中国植被碳通量与氮沉降通量百年尺度时空变化及其与气候的关系

高冬冬^{1,2†}, 丹利^{1*}, 范广洲², 田汉勤³, 彭静¹, 杨秀静^{1,5}, 杨富强^{1,5}, 李悦悦^{4,5}

1. 中国科学院东亚区域气候-环境重点实验室, 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029;

2. 成都信息工程大学大气科学学院, 成都 610225;

3. International Center for Climate and Global Change Research, Auburn University, AL 36849, USA;

4. 中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室, 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

5. 中国科学院大学, 北京 100049

* 通讯作者, E-mail: danli@tea.ac.cn

† 通讯作者, E-mail: gaodd@tea.ac.cn

收稿日期: 2018-10-25; 收修改稿日期: 2019-10-07; 接受日期: 2019-11-12; 网络版发表日期: 2020-02-28

国家自然科学基金项目(批准号: 41630532、41575093)和国家重点研发计划课题项目(编号: 2016YFA0602501、2018YFA0606004)资助

摘要 利用7个地球系统模式的植被净初级生产力(NPP)对中国地区1901~2005年植被碳通量的时空变化进行了研究,并结合气候因子分析了NPP的变化与气温、降水和辐射的关系;文章还进一步研究了中国地区1901~2005年氮沉降通量 NH_x 、 NO_y 的时空变化,并分析了 NH_x 、 NO_y 的变化与气温、降水和NPP的关系.结果表明:(1)近百年来中国地区NPP呈现上升趋势,模式集合平均的趋势系数为0.88, NPP的分布趋势总体呈现出北低南高,由西北到东南逐渐增加的特征.温度、降水、光照在该梯度方向上均有利于植物生长,其中模式集合平均NPP与气温、降水、长波辐射和短波辐射相关系数分别为0.88、0.73、0.91和0.67.(2)近百年来中国地区 NH_x 、 NO_y 呈现上升趋势,其中趋势系数分别为0.98和0.98,且通过了99.9%的信度检验. NH_x 和 NO_y 总体呈现出北低南高,由西北到东南呈阶梯状逐渐增加的特征.(3) NH_x 和 NO_y 与气温之间的相关系数空间分布大体相似,只是数值略有差异,与气温相关系数空间分布从东到西是正相关-负相关-正相关相间的分布; NH_x 和 NO_y 与降水之间的相关系数空间分布也是大体相似,但降水相关系数空间分布相对比较复杂,在季风区从北到南呈正相关-负相关-正相关-负相关-正相关的相间分布,非季风区从东到西呈负相关-正相关-负相关-正相关的相间分布.(4) NH_x 和 NO_y 与NPP之间的相关系数空间分布总体一致,与NPP相关系数空间分布相对比较复杂,其中模式集合平均的分布在东北地区 and 西南地区为正相关值区,其他地区是正相关与负相关交替分布.

关键词 净初级生产力(NPP), 气温, 降水, NH_x , NO_y

中文引用格式: 高冬冬, 丹利, 范广洲, 田汉勤, 彭静, 杨秀静, 杨富强, 李悦悦. 2020. 中国植被碳通量与氮沉降通量百年尺度时空变化及其与气候的关系. 中国科学: 地球科学, 50: 693–710, doi: 10.1360/N072018-00289

英文引用格式: Gao D, Dan L, Fan G, Tian H, Peng J, Yang X, Yang F, Li Y. 2020. Spatiotemporal variations of carbon flux and nitrogen deposition flux linked with climate change at the centennial scale in China. Science China Earth Sciences, 63: 731–748, <https://doi.org/10.1007/s11430-018-9548-3>

1 引言

陆地生态系统对气候变化的响应是全球变化研究的焦点之一(Walker和Steffen, 1997), 植被是气候变化最直观的体现和重要标志(张新时, 1993). 自工业革命以来, 由于化石燃料的燃烧和土地利用变化等, 大气中二氧化碳(CO₂)的浓度持续升高. 联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告指出, 人类活动导致的大气CO₂浓度升高是过去100年来气候变暖的主要驱动因子(IPCC, 2013). 与气候变暖同步, 全球降水格局也发生了改变(Dore, 2005; Min等, 2011). 这些全球变化现象对陆地生态系统的结构和功能发生了重大影响(Matsushita和Tamura, 2002; Nemani等, 2003).

植被净初级生产力(NPP)主要是指单位时间在单位面积上植被积累的有机物质总量, 是光合作用吸收的碳和呼吸作用释放的碳之间的差值(Chapin等, 2002). 它是陆地生态系统碳汇的主要决定因子之一, 也是生态过程的关键调节因子(Field等, 1998). 在全球气候变化的大背景下, 中国的气候也发生了相应变化(王绍武等, 1998, 2000; Zhai等, 2005; Shi等, 2007), 陆地植被NPP表现出一定的增长趋势(朴世龙等, 2001). 孙睿和朱启疆(2000)研究认为影响中国植被NPP的主要因素是水分条件. 朱文泉等(2007)用改进的光能利用率模型估算了中国1982~1999年植被NPP, 并得出在1982~1999年内温度、降水和光照均有利于植被的生长, 胁迫较弱. Liang等(2015)利用CASA模型估算了1982~2010年中国植被NPP时空变化并深入探讨了气候因素对NPP的影响机制. Pei等(2013)估算了中国2001~2010年植被NPP, 而且分析了干旱对植被NPP的影响. Gao等(2009)利用CASA模型来探讨青藏高原草甸地区NPP对气候变化的响应, 发现近年来降水和太阳辐射增加对NPP变化的驱动作用明显.

氮是生态系统最重要的营养元素之一, 也是生态系统固碳能力的限制因子(Dan等, 2007). 中国自20世纪60年代开始使用氮肥, 目前氮肥施用量占世界三分之一, 近十年来中国粮食增产主要是氮肥投入的效果(王敬国等, 2016), 中国目前已是世界三大氮沉降中心之一, 氮沉降的强度与北美和欧洲相当, 并对环境造成了一定的影响(Galloway等, 2008; Liu等, 2013; Tian等, 2016). 当前地球系统模式中尚缺乏碳氮相互作用过程(於琨和朴世龙, 2014), 中国区域百年尺度的碳氮相互

关系研究也很缺乏. 因此, 加强碳氮关系的探讨对研究全球气候及生态系统变化具有重要意义.

因此为了更好地理解净初级生产力与各种气候要素的相互关系, 以及碳氮之间的关系. 本文使用7个地球系统模式的NPP模拟结果, 分析了近百年来NPP的时空变化特征, 探讨了地球系统模式中NPP与气温、降水和辐射的关系; 并且还分析了氮沉降通量NH_x和NO_y的时空变化以及与气温和降水的关系, 还进一步分析了氮沉降与NPP之间的关系.

2 资料与方法

2.1 研究区域与数据

本文选用了参与耦合模式比较计划CMIP5中7个地球系统模式模拟的NPP数据. 经过筛选, 在Historical试验选取了以下7个模式(表1). 此外, 本文使用了1901~2005年CRU的气温和降水资料, 用于研究NPP与气温和降水的关系; 使用中国科学院青藏高原研究所阳坤研究员课题组开发的1979~2005年的长波辐射和短波辐射数据, 用于研究NPP与辐射之间的关系, 空间分辨率为10km×10km(Yang等, 2010). 氮沉降通量由站点检测资料、统计年鉴和模式结果等综合而成, 分辨率为10km×10km(Lü和Tian, 2007, 2014).

2.2 研究方法

2.2.1 气候倾向率

气候倾向率用公式(1)进行计算. y 代表样本数为 n 的某一物理量, x 代表 y 所对应的时间样本个数, x 与 y 之间的回归方程如公式(1)所示:

表 1 7个地球系统模式的基本信息

模式名称	来源国家	水平分辨率 (经度×纬度)
CanESM2(NPP)	加拿大	2.8°×2.8°
CCSM4(NPP)	美国	1.25°×0.94°
MIROC-ESM(NPP)	日本	2.8°×2.8°
MPI-ESM-P(NPP)	德国	1.875°×1.875°
MRI-ESM1(NPP)	日本	1.125°×1.125°
NorESM1-ME(NPP)	挪威	2.5°×1.875°
BCC-CSM1-1(NPP)	中国	2.8°×2.8°

$$y_i = b + ax_i, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中, a 为回归系数, b 为回归常数(魏凤英, 2007).

2.2.2 趋势系数

本文根据前人的研究方法(施能等, 1995, 2003; 符传博等, 2019), 计算了气候趋势系数 r_{xt} . 趋势系数被定义物理量的样本数为 n 的序列与自然数列1, 2, ..., n 的相关系数, 如公式(2)所示:

$$r_{xt} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(i - \bar{i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (i - \bar{i})^2}}, \quad (2)$$

式中, n 为样本个数. x_i 代表第 i 个样本值, $\bar{x}$ 代表其样本均值. $\bar{i} = (n+1)/2$. 从中可知, r_{xt} 值为正(负)时, 代表该物理量在 n 个样本内有增(降)的趋势. $r_{xt}\sqrt{n-1} / \sqrt{1-r_{xt}^2}$ 符合自由度 $n-2$ 的 t 分布.

2.3 模式评估

为定量分析不同模式模拟的NPP的空间分布与集合平均的相似度, 图1给出了模式模拟的陆地NPP与集合平均之间的空间相关系数和标准偏差比. 我们可以得出, 标准偏差比在0.75~1.38, 各个模式与集合模式的空间相关系数大体分布在0.8以上, 都通过了95%的显著性水平. CanESM2、CCSM4、MPI-ESM-P、Nor-

ESM1-ME这四个模式标准偏差比接近1, 且相关系数在0.9以上; BCC-CSM1-1标准偏差比值较大, 但其相关系数较高; MIROC-ESM、MRI-ESM1这两个模式标准偏差比值不大, 但其相关系数较低; 尤其是MIR-OC-ESM模式其标准偏差比为1.19, 相关系数为0.80, 该模式的不确定性最大.

3 结果与讨论

3.1 净初级生产力(NPP)的空间分布

1901~2005年的多年平均NPP的空间分布上(图2), 各个模式存在一定的差异, 但是总体呈现出北低南高, 从西北地区到东南地区逐渐增加的空间分布. 其中西北干旱、半干旱地区的植被NPP值最小, 平均值大部分在 $100 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 以下; 西北荒漠的周边地区, 植被NPP平均值在 $100 \sim 200 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$; 东北地区、华北地区以及中部地区植被NPP平均值处于相对较高值, 植被NPP平均值在 $200 \sim 800 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$; 南方的大部分地区植被NPP均值在 $700 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 以上, 其中特别是广西、广东及海南、台湾等省份植被NPP平均值相对较高. 西北地区植被NPP平均值最低, 主要是因为西北地区以沙漠、戈壁、荒漠、草甸和草本沼泽为主, 植被生长受到降水因素的限制, 植被生产力相对较低; 东北地区、华北地区以及中部地区植被NPP平均值相对较高, 主要是因为该地区是东北的常绿针叶林、针阔混交林、落叶针叶林区和落叶阔叶林区, 中部有灌丛、矮林和农业植被区, 植被生产力相对较高; 南方地区年植被NPP的平均值最高, 主要是因为植被类型主要为常绿阔叶林, 植被立体空间层次梯度明显, 林内物种类型众多, 水热条件较好, 净第一性生产力最高.

为了进一步评估NPP对植被类型在变异幅度上的不确定性, 图3给出了NPP的最大值、最小值和范围(Max-Min-Ran). 从图3中我们可以看出不同模式NPP极值和变化范围有差异, 但是总体上变化是类似的. 其中NorESM1-ME的NPP数值变化范围高于其他模式, MPI-ESM-P的NPP范围低于其他模式, BCC-CSM1-1的范围与模式集合平均的范围最接近. 相对来说BCC-CSM1-1模式模拟NPP效果比其他模式要好.

1901~2005年各个模式NPP标准偏差的空间分布上, 总体呈现出和多年平均NPP的空间分布类似的特征(图4). 各个模式存在一定的差异, 但是总体呈现出

图1 1901~2005年各个模式和集合平均的NPP的空间相关系数和标准偏差比

图2 1901~2005年7个地球系统模式与集合平均中国NPP的平均值空间分布($\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$)

图3 1901~2005多年平均中国区域不同植被类型NPP最大值、最小值和变化范围

北低南高, 由西北地区到东南地区逐渐增加的空间分布。西北的荒漠地区植被NPP标准偏差最小, 大都在 $10 \text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 以下; 西北沙漠的周边地区, 植被NPP标准偏差在 $10 \sim 25 \text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$; 东北地区、华北地区以及中部地区植被NPP标准偏差处于相对较高值, 植被NPP标准偏差在 $25 \sim 150 \text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$; 南方大部分地区的植被NPP标准偏差在 $100 \text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 以上, 其中特别是广西、广东及海南、台湾等省份植被NPP标准偏差相对较高。

变异系数 $CV = SD / AVE$, 式中, SD 为NPP的1901~2005年的标准偏差, AVE 为NPP的1901~2005年的平均值。1901~2005年各个模式NPP变异系数的空间分布上(图5), 各个模式存在一定的差异, 但是总体呈

图 4 1901~2005年7个地球系统模式与集合平均中国NPP的标准偏差空间分布($\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$)

现出西北地区较低, 东南地区高的特征, 除MIROC-ESM和MPI-ESM-P模式。其中以模式集合平均为例, 西北荒漠地区及其附近地区的植被NPP值变异系数最小, 大都在0.25以下; 东北地区的植被NPP的变异系数在0.1~0.3 华北地区的植被NPP的变异系数在0.15~0.3, 中部地区的植被NPP的变异系数在0.15~0.25; 南方大部分地区的植被NPP变异系数在0.15以上, 其中特别是广西、广东及海南、台湾等省份植被NPP变异系数相对较高在0.25以上。

3.2 氮通量 NH_x 和 NO_y 的空间分布

1901~2005年的多年平均 NH_x 的空间分布上(图

6a), 总体呈现出北低南高, 由西北到东南呈阶梯状逐渐增加的特征。新疆、西藏、青海、甘肃、内蒙古以及宁夏这些西北地区的 NH_x 最小, 平均值大都在 $4\text{kg hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ 以下; 黑龙江、吉林、辽宁、河北、山西、陕西、四川以及云南这些地区 NH_x 平均值处于相对较高值, 平均值在 $4\sim 16\text{kg hm}^{-2} \text{a}^{-1}$; 东南的大部分地区 NH_x 平均值在 $12\text{kg hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ 以上, 其中江西、湖北和安徽三省交界处最高, 高达 $20\text{kg hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ 以上。1901~2005年的多年平均 NO_y 的空间分布上(图6b), 分布与 NH_x 类似, 只是数值上偏小, 总体上也呈现出由西北到东南呈逐渐增加的特征。新疆、西藏、青海、甘肃、内蒙古以及宁夏这些西北地区的 NO_y 最小, 平均

图 5 1901~2005年7个地球系统模式与集合平均中国NPP的变率系数空间分布

图 6 1901~2005年中国 NH_4 和 NO_3 的平均值空间分布($\text{kg hm}^{-2} \text{a}^{-1}$)

值大都在 $1.6 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 以下; 黑龙江、吉林、辽宁、河北、山西、陕西、四川以及云南这些地区 NO_y 平均值处于相对较高值, 平均值在 $1.6 \sim 3.4 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$; 东南的大部分地区 NO_y 平均值在 $3 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 以上, 其中江西、湖北、安徽和河南四省尤其是交界处最高, 高达 $4 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 以上。

1901~2005年的多年平均 NH_x 的标准偏差空间分布上(图7a), 总体呈现出北低南高, 由西北到东南呈阶梯状逐渐增加的特征。新疆、西藏、青海、甘肃、内蒙古以及宁夏这些西北地区的 NH_x 的标准偏差最小, 标准偏差值大都在 $3 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 以下; 黑龙江、吉林、辽宁、河北、山西、陕西、四川以及云南这些地区 NH_x 的标准偏差值处于相对较高值, 标准偏差值在 $3 \sim 9 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$; 东南的大部分地区 NH_x 标准偏差值在 $8 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 以上, 其中江西、湖北和安徽三省交界处最高, 高达 $12 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 以上。1901~2005年的多年平均 NO_y 的标准偏差空间分布上(图7b), 分布与 NH_x 类似,

只是数值上偏小, 总体上也呈现出由西北到东南呈逐渐增加的特征。新疆、西藏、青海、甘肃、内蒙古以及宁夏这些西北地区的 NO_y 最小, 标准偏差值大都在 $0.6 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 以下; 黑龙江、吉林、辽宁、河北、山西、陕西、四川以及云南这些地区 NO_y 标准偏差值处于相对较高值, 平均值在 $0.6 \sim 1.4 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$; 东南的大部分地区 NO_y 标准偏差值在 $1.4 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 以上, 其中江西、湖北、安徽和河南四省尤其是交界处最高, 高达 $2 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 以上。

1901~2005年的多年平均 NH_x 的变异系数空间分布上(图8a), 总体呈现出一个低值区, 四个高值区的特征。西藏地区的变异系数最低, 是一个低值区, 变异系数大都在 0.4 以下; 四个高值区分别是西藏、新疆和青海的三省交界处, 辽宁、吉林和内蒙古的三省交界处, 山东、河南和安徽的三省交界处以及台湾, 变异系数大都在 0.6 以上; 其他地区的变异系数在 0.4~0.62。1901~2005年的多年平均 NO_y 的变异系数空间分布上

图 7 1901~2005年中国 NH_x 和 NO_y 的标准偏差空间分布 ($\text{kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)

图 8 1901~2005年中国 NH_x 和 NO_y 的变异系数空间分布

(图8b), 总体上呈现出两个低值区, 两个高值区的特征. 低值区分别是西藏、内蒙古和黑龙江两省交界处, 变异系数是在0.2以下; 两个高值区分别是台湾、安徽及其与周边六省的交界处, 这两个地区的变异系数最大, 在0.5以上; 其他地区的变异系数在0.2~0.5.

3.3 NPP、NH_x、NO_y的时间演变

图9给出了1901~2005年NPP距平值分布, 各个模式年际变化波动较大, 总体长期变化趋势相同. 近百年来距平值总体上呈逐年增加的趋势, 尤其是在20世纪80年代开始明显增加. 图10给出了1901~2005年NH_x和NO_y的距平值分布, 近百年来距平值总体上呈逐年

增加的趋势, 尤其是NH_x的年际变化增加的很明显. 表2给出了1901~2005年NPP、NH_x、NO_y趋势系数和气候倾向率. NPP百年尺度各个模式的气候趋势系数均超过了0.48, 其中模式集合平均的趋势系数最高为0.88, NorESM1-ME的趋势系数最低为0.48, 且都通过99.9%的信度检验, 这表明NPP的上升趋势较为明显. NPP百年尺度各个模式的气候倾向率均超过了0.21, 其中MPI-ESM-P的气候倾向率最高为0.81, NorESM1-ME的气候倾向率最低为0.21, 且都通过99.9%的信度检验, 这表明NPP随着时间呈逐渐增加趋势. NH_x的趋势系数为0.98, 这表明NH_x的上升趋势较为明显. NH_x的气候倾向率为0.13, 这表明NH_x随时间逐年而增加.

图9 1901~2005年7个地球系统模式与集合平均NPP距平值的长期变化趋势

图10 1901~2005年NH_x和NO_y距平值的长期变化趋势

表2 1901~2005年NPP、NH_x、NO_y趋势系数和气候倾向率

	趋势系数	倾向率	倾向率线性回归公式
CanESM2(NPP)	0.69	0.48	$y=0.48x-54.55$
CCSM4(NPP)	0.57	0.30	$y=0.30x-37.83$
MIROC-ESM(NPP)	0.77	0.60	$y=0.60x-67.87$
MPI-ESM-P(NPP)	0.81	0.81	$y=0.81x-89.54$
MRI-ESM1(NPP)	0.73	0.45	$y=0.45x-44.60$
NorESM1-ME(NPP)	0.48	0.21	$y=0.21x-27.68$
BCC-CSM1-1(NPP)	0.66	0.75	$y=0.75x-76.43$
集合平均(NPP)	0.88	0.52	$y=0.52x-56.82$
NH _x	0.98	0.13	$y=0.13x-11.11$
NO _y	0.98	0.02	$y=0.02x-1.92$

NO_y 的趋势系数为 0.98, 这表明 NO_y 的上升趋势较为明显. NO_y 的气候倾向率为 0.02, 这表明 NO_y 随时间演变而增加.

3.4 NPP与气温、降水和辐射的关系

从各个地球系统模式 NPP 和气温的相关系数空间分布(图 11)中可以发现, 各个模式的相关系数空间分布大体相似. 以模式集合平均为例, NPP 与气温主要呈现正相关关系, 中国东南地区的相关系数相对较高, 大部分相关系数在 0.85 以上; 中国西北地区的相

关系数相对较低, 大部分相关系数在 0.6~0.85. 光合作用一般采用 Farquhar 或 Collatz 的方案(Farquhar 等, 1980; Collatz 等, 1991), 气温是一个干物质累积的限制因子, 在东南地区气温比较高, 能提高光合导度从而有利于光合干物质的积累, 提高植被的生产力, 而在西北地区气温相对较低, 因而相关系数相对较低. 其余模式大体与模式集合平均相似, 除了 MRI-ESM1 模式的差距比较大. 从表 3 的 NPP 与降水和气温的相关系数表中可以看到, 全球总体 NPP 与气温关系为显著的正相关关系, 各个模式的相关系数均高于 0.37, 其

图 11 NPP与气温的相关系数分布图

黑点区域代表通过95%的信度检验

表 3 7个地球系统模式与集合平均的NPP与气温、降水和辐射的相关系数表

NPP	CanESM2	CCSM4	MIROC-ESM	MPI-ESM-P	MRI-ESM1	NorESM1-ME	BCC-CSM1-1	集合平均
pre	0.44	0.57	0.58	0.53	0.37	0.61	0.63	0.73
tmp	0.69	0.81	0.75	0.74	0.45	0.84	0.81	0.88
lrad	0.72	0.83	0.82	0.78	0.48	0.87	0.86	0.91
srad	0.48	0.64	0.56	0.65	0.35	0.67	0.69	0.67

中集合平均的相关系数为0.73，而且通过了95%的信度检验。

从各个地球系统模式NPP和降水的相关系数空间

分布(图12)中可以发现，各个模式的相关系数空间分布大体相似。以模式集合平均为例，NPP与降水主要呈现正相关关系，其中高值区为东北地区、西北地区和

图 12 NPP与降水的相关系数分布图

黑点区域代表通过95%的信度检验

西南地区, 相关系数在0.8以上; 低值区在西藏地区 and 新疆地区交界处, 相关系数在 $-0.6\sim 0.2$; 其余地区相关系数在 $0.4\sim 0.8$. 西北地区相对比较干旱, 植物生长主要受土壤水分制约, 较低的土壤湿度会降低光合速率, 从而减少光合产物的累积; 东北地区 and 西南地区相关系数比较高, 部分降水会储存于土壤中形成较高的土壤湿度提高光合产量, 因而这些地区NPP和降水的变化规律相对一致. 其余模式大体与集合平均相似, 其中MRI-ESM1模式的差距比较大. 从表3的NPP与降水和气温的相关系数表中可以看到, 全球总体NPP与降水

关系为显著的正相关关系, 各个模式的相关系数均高于0.45, 其中集合平均的相关系数为0.88, 而且通过了95%的信度检验.

在图13a中是7个地球系统模式与集合平均NPP距平值的长期变化趋势, 20世纪中国NPP主要呈现上升趋势尤其是80年代显著增加. 图13b挑选了图13a中模式集合平均NPP与降水距平值的长期变化趋势的对比, 相比之下1914年、1930年、1944年和1959年观测到的降水量显著减少, 导致这些年份对应的陆地生态系统碳通量相应的大量减少. 图13c是模式集合平均

图 13 1901~2005年7个地球系统模式与集合(a)、降水和模式集合(b)、温度和模式集合(c)平均NPP距平值的长期变化趋势

NPP与温度距平值的长期变化趋势的对比, 相比之下1929年、1944年和1981年观测到的温度降低较为明显, 导致对应年份的陆地生态系统碳通量相应呈现减少的情况(Piao等, 2009).

影响气温的主要直接因素是短波辐射, 但为全面研究NPP与气候的关系故考虑了与长波辐射的关系, 是因为地球系统模式中的大气模式长波辐射不仅会影响地面气温, 长波辐射还与云量分布有关, 云量分布会间接的影响植被的光合作用从而影响NPP, 因而进行了NPP与辐射的相关关系进行了探讨.

从各个地球系统模式NPP和达到地表长波辐射lrad的相关系数空间分布(图14)中可以发现, 各个模式的相关系数空间分布大体相似. 以模式集合平均为例, NPP与lrad主要呈现正相关关系, 中国东南地区的相关系数相对较高, 大部分相关系数在0.85以上; 中国西北地区的相关系数相对较低, 大部分相关系数在0.1~0.6. 其余模式大体与集合平均相似, NorESM1-ME模式的差距仍然较大. 从表3中可以看到, 全球总体NPP与lrad关系为显著的正相关关系, 各个模式的相关系数均高于0.48, 其中集合平均的相关系数为0.91, 而且通

图 14 NPP与LRAD的相关系数分布图

黑点区域代表通过95%的信度检验

过了95%的信度检验。

从各个地球系统模式NPP和达到地表短波辐射srad的相关系数空间分布(图15)中可以发现, 各个模式的相关系数空间分布大体相似。以模式集合平均为例, NPP与srad主要呈现正相关关系, 中国东南地区的相关系数相对较高, 大部分相关系数在0.85以上; 中国西南地区的相关系数相对较低, 大部分相关系数在-0.2~0.5, 这与该地区云量较多有一定的关系。除了NorESM1-ME模式差距较大, 其余模式大体与集合平均相似。从表3中可以看到, 全球总体NPP与srad关系

为显著的正相关关系, 各个模式的相关系数均高于0.35, 其中集合平均的相关系数为0.67, 而且通过了95%的信度检验。

3.5 NH_x 、 NO_y 与气温和降水的关系

从 NH_x 、 NO_y 和气温的相关系数空间分布(图16)中可以发现, NH_x 和 NO_y 相关系数空间分布大体相似, 只是数值略有差异。 NH_x 与气温相关系数空间分布从东到西是正负正的分布, 正值区在东北地区 and 东部沿海地区以及新疆西藏云南地区, 相关系数在0~0.7; 负

图 15 NPP与SRAD的相关系数分布图

黑点区域代表通过95%的信度检验

图 16 NH_x 、 NO_y 与气温的相关系数分布图

黑点区域代表通过95%的信度检验

值区在甘肃、陕西、四川、湖北、湖南、贵州以及广西这一带, 相关系数在 $-0.2 \sim 0$. NO_y 和 NH_x 类似, 除了负值区的相关系数在 $-0.3 \sim 0$. 其中 NH_x 、 NO_y 与气温的相关系数为0.71, 而且通过了95%的信度检验.

从 NH_x 、 NO_y 和降水的相关系数空间分布(图17)中可以发现, NH_x 和 NO_y 相关系数空间分布大体相似, 只是数值略有差异. NH_x 与降水相关系数空间分布相对比较复杂, 本文根据姜江等(2015)的研究, 将全国分为了季风区和非季风区来进行氮通量与降水关系的研究. 在季风区从北到南呈正负正负正波列分布; 其他地区正值区在青海、甘肃、四川、西藏的两两交界处以及新疆的西北部; 负值区在新疆、甘肃和青海的交界处, 西藏的西北处, 宁夏、甘肃、陕西交界处, 四川的东部, 贵州地区, 云南和广西的交界处. 其中 NH_x 、 NO_y 与降水的相关系数分别为0.05和0.03, 没有通过95%的

信度检验.

3.6 NH_x 、 NO_y 与NPP的关系

从 NH_x 和NPP的相关系数空间分布(图18)中可以发现, NH_x 和NPP相关系数空间分布比较复杂, 各个模式有差异. 以模式集合平均为例, 东北地区大部分地区为正值区, 相关系数在0.5以上; 华北华南地区为正值区, 相关系数为0~0.5; 西北地区正负值交替分布, 相关系数在 $-0.5 \sim 0.5$; 西南地区为正值区, 相关系数在0.5以上, 而且通过了95%的信度检验. 从表4中可以看到, NH_x 与NPP关系为显著的正相关关系, 各个模式的相关系数均高于0.67, 其中集合平均的相关系数为0.91, 而且通过了95%的信度检验.

从 NO_y 和NPP的相关系数空间分布(图19)中可以发现, NO_y 和NPP相关系数空间分布比较复杂, 各个模

图 17 NH_x 、 NO_y 与降水的相关系数分布图

黑点区域代表通过95%的信度检验

图 18 NH_x 与NPP的相关系数分布图
黑点区域代表通过95%的信度检验

表 4 NH_x 、 NO_y 与NPP的相关系数表

NPP	CanESM2	CCSM4	MIROC-ESM	MPI-ESM-P	MRI-ESM1	NorESM1-ME	BCC-CSM1-1	集合平均
NH_x	0.72	0.68	0.84	0.84	0.79	0.67	0.78	0.91
NO_y	0.73	0.68	0.84	0.85	0.79	0.66	0.78	0.92

式有差异. 以模式集合平均为例, 东北地区大部分地区为正值区, 相关系数在0.4以上; 华北华南地区为正负值交替分布, 相关系数为-0.2~0.5; 西北地区正负值交替分布, 相关系数在-0.5~0.5; 西南地区为正值区, 相关系数在0.6以上, 而且通过了95%的信度检验. 从表4

中可以看到, NO_y 与NPP关系为显著的正相关关系, 各个模式的相关系数均高于0.66, 其中集合平均的相关系数为0.92, 而且通过了95%的信度检验.

从1901~2005年多年平均中国区域不同植被类型NPP、 NH_x 和 NO_y 的模拟值(图20)中可以发现, 对于同

图 19 NO_y 与NPP的相关系数分布图

黑点区域代表通过95%的信度检验

一种植被类型而言不同模式模拟的NPP在数值上有一定差异, 例如常绿阔叶林NPP在 $700\sim 1110\text{g C m}^{-2}\text{a}^{-1}$, 但不同植被类型之间总体上变化趋势类似, 最小值均出现在落叶针叶林和草地的模拟NPP; NH_x 和 NO_y 在不同植被类型之间分布是类似的, 只是数值有差异, 最大可达 $1\text{kg hm}^{-2}\text{a}^{-1}$. 陆地植物的生长受到氮的限制, 在其他养分成为限制因子之前, 氮的增加可以促进净初级生产力(NPP)的提高(Wollenweber, 1992), 在图19中我们可以看出除了常绿阔叶林之外大气氮沉降和NPP的变化在不同植被类型之间总体是一致的. 对于各种植被类型, 大气氮沉降多少直接影响当地的氮库, 从而间

接地促进NPP的光合累计增加. 常绿阔叶林地区大多水热条件较好, 植被本身生产力就比较高, 因而虽然大气氮沉降不大, 但其NPP值依旧可以达到较高的数值.

4 结论

本文利用7个地球系统模式的NPP对1901~2005年NPP的时空变化进行了研究, 并结合气候因子分析了NPP的变化与气温、降水和辐射的关系; 还进一步研究了1901~2005年氮通量 NH_x 、 NO_y 的时空变化, 分析了 NH_x 、 NO_y 的变化与气温、降水的关系, 并分析了NPP

图 20 1901~2005年中国区域不同植被类型NPP、 NH_x 和 NO_y 的多年平均模拟值

ENF, 常绿针叶林; EBF, 常绿阔叶林; DNF, 落叶针叶林; DBF, 落叶阔叶林; MF, 混交林; SH, 灌木; GRA, 草地

与 NH_x 和 NO_y 的关系, 主要结论如下:

(1) 近百年来NPP呈现上升趋势, 模式集合平均的趋势系数为0.88, 通过了99.9%的信度检验; 近百年来 NH_x 、 NO_y 呈现上升趋势, 其中趋势系数分别为0.98和0.98, 且通过了99.9%的信度检验。

(2) NPP的分布趋势总体呈现出北低南高, 由西北到东南逐渐增加的特征; NH_x 和 NO_y 总体呈现出北低南高, 由西北到东南呈阶梯状逐渐增加的特征。

(3) 各个模式中国大部分地区的NPP与气温、降水、长波辐射和短波辐射之间均呈正相关, 其中集合平均相关系数分别为0.88、0.73、0.91和0.67。这说明气温、降水和辐射对植被NPP的影响在中国为正反馈效应, 不同因子的反馈强度不同。

(4) NH_x 和 NO_y 与气温之间的相关系数空间分布型类似, 只是数值略有差异, 与气温相关系数空间分布从东到西是正相关-负相关-正相关相间的分布; NH_x 和 NO_y 与降水之间的相关系数空间分布也大体相似, 只是数值有不同, 与降水相关系数空间分布相对比较复杂, 在季风区从北到南呈正相关-负相关-正相关-负相关-正相关的相间分布, 非季风区从东到西呈负相关-正相关-负相关-正相关的相间分布。

(5) NH_x 和NPP相关系数空间分布比较复杂, 各个模式有差异。以集合平均为例, 东北地区为正值区, 相

关系数在0.5以上; 华北华南地区为正值区, 相关系数为0~0.5; 西北地区正负值交替分布, 相关系数在-0.5~0.5; 西南地区为正值区, 相关系数在0.5以上。 NO_y 和NPP之间的相关系数空间分布与 NH_x 和NPP的分布型相似。以模式集合平均为例, 东北地区大部分地区为正值区, 相关系数在0.4以上; 华北华南地区为正负值交替分布, 相关系数为-0.2~0.5; 西北地区正负值交替分布, 相关系数在-0.5~0.5; 西南地区为正值区, 相关系数在0.6以上。

参考文献

- 符传博, 丹利, 冯锦明, 彭静, 营娜. 2019. 1960~2012年中国地区总云量时空变化及其与气温和水汽的关系. 大气科学, 43: 87~98
- 姜江, 姜大膀, 林一骅. 2015. 1961~2009年中国季风区范围和季风降水变化. 大气科学, 39: 722~730
- 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 2001. 1982~1999年我国植被净第一性生产力及其时空变化. 北京大学学报: 自然科学版, 37: 563~569
- 施能, 陈家其, 屠其璞. 1995. 中国近100年来4个年代际的气候变化特征. 气象学报, 53: 431~439
- 施能, 黄先香, 杨扬. 2003. 1948~2000年全球陆地年降水量场趋势变化的时、空特征. 大气科学, 27: 971~982
- 孙睿, 朱启疆. 2000. 中国陆地植被净第一性生产力及季节变化研究. 地理学报, 55: 36~45
- 王敬国, 林杉, 李保国. 2016. 氮循环与中国农业氮管理. 中国农业科学, 49: 503~517

- 王绍武, 龚道溢, 叶瑾琳, 陈振华. 2000. 1880年以来中国东部四季降水量序列及其变率. *地理学报*, 55: 281–293
- 王绍武, 叶瑾琳, 龚道溢, 朱锦红, 姚檀栋. 1998. 近百年中国年气温序列的建立. *应用气象学报*, 9: 392–401
- 魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术(第2版). 北京: 气象出版社. 43–44
- 於琰, 朴世龙. 2014. IPCC第五次评估报告对碳循环及其他生物地球化学循环的最新认识. *气候变化研究进展*, 10: 33–36
- 张新时. 1993. 研究全球变化的植被-气候分类系统. *第四纪研究*, 2: 157–169
- 朱文泉, 潘耀忠, 阳小琼, 宋国宝. 2007. 气候变化对中国陆地植被净初级生产力的影响分析. *科学通报*, 52: 2535–2541
- Chapin F S, Matson P A, Mooney H A. 2002. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. New York: Springer
- Collatz G J, Ball J T, Grivet C, Berry J A. 1991. Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: A model that includes a laminar boundary layer. *Agric For Meteorol*, 54: 107–136
- Dan L, Ji J, He Y. 2007. Use of ISLSCP II data to intercompare and validate the terrestrial net primary production in a land surface model coupled to a general circulation model. *J Geophys Res*, 112: D02S90
- Dore M H. 2005. Climate change and changes in global precipitation patterns: What do we know? *Environ Int*, 31: 1167–1181
- Farquhar G D, von Caemmerer S, Berry J A. 1980. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta*, 149: 78–90
- Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, Falkowski P. 1998. Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 281: 237–240
- Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, Bekunda M, Cai Z, Freney J R, Martinelli L A, Seitzinger S P, Sutton M A. 2008. Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 320: 889–892
- Gao Q, Li Y, Wan Y, Qin X, Jiangcun W, Liu Y. 2009. Dynamics of alpine grassland NPP and its response to climate change in Northern Tibet. *Clim Change*, 97: 515–528
- IPCC. 2013. Climate change: The physical science basis, in *Inter-governmental Panel on Climate Change, Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5)*. New York
- Liang W, Yang Y, Fan D, Guan H, Zhang T, Long D, Zhou Y, Bai D. 2015. Analysis of spatial and temporal patterns of net primary production and their climate controls in China from 1982 to 2010. *Agric For Meteorol*, 204: 22–36
- Liu X, Zhang Y, Han W, Tang A, Shen J, Cui Z, Vitousek P, Erisman J W, Goulding K, Christie P, Fangmeier A, Zhang F. 2013. Enhanced nitrogen deposition over China. *Nature*, 494: 459–462
- Lü C, Tian H. 2007. Spatial and temporal patterns of nitrogen deposition in China: Synthesis of observational data. *J Geophys Res*, 112: D22S05
- Lü C, Tian H. 2014. Half-century nitrogen deposition increase across China: A gridded time-series data set for regional environmental assessments. *Atmos Environ*, 97: 68–74
- Matsushita B, Tamura M. 2002. Integrating remotely sensed data with an ecosystem model to estimate net primary productivity in East Asia. *Remote Sens Environ*, 81: 58–66
- Min S K, Zhang X, Zwiers F W, Hegerl G C. 2011. Human contribution to more-intense precipitation extremes. *Nature*, 470: 378–381
- Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, Jolly W M, Piper S C, Tucker C J, Myneni R B, Running S W. 2003. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, 300: 1560–1563
- Pei F S, Li X, Liu X P, Wang S J, He Z J. 2013. Assessing the differences in net primary productivity between pre- and post-urban land development in China. *Agric For Meteorol*, 171–172: 174–186
- Piao S, Ciais P, Friedlingstein P, de Noblet-Ducoudré N, Cadule P, Viovy N, Wang T. 2009. Spatiotemporal patterns of terrestrial carbon cycle during the 20th century. *Glob Biogeochem Cycle*, 23: GB4026
- Shi Y F, Shen Y P, Kang E S, Li D L, Ding Y J, Zhang G W, Hu R J. 2007. Recent and future climate change in northwest China. *Clim Change*, 80: 379–393
- Tian H Q, Lu C Q, Ciais P, Michalak A M, Canadell J G, Saikawa E, Huntzinger D N, Gurney K R, Sitch S, Zhang B, Yang J, Bousquet P, Bruhwiler L, Chen G, Dlugokencky E, Friedlingstein P, Melillo J, Pan S, Poulter B, Prinn R, Saunio M, Schwalm C R, Wofsy S C. 2016. The terrestrial biosphere as a net source of greenhouse gases to the atmosphere. *Nature*, 531: 225–228
- Walker B, Steffen W. 1997. *IGBP Science No.1: A synthesis of GCTE and related research*. Stockholm: IGBP, 1–24
- Wollenweber B. 1992. Nitrogen in terrestrial ecosystems: Questions of productivity, vegetational changes and ecosystem stability. *Holocene*, 2: 187
- Yang K, He J, Tang W, Qin J, Cheng C C K. 2010. On downward shortwave and longwave radiations over high altitude regions: Observation and modeling in the Tibetan Plateau. *Agric For Meteorol*, 150: 38–46
- Zhai P M, Zhang X B, Wan H, Pan X H. 2005. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China. *J Clim*, 18: 1096–1108

(责任编辑: 黄建平)