生物量为 10803.22Tg C,叶生物量为 1156.15Tg C,植物甲烷排放量为 2.69Tg,是中国地区甲烷排放总量的 7.01%,是中国稻田甲烷排放量的 29.05%。SresA2 情景下,中国各植被类型中,草地和混交林排放甲烷量最大,年均总量占有所有植物类型排放量分别达到 47.53%和 42.92%,主要与这两种植被类型高的覆盖面积和高的叶片生物量有关,其次分别是阔叶林,沙漠或荒原,灌木和针叶林。

本世纪初,虽然自然植物有氧甲烷排放占全国甲烷排放总量比率只有 7.01%,但是在 CO₂倍增的两种气

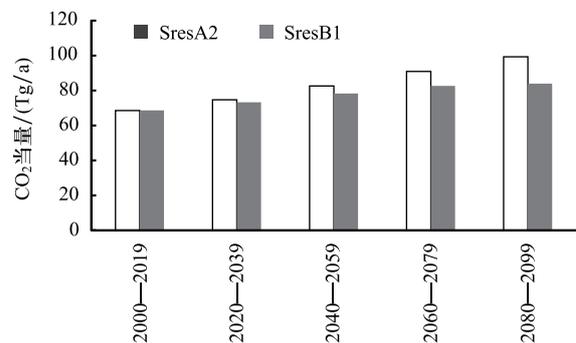


图 5 中国植物甲烷排放当量

Fig. 5 Equivalent of methane emission in China

候变化模式下,对未来中国区域植物有氧甲烷排放的预测表明,随着全国区域未来植被 NPP 的增加,植物生物量累积加速,导致植物甲烷排放增多,植物排放甲烷的影响将增大。在本世纪末 20 年, SresA2 和 SresB1 情景下中国自然植物排放甲烷的 CO₂ 当量分别达到了 83.18Tg/a 和 77.34Tg/a, 约占中国年均二氧化碳排放总量的 1.39% 和 1.29%。在 IBIS 模型不同情景模式以及植被甲烷排放模式模拟下,未来植物生产力的增加加强植物碳汇能力及减少温室效应的同时,植物甲烷排放的增加在某种程度上抵消了这种汇的能力,增加温室效应,但至于两种情景模式下哪种能够更好的平衡这种效应还需要进一步的量化对比研究。并且至今对于区域性植物有氧条件下甲烷排放的研究多数限于该理论提出前期,因此在未来的研究中,应该补充中国区域植物甲烷排放的观测研究,并且明确植物甲烷排放的来源、影响因素和发生机理。

参考文献 (References):

- [1] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, Nogueir N, van der Linden P J, Xiaosu D, Maskell K, Johnson C A . Climate Change 2001: The Scientific Basis; Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- [2] Keppler F, Hamilton J T G, Braß M, Röckmann T. Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions. *Nature*, 2006, 439(7073): 187-191.
- [3] Wang Z P, Han X G, Wang G G, Song Y, Gullledge J. Aerobic methane emission from plants in the Inner Mongolia steppe. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(1): 62-68.
- [4] Vigano I, van Weelden H, Holzinger R, Keppler F, McLeod A, Röckmann T. Effect of UV radiation and temperature on the emission of methane from plant biomass and structural components. *Biogeosciences*, 2008, 5(3): 937-947.
- [5] Keppler F, Hamilton J T G, McRoberts W C, Vigano I, Brass M, Röckmann T. Methoxyl groups of plant pectin as a precursor of atmospheric methane: evidence from deuterium labelling studies. *New Phytologist*, 2008, 178(4): 808-814.
- [6] Brüeggemann N, Meier R, Steigner D, Zimmer I, Louis S, Schnitzler J P. Nonmicrobial aerobic methane emission from poplar shoot cultures under low-light conditions. *New Phytologist*, 2009, 182(4): 912-918.
- [7] Messenger D J, McLeod A R, Fry S C. The role of ultraviolet radiation, photosensitizers, reactive oxygen species and ester groups in mechanisms of methane formation from pectin. *Plant, Cell & Environment*, 2009, 32(1): 1-9.
- [8] McLeod A R, Fry S C, Loake G J, Messenger D J, Reay D S, Smith K A, Yun B W. Ultraviolet radiation drives methane emissions from terrestrial plant pectins. *New Phytologist*, 2008, 180(1): 124-32.
- [9] 郭小伟, 韩道瑞, 杜岩功, 林丽, 张法伟, 李以康, 李婧, 刘淑丽, 曹广民. 青藏高原高寒草甸优势植物种对大气甲烷行为分异机制. *山地学报*, 2012, 30(4): 470-477.
- [10] 杨燕华, 易黎明, 谢锦升, 杨智杰, 江军, 胥超, 杨玉盛. 温度对亚热带地区常见树种叶片甲烷排放的影响. *应用生态学报*, 2013, 24(6): 1545-1550.
- [11] 易黎明, 谢锦升, 杨燕华, 高玉春, 杨玉盛. 中亚热带植物排放甲烷研究初报. *亚热带资源与环境学报*, 2011, 6(1): 26-31.
- [12] Rodriguez J. Aerobic methane production by banana plant. *Cantaurus*, 2007, 15: 21-23.
- [13] Takahashi K, Kosugi Y, Kanazawa A, Sakabe A. Automated closed-chamber measurements of methane fluxes from intact leaves and trunk of Japanese cypress. *Atmospheric Environment*, 2012, 51: 329-332.
- [14] Bruhn D, Mikkelsen T N, Øbro J, Willats W G T, Ambus P. Effects of temperature, ultraviolet radiation and pectin methyl esterase on aerobic methane release from plant material. *Plant Biology*, 2009, 11(Supplement s1): 43-48.
- [15] Qaderi M M, Reid D M. Methane emissions from six crop species exposed to three components of global climate change: temperature, ultraviolet-B radiation and water stress. *Physiologia Plantarum*, 2009, 137(2): 139-147.
- [16] Vigano I, Röckmann T, Holzinger R, van Dijk A, Keppler F, Greule M, Brand W A, Geilmann H, van Weelden H. The stable isotope signature of methane emitted from plant material under UV irradiation. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(35): 5637-5646.
- [17] 杨燕华, 谢锦升, 江军, 杨智杰, 杨玉盛, 陈细香, 吕理兴. 光照与紫外辐射对亚热带树木叶片排放 CH₄ 的影响. *亚热带资源与环境学报*, 2012, 7(4): 64-70.
- [18] Bowling D R, Miller J B, Rhodes M E, Burns S P, Monson R K, Baer D. Soil, plant, and transport influences on methane in a subalpine forest under high ultraviolet irradiance. *Biogeosciences*, 2009, 6(7): 1311-1324.
- [19] Dueck T A, de Visser R, Poorter H, Persijn S, Gorissen A, de Visser W, Schapendonk A, Verhagen J, Snel J, Harren F J M, Ngai A K Y, Verstappen F, Bouwmeester H, Voesenek L A C J, van der Werf A. No evidence for substantial aerobic methane emission by terrestrial plants; a¹³

- C-labelling approach. *New Phytologist*, 2007, 175(1): 29-35.
- [20] Austin A T, Vivanco L. Plant litter decomposition in a semi-arid ecosystem controlled by photodegradation. *Nature*, 2006, 442(7102), 555-558.
- [21] Watanabe M, Watanabe Y, Kim Y S, Koike T. Dark aerobic methane emission associated to leaf factors of two *Acacia* and five *Eucalyptus* species. *Atmospheric Environment*, 2012, 54: 277-281.
- [22] Wang Z P, Xie Z Q, Zhang B C, Hou L Y, Zhou Y H, Li L H, Han X G. Aerobic and anaerobic nonmicrobial methane emissions from plant material. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(22): 9531-9537.
- [23] Wang Z, Keppler F, Greule M, Hamilton J T G. Non-microbial methane emissions from fresh leaves; effects of physical wounding and anoxia. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(28): 4915-4921.
- [24] Nicolini G, Castaldi S, Fratini G, Valentini R. A literature overview of micrometeorological CH₄ and N₂O flux measurements in terrestrial ecosystems. *Atmospheric Environment*, 2013, 81: 311-319.
- [25] Bruhn D, Møller I M, Mikkelsen T N, Ambus P. Terrestrial plant methane production and emission. *Physiologia Plantarum*, 2012, 144(3): 201-209.
- [26] Parsons A J, Newton P C D, Clark H, Kelliher F M. Scaling methane emissions from vegetation. *Trends in Ecology & Evolution*, 2006, 21(8): 423-424.
- [27] Kirschbaum M U F, Bruhn D, Etheridge D M, Evans J R, Farquhar G D, Gifford R M, Paul K I, Winters A J. A comment on the quantitative significance of aerobic methane release by plants. *Functional Plant Biology*, 2006, 33(6): 521-530.
- [28] 谢旻, 李树, 江飞, 王体健. 中国地区陆地植被甲烷排放及其对对流层低层甲烷浓度的影响. *科学通报*, 2008, 53(19): 2365-2370.
- [29] Qaderi M M, Reid D M. Stressed crops emit more methane despite the mitigating effects of elevated carbon dioxide. *Functional Plant Biology*, 2011, 38(2): 97-105.
- [30] Butenhoff C L, Khalil M A K. Global methane emissions from terrestrial plants. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(11): 4032-4037.
- [31] 高凯, 胡永红, 冷寒冰, 孟超, 秦俊. 两种测算香樟单株植物生物量和生产力的方法. *生态学杂志*, 2014, 33(1): 242-248.
- [32] 马钦彦, 陈遐林, 王娟, 蔺琛, 康峰峰, 曹文强, 马志波, 李文宇. 华北主要森林类型建群种的含碳率分析. *北京林业大学学报*, 2002, 24(5-6): 96-100.
- [33] Foley J A, Prentice I C, Ramankutty N, Levis S, Pollard D, Sitch S, Haxeltine A. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, 10(4): 603-628.
- [34] 李高飞, 任海. 中国不同气候带各类型森林的生物量和净第一性生产力. *热带地理*, 2004, 24(4): 306-310.
- [35] Kucharik C J, Foley J A, Delire C, Fisher V A, Coe M T, Linters J D, Young-Molling C, Ramankutty N, Norman J M, Gower S T. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: water balance, carbon balance, and vegetation structure. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(3): 795-825.
- [36] 朱求安. 气候变化条件下中国陆地生态系统水平衡与碳收支时空格局模拟与分析[D]. 南京: 南京大学, 2009.
- [37] Webb W L, Lauenroth W K, Szarek S R, Kinerson R S. Primary production and abiotic controls in forests, grasslands, and desert ecosystems in the united states. *Ecology*, 1983, 64(1): 134-151.
- [38] Jin Z, Qi Y C, Dong Y S. Storage of biomass and net primary productivity in desert shrubland of *Artemisia ordosica* on Ordos Plateau of Inner Mongolia, China. *Journal of Forestry Research*, 2007, 18(4): 298-300.
- [39] 黎燕琼, 郑绍伟, 龚固堂, 陈俊华, 唐波, 朱自芳, 吴雪仙, 慕长龙. 不同年龄柏木混交林下主要灌木黄荆生物量及分配格局. *生态学报*, 2010, 30(11): 2809-2818.
- [40] 赵蓓, 郭泉水, 牛树奎, 孙武, 张志旭. 大岗山林区几种常见灌木生物量估算与分析. *东北林业大学学报*, 2012, 40(9): 28-33.
- [41] 程堂仁, 马钦彦, 冯仲科, 罗旭. 甘肃小陇山森林生物量研究. *北京林业大学学报*, 2007, 29(1): 31-36.
- [42] 严理, 刘晓璐, 秦武明, 周江悦. 广西百色细叶云南松天然林生物量研究. *西部林业科学*, 2014, (3): 134-138.
- [43] 康冰, 刘世荣, 张广军, 常建国, 温远光, 马姜明, 郝文芳. 广西大青山亚热带马尾松、杉木混交林生态系统碳素积累和分配特征. *生态学报*, 2006, 26(5): 1320-1329.
- [44] 张林, 罗天祥, 邓坤枚, 戴强, 黄永, 蒋正富, 陶明友, 曾开益. 广西黄冕林场次生常绿阔叶林生物量及净第一性生产力. *应用生态学报*, 2004, 15(11): 2029-2033.
- [45] 盛春光. 黑龙江省森工林区森林生物量和生产力评估. *林业经济*, 2012, (4): 43-46.
- [46] 黄全能. 红锥天然林生长规律与生物量的调查研究. *福建林业科技*, 1998, 25(2): 20-23.
- [47] 冯宗炜, 陈楚莹, 张家武, 王开平, 赵吉录, 高虹. 湖南会同地区马尾松林生物量的测定. *林业科学*, 1982, 18(2): 127-134.
- [48] 杨昊天, 李新荣, 刘立超, 贾荣亮, 王增如, 李小军, 李刚. 荒漠草地 4 种灌木生物量分配特征. *中国沙漠*, 2013, 33(5): 1340-1348.
- [49] 李刚, 李永庚, 刘美珍, 蒋高明. 浑善达克沙地稀树疏林草地植被生物量及净初级生产力. *科技导报*, 2011, 29(25): 30-37.
- [50] 王玉辉, 周广胜, 蒋延玲, 杨正宇. 基于森林资源清查资料的落叶松林生物量和净生长量估算模式. *植物生态学报*, 2001, 25(4):

- 420-425.
- [51] 黄秋娟, 张健强, 杨新兵. 冀北山地 3 种典型林分类型生物量分配格局研究. 河北农业大学学报, 2012, 35(6): 55-58, 90-90.
- [52] 温小荣, 蒋丽秀, 刘磊, 林国忠, 郑勇, 谢小杰, 余光辉. 江苏省森林生物量与生产力估算及空间分布格局分析. 西北林学院学报, 2014, 29(1): 36-40.
- [53] 杨超, 田大伦, 康文星, 项文化, 闫文德, 方晰, 梁小翠. 连栽 14 年生杉木林生态系统生物量的结构特征. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(5): 1-6.
- [54] 魏文俊, 尤文忠, 张慧东, 颜廷武, 霍常富, 赵刚, 邢兆凯. 辽宁省落叶松人工林生物量碳库特征. 东北林业大学学报, 2011, 39(6): 26-29.
- [55] 方晰, 田大伦, 胥灿辉. 马尾松人工林生产与碳素动态. 中南林学院学报, 2003, 23(2): 11-15.
- [56] 樊后保, 李海燕, 黄玉梓. 马尾松-细叶青冈混交林的生物量及其生产力结构. 中南林学院学报, 2005, 25(6): 38-41.
- [57] 邢福, 祝廷成. 内蒙古东部线叶菊草地生物量与净第一性生产力的初步研究. 植物生态学与地植物学学报, 1992, 16(2): 149-157.
- [58] 李银, 侯琳, 陈军军, 白娟, 张硕新, 陈海滨. 秦岭火地塘林区典型灌木生物量估算模型. 东北林业大学学报, 2014, 42(2): 116-119.
- [59] 曾立雄. 三峡库区不同植被类型生物量与生产力研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2007.
- [60] 曾立雄, 王鹏程, 肖文发, 万睿, 黄志霖, 潘磊. 三峡库区主要植被生物量与生产力分配特征. 林业科学, 2008, 44(8): 16-22.
- [61] 陈遐林, 马钦彦, 康峰峰, 曹文强, 张国华, 陈宗伟. 山西太岳山典型灌木林生物量及生产力研究. 林业科学研究, 2002, 15(3): 304-309.
- [62] 徐郑周, 刘广营, 王广海, 赵国华, 马长明. 燕山山地华北落叶松人工林群落生物多样性及其生物量的研究. 林业资源管理, 2010, (2): 43-49.
- [63] 江洪, 朱家骏. 云杉天然林生物量和生产力的研究. 四川林业科技, 1986, (2): 5-13.
- [64] 文诗韵, 杨思河, 尹忠馥, 王昌杰, 姜波, 黄刚. 柞蚕林冠层结构、林内光照分布与叶生物量研究. 应用生态学报, 1991, 2(4): 286-291.
- [65] 雷丕锋, 项文化, 田大伦, 方晰. 樟树人工林生态系统碳素贮量与分布研究. 生态学杂志, 2004, 23(4): 25-30.
- [66] 朴世龙, 方精云, 贺金生, 肖玉. 中国草地植被生物量及其空间分布格局. 植物生态学报, 2004, 28(4): 491-498.
- [67] 杨同辉, 宋坤, 达良俊, 李修鹏, 吴健平. 中国东部木荷-米楮林的生物量和地上净初级生产力. 中国科学: 生命科学, 2010, 40(7): 610-619.
- [68] 长山泰秀, 李昌华, 片桐成夫, 岩坪五郎. 中国南部天然常绿阔叶林的地上生物量、净初级生产力、养分分布和养分利用效率. 江西林业科技, 2005, (增刊): 17-24.
- [69] 罗天祥. 中国主要森林类型生物生产力格局及其数学模型[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 1996.
- [70] 杨昆, 管东生. 珠江三角洲森林的生物量和生产力研究. 生态环境, 2006, 15(1): 84-88.
- [71] Lieth H, Whittaker R H. 生物圈的第一性生产力. 王业蓬, 译. 北京: 科学出版社, 1985.
- [72] 王繁强, 宋百春, 周阿舒, 李业明, 万克利. 近地面太阳紫外线辐射强度分析与预报. 干旱气象, 2005, 23(2): 30-34.
- [73] 曲晓黎, 张彦恒, 赵娜, 袁媛. 石家庄市紫外线监测分析及预报方法. 气象科技, 2011, 39(6): 731-735.
- [74] Bernhard G, Mayer B, Seckmeyer G, Moise A. Measurements of spectral solar UV irradiance in tropical-Australia. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(D7): 8719-8730.
- [75] 郭世昌, 常有礼, 胡非, 张秀年, 李立娟. 纬度和海拔高度对云南地面紫外线强度影响的数值试验. 云南地理环境研究, 2004, 16(1): 9-13.
- [76] 袁淑杰, 谷小平, 缪启龙, 邱新法. 基于 GIS 的起伏地形下天文辐射分布式模型——以贵州高原为例. 山地学报, 2007, 25(5): 577-583.
- [77] 张秀英, 冯学智. 基于数字地形模型的山区太阳辐射的时空分布模拟. 高原气象, 2006, 25(1): 123-127.
- [78] 曾燕, 邱新法, 刘绍民. 起伏地形下天文辐射分布式估算模型. 地球物理学报, 2005, 48(5): 1028-1033.
- [79] 郭兆迪, 胡会峰, 李品, 李怒云, 方精云. 1977—2008 年中国森林生物量碳汇的时空变化. 中国科学: 生命科学, 2013, 43(5): 421-31.
- [80] Streets D G, Bond T C, Carmichael G R, Fernandes S D, Fu Q, He D, Klimont Z, Nelson S M, Tsai N Y, Wang M Q, Woo J H, Yarber K F. An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2003, 108(D21), doi: 10.1029/2002JD003093.
- [81] 谢旻, 王体健. 中国地区稻田 CH₄ 和生物质燃烧 CO 排放对对流层氧化性的影响. 生态学报, 2007, 27(11): 4803-4814.
- [82] 曾晓梅编译自 UCAR 网站. <https://www2.ucar.edu/atmosnews/just-published>.
- [83] Landman W. Climate change 2007: the physical science basis. South African Geographical Journal, 2010, 92(1): 86-87.
- [84] 曹广民, 林丽, 李以康, 张法伟, 郭小伟, 李婧. 绿色植物在大气甲烷循环中的作用. 草业科学, 2010, 27(7): 141-146.
- [85] Verville J H, Hobbie S E, Chapin F S III, Hooper D U. Response of tundra CH₄ and CO₂ flux to manipulation of temperature and vegetation. Biogeochemistry, 1998, 41(3): 215-235.
- [86] 中国二氧化碳排放量数据. <http://down.pinggu.org/html/20100409/10392.html>.