DOI: 10.5846/stxb202205061255

徐雪,罗娅,杨胜天,陆晓辉,周秋文,刘茂,石春茂,廖梦垚.全球不同气候带陆地植被净初级生产力变化趋势与可持续性.生态学报,2023,43(9): 3729-3743.

Xu X, Luo Y, Yang S T, Lu X H, Zhou Q W, Liu M, Shi C M, Liao M Y.Change trend and sustainability of vegetation net primary productivity of terrestrial ecosystems in different global climatic zones. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(9):3729-3743.

全球不同气候带陆地植被净初级生产力变化趋势与可 持续性

徐雪^{1,2},罗娅^{1,2,*},杨胜天^{1,3},陆晓辉^{1,2},周秋文^{1,2},刘茂^{1,2},石春茂^{1,2}, 廖梦垚^{1,2}

1贵州师范大学地理与环境科学学院,贵阳 550025

2贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地,贵阳 550025

3 北京师范大学水科学研究院,北京 100875

摘要:分析全球不同气候带陆地植被净初级生产力(NPP)的变化趋势与可持续性,对于估算全球陆地生态系统的结构、功能和 碳源(汇)具有重要意义。运用 Mann-Kendall 突变检验、Theil-Sen 斜率估计、Hurst 指数分析全球不同气候带陆地 NPP 的变化趋 势与可持续性。结果表明:(1)全球陆地 NPP 有明显的地域分异规律,呈现低纬高、高纬低,沿海高、内陆低的特点。约 48.79% 陆地生态系统的植被 NPP 得到了改善,其中显著改善的面积占全球陆地生态系统的 8.45%,主要分布在北美洲北部和中部、亚 马逊河流域西部、刚果盆地、欧洲南部、印度半岛西北部、中国黄土高原;轻微改善的面积占全球陆地生态系统的 40.34%,主要 分布在南美洲中南部、亚洲东部和澳大利亚大陆东部。(2)各气候带 NPP 变化趋势和突变点表现为:热带、亚热带、极地带的 NPP 呈不显著下降趋势(*R*²=0.111,*P*=0.176;*R*²=0.144,*P*=0.120;*R*²=0.002,*P*=0.854),热带无明显突变点,亚热带突变点为 2015年,极地带突变点为 2005年;干旱气候带的 NPP 呈不明显上升趋势(*R*²=0.036,*P*=0.450),突变点为 2009年;温带寒温带 的 NPP 呈显著的上升趋势(*R*²=0.533,*P*=0.001),突变点为 2014年。(3)各气候带 NPP 与降水、气温的关系为:干旱气候带、极 地带 NPP 为水分限制型,热带、温带寒温带 NPP 为热量限制型,亚热带 NPP 受气温、降水影响不显著。(4)在未来一段时间内, 全球陆地 NPP 呈减少的面积(51.31%)大于增加的面积(48.69%)。其中,干旱气候带、亚热带、亚热带、温带寒温带的 NPP 呈减少的面 积明显大于增加的面积,将是防止 NPP 退化工作的重点区域。以上研究结果可为国内外同行对比分析全球不同气候带陆地生 态系统的碳源(汇)功能提供参考。

关键词:植被净初级生产力;变化趋势;可持续性;气候带

Change trend and sustainability of vegetation net primary productivity of terrestrial ecosystems in different global climatic zones

XU Xue^{1,2}, LUO Ya^{1,2,*}, YANG Shengtian^{1,3}, LU Xiaohui^{1,2}, ZHOU Qiuwen^{1,2}, LIU Mao^{1,2}, SHI Chunmao^{1,2}, LIAO Mengyao^{1,2}

1 School of Geographic and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China

2 State Key Laboratory Incubation Base for Karst Mountain Ecology Environment of Guizhou Province, Guiyang 550025, China

3 College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Studying the change trend and sustainability of vegetation net primary productivity (NPP) of terrestrial

基金项目:国家自然科学基金委员会-贵州省人民政府喀斯特科学研究中心项目(U1812401);国家自然科学基金项目(41867001);贵州省普通高等学校科技拔尖人才支持计划(黔教合 KY[2018]042);贵州省水利科技项目(KT202108)

收稿日期:2022-05-06; 网络出版日期:2022-09-05

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: luoya2002@163.com

ecosystems in different global climatic zones is important for estimating the structure, function and carbon sources (sinks) of global terrestrial ecosystems. In this article, the change trend and sustainability of NPP of terrestrial ecosystems in different global climatic zones were analyzed using Mann-Kendall mutation test, Theil-Sen slope estimation, and Hurst index. The results showed that: (1) The global terrestrial NPP had obviously regional differentiation. The NPP value was higher in the lower latitude regions than the higher latitude regions, and higher in coastal regions than hinterland. The area of NPP improved accounted for 48.79% of the global terrestrial ecosystem. Among these improved areas, the significantly improved area accounted for 8.45% of the global terrestrial ecosystem, which is mainly distributed in the north and central of North America, the west of the Amazon Basin, the Congo Basin, southern Europe, the northwest of the Indian Peninsula and the Loess Plateau of China; The slightly improved area accounted for 40.34% of the global terrestrial ecosystem, mainly distributed in central and southern South America, Eastern Asia and eastern Australia. (2) The change trend and mutation point of NPP in each climate zone were as follows: NPP in tropical, subtropical, and polar zones showed a non-significant decreasing trend ($R^2 = 0.111$, P = 0.176; $R^2 = 0.144$, P = 0.120; $R^2 = 0.002$, P = 0.854), with no significant mutation point in the tropics, the mutation point of the subtropics in 2015, and the mutation point of the polar zone in 2005; the NPP in arid showed a non-significant increasing trend ($R^2 = 0.036$, P = 0.450) with the mutation point in 2009; the NPP in temperate and cold temperate zone showed a significant increasing trend ($R^2 = 0.533$, P = 0.001) with the mutation point in 2014. (3) For the relationship between NPP with precipitation and temperature in each climate zone, NPP in arid climate zones and polar zones were moisture-limited, NPP in tropical and temperate cold climate zones were heat-limited, and NPP in subtropical zones was not significantly affected by temperature and precipitation. (4) In the coming period, the global terrestrial NPP shows a decreasing area (51.31%) more than increasing area (48.69%). The area of NPP is decreasing significantly more than the increasing in the arid climate zones, subtropical zones, and temperate cold temperate zones, which are the key focus areas for preventing NPP degradation in the future. These findings can provide references for domestic and international colleagues to compare and analyze the carbon source (sink) function of terrestrial ecosystems in different global climatic zones.

Key Words: net primary productivity; change trend; sustainability; climatic zones

植被净初级生产力(NPP)作为陆地生态系统能量和质量转换的关键组成部分^[1],可有效量化陆地生态 系统的生产能力^[2],是评估碳汇水平的重要指标^[3]。宏观上,气候是决定植被类型和空间分布的最主要的非 生物因素^[4-5]。不同的气候带具有不同的水热格局,影响着植被的结构、功能和碳吸收能力^[6]。对比研究全 球不同气候带陆地植被 NPP 变化趋势与可持续性,对于估算全球陆地生态系统的结构、功能和碳源(汇)具有 十分重要的意义。

已有成果常用长时序列原位监测法^[7]、模型模拟法^[8-9]等获取 NPP 数据后揭示不同气候带的陆地 NPP 变化趋势。研究表明,全球 NPP 在 1981—2018 年总体呈显著上升趋势,但在 2000—2009 年有所减少^[10]。热带地区,亚洲和亚马逊热带雨林的平均 NPP 显著下降,非洲热带雨林的平均 NPP 显著上升^[11];泰国东部的热带季风区的红树林 NPP 没有明显变化^[7]。中国的亚热带地区,植被 NPP 呈显著上升趋势^[12-13]。中国内蒙古温带荒漠草原区,植被 NPP 有下降趋^[14]。干旱的中亚五国,其 NPP 有轻微上升趋势^[15]。澳大利亚半干旱草地,其 NPP 呈退化状态^[16]。高寒的青藏高原区,植被 NPP 呈显著增加趋势,增加速率为 1.67gCm⁻²a^{-1[17]}。这些成果较好地揭示了不同气候区的 NPP 变化趋势。但是,由于它们所研究的时空尺度不一致,精度不一致,可靠性不一致,因此应用这些成果开展全球不同气候带陆地植被 NPP 变化趋势对比分析时面临一定的挑战,不同气候带陆地生态系统的碳源(汇)功能还存在争议。

卫星遥感作为全球生态系统研究的重要手段,可获得时空更连续、精度更高的 NPP 数据产品^[18],对于研究全球 NPP 变化具有较好的优势^[19-21]。因此,基于遥感方法获取全球陆地 NPP 数据,运用 Mann-Kendall 趋

势检验、Theil-Sen 斜率估计和 Hurst 指数,研究 2001—2018 年全球不同气候带陆地 NPP 变化趋势与可持续性,主要解决三个问题:(1)阐明 2001—2018 年全球陆地平均 NPP 空间分布及变化趋势;(2)揭示不同气候 带 NPP 变化趋势及突变点;(3)揭示不同气候带 NPP 变化的可持续性。希望通过研究,为国内外同行对比分 析全球不同气候带陆地生态系统的碳源(汇)功能提供参考。

1 数据与方法

1.1 研究方法

(1) Mann-Kendall 突变分析

运用 Mann-Kendall 突变检验分析法判断全球 NPP 变化的突变点^[22-23],计算公式如下:

第一,对 2001—2018 年 NPP 均值构造一个秩序列为:

$$S_k = \sum_{i=1}^{K} \sum_{j=1}^{k-1} b_j \qquad k = 2, 3, 4, \cdots, n$$
(1)

$$b_{j} \begin{cases} 1, x_{i} > x_{j} \\ 0, x_{i} < x_{j} \end{cases} \qquad j = 1, 2, 3, \cdots, i$$
(2)

$$Var(s_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72}$$
(3)

第二,定义统计变量:

$$E(s_k) = \frac{k(k-1)}{4}$$
(4)

$$UF_{K} = \frac{S_{k} - E(s_{k})}{\sqrt{\operatorname{Var}(s_{k})}} \qquad k = 1, 2, 3, \cdots, n$$
(5)

式中, S_k 为秩序列, k 为时间序列长度, x_i 、 x_j 分别为第 i 年和第 j 年的 NPP 值, $Var(s_k)$ 为 S_k 的方差, $E(s_k)$ 为 S_k 的均值, UF_K 是标准正态分布。将时间序列 x 按照逆序列排序, 重复上述公式, 可计算出另一条 UB_K 曲线。最后在置信水平 α =0.05 和两条曲线的临界值±1.96 下进行解读。若 UF>0,则代表上升趋势;若 UF>1.96 或 UF<-1.96,代表增加或下降趋势显著;若 UF_K 和 UB_K 两条曲线相交,并且交点位于临界值内,该 对应交点即为时间序列发生突变的点。

(2) Mann-Kendall 趋势检验+Theil-Sen 斜率估计

Mann-Kendall 趋势检验+Theil-Sen 斜率估计适合处理和分析长时间序列或有噪声序列数据,被广泛应用 于水文气象研究^[24-25]。鉴于此,运用该方法分析全球不同气候带的陆地植被 NPP 变化趋势。具体方法为: 斜率估计:

Sen = Median
$$\left(\frac{x_i - x_j}{i - j}\right)$$
 (6)

式中, x_i、x_j分别为第 i 年和第 j 年的 NPP 值, Median 表示所求时间序列的中位数。Sen 估计值可以是+1、0 或-1,分别代表增加趋势、稳定不变、减少趋势。之后,运用 Mann-Kendall 趋势检验分析法进一步判断 Sen 值 计算结果的显著性,公式如下:

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\operatorname{Var}(s)}} & (s > 0) \\ 0 & (s = 0) \\ \frac{s+1}{\sqrt{\operatorname{Var}(s)}} & (s < 0) \end{cases}$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \operatorname{sgn}(x_i - x_j)$$
(8)

http://www.ecologica.cn

$$\operatorname{sgn}(x_i - x_j) = \begin{cases} 1(x_i - x_j > 0) \\ 0(x_i - x_j = 0) \\ -1(x_i - x_j < 0) \end{cases}$$
(9)

$$Var(s) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$$
(10)

式中,*S*为统计变量, $x_i \ x_j$ 分别为第*i*年和第*j*年的 NPP 值,n为样本数量,sgn为符号函数。当 |Z| > 1.96时,NPP 的变化趋势显著,反之则为不显著。根据前人研究^[26],将 NPP 变化趋势划分为五类,即:严重退化 (Sen<-0.0005, $Z \ge 1.96$ 或 $Z \le -1.96$)、轻微退化(Sen<-0.0005,-1.96 < Z < 1.96)、稳定不变(-0.0005
<Sen<0.0005)、轻微改善(Sen>0.0005,-1.96 < Z < 1.96)、明显改善(Sen>0.0005, $Z \ge 1.96$ 或 $Z \le -1.96$)。

(3) Hurst 指数分析

Hurst 指数最初由英国水文学家 H.E.Hurst 提出,用于研究洪水形成周期。后来被广泛用于预测时间序列的未来趋势,尤其在经济学、气候学等领域的运用更为常见^[27]。目前,Hurst 指数的估算方法有绝对值法、聚合方差法、周期图法、小波分析法、残差分析法和 R/S 分析法等^[28]。其中,重标极差 R/S 分析常被用于研究植被变化趋势,并取得了良好的效果^[29-30]。因此,运用重标极差 R/S 分析法预测 NPP 变化的可持续性。方法为:

第一,定义时间序列 x(t):

$$\omega_t = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} x(t) \qquad t = 1, 2, 3 \cdots$$
(11)

第二,计算累计偏差:

$$x(t,\tau) = \sum_{u=1}^{\tau} (x(u) - \omega_{\iota}) \qquad 1 \le t \le \tau$$
(12)

第三,计算极差序列:

$$R(\tau) = \max_{1 \le t \le \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \le t \le \tau} X(t, \tau) \qquad \tau = 1, 2, 3 \cdots$$
(13)

第四,计算标准差序列:

$$S(\tau) = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (x(t) - \omega \tau)^2\right]^{\frac{1}{2}} \qquad \tau = 1, 2, 3 \cdots$$
(14)

第五,取 $R(\tau)$ 和 $S(\tau)$ 之比:

$$R/S = R(\tau)/S(\tau) \tag{15}$$

若:

$$R/S \propto \left(\frac{\tau}{2}\right)^H$$
 (16)

则说明时间序列存在 Hurst 现象,此时 H 被称为 Hurst 指数,其范围为 0—1。当 H = 0.5 时,数据无变化。 当 0.5< H <1 时,该过程具有连续特征,说明未来趋势与过去一致。当 0< H <0.5,表明预计未来趋势将与过去 趋势相反^[31]。

最后,根据 Theil-Sen 斜率估计和 Hurst 指数分析结果,分五种情形揭示全球及不同气候带的 NPP 变化可持续性。即:持续增加(Sen>0,0.5<H<1)、由增加变减少(Sen>0,0<H<0.5)、持续减少(Sen<0,0.5<H<1)、由减少变为增加(Sen<0,0<H<0.5)、无法预测(H=0.5)。

1.2 数据来源

(1) 植被净初级生产力(NPP)

研究所需的 NPP 数据来源于 MuSyQ NPP 产品(http://doi.org/10.5281/Zenodo.3996814),该数据空间分 辨率为 0.05°,时间分辨率为 8d,对估算全球 NPP 有较好的可靠性^[11]。在分析之前,将 NPP 的日数据用最大

值合成法(MVC)^[32]合成月数据集,并利用均值法^[33]将逐月数据合成逐年数据。

(2) 柯本气候类型数据

气候类型数据来自普林斯顿大学 2018 年发布的柯本气候分类数据集^[34](http://www.gloh2o.org/koppen/)。依据气温和降水两个指标,该数据集将全球共划为了五个气候带,即:A(热带)、B(干旱气候带)、C(亚热带)、D(温带、寒温带)、E(极地带)(图1)。为便于分析,将气候类型数据采用双线性内插的方法,重采样到和 NPP 数据一样的空间分辨率,并将其坐标与投影方式与 NPP 数据相统一。



Fig.1 Spatial distribution of global climate zones

2 结果与分析

2.1 全球 NPP 空间分布与变化趋势

2.1.1 全球 NPP 空间分布

如图 2 所示,2001—2018 年间,全球植被 NPP 年均总量为 127.13gCm⁻²a⁻¹,呈现出明显的空间分异特征。 其高值区集中分布在低纬度气候带,以南美亚马逊流域、非洲刚果盆地及东南亚岛屿地区为代表;相较于高值 区,全球植被 NPP 低值区的分布范围明显较广,具体分布在北美西南部和高纬地区、南美西部、非洲北部和南



图 2 2001—2018 年全球植被 NPP 的空间分布 Fig.2 Spatial distribution of global vegetation NPP from 2001 to 2018

43 卷

部、中亚和北亚高纬地区、澳大利亚的荒漠地区。全球不同气候带年均 NPP 值由高至低依次为:热带(307.70 gCm⁻²a⁻¹)>亚热带(206.95gCm⁻²a⁻¹)>温带寒温带(123.19gCm⁻²a⁻¹)>干旱气候带(58.17gCm⁻²a⁻¹)>极地带(11.05gCm⁻²a⁻¹)。

2.1.2 全球 NPP 变化趋势

获取全球陆地 NPP 各年均值后,运用线性拟合方法,可看出全球陆地 NPP 的变化趋势。如图 3 所示, 2001—2018 年,全球陆地 NPP 呈现波动上升趋势(*R*² = 0.083,*P* = 0.247),波动范围为 125.09—128.56gCm⁻² a⁻¹,线性增长速率为 0.05gCm⁻²a⁻¹,其最大值出现在 2001 年,为 128.56gCm⁻²a⁻¹,最小值出现在 2008 年,为 125.09gCm⁻²a⁻¹。运用 Mann-Kendall 突变分析,检验全球陆地 NPP 的突变点。根据突变检验结果,UF 和 UB 两线在 2015 年相交,且交点在置信区间内,表明 2015 年 NPP 变化趋势发生突变。





综合 Mann-Kendall 趋势检验和 Theil-Sen 斜率估计结果,可推测全球陆地 NPP 的变化类型。由图 4 和表 1 可看出,NPP 显著改善的面积占全球陆地面积的 8.45%,主要分布在北美洲中部平原、亚马逊河流域西部、 非洲刚果盆地、欧洲南部、印度半岛西北部、中国黄土高原。NPP 轻微改善的面积最大,占全球陆地面积的 40.34%,主要分布在北美洲北部、南美洲中南部、亚洲东部和澳大利亚大陆东部。NPP 稳定不变的面积占全 球陆地面积的 2.6%,零星分布于各地。NPP 严重退化的面积占全球陆地面积的 8.54%,主要分布在亚马逊河流域东北部、非洲萨赫勒以及加里曼丹岛北部等。其他 40.07%的区域则表现为轻微退化。



图 4 2001—2018 年全球陆地 NPP 变化类型空间分布 Fig.4 Spatial distribution of global terrestrial NPP change types from 2001 to 2018

http://www.ecologica.cn

| 表 I 2001—2018 年 NPP 受化类型统计 | | | | | |
|--|----------------------------|-----------------------------------|------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| Table 1 Statistics of NPP change types from 2001 to 2018 | | | | | |
| 变化趋势 Trends | 像元数 Number of pixels | 像元占比 Percentage of pixels/% | 变化趋势 Trends | 像元数 Number of pixels | 像元占比 Percentage of pixels/% |
| 明显改善 Significant improvement | 456885 | 8.45 | 轻微退化 Slight degradation | 2168007 | 40.07 |
| 轻微改善 Slight improvement | 2182688 | 40.34 | 严重退化 Significant degradation | 462105 | 8.54 |
| 稳定不变 Stability | 140470 | 2.60 | | | |

2.2 全球不同气候带 NPP 变化趋势与突变点

运用线性趋势拟合方法,分析全球五个气候带 NPP 在 2001—2018 年间的变化趋势。在此基础上,运用 Mann-Kendall 趋势检验方法,揭示各气候带 NPP 的突变年份。研究结果如下:

2.2.1 热带植被 NPP 变化趋势及突变点

如图 5 可见,热带 NPP 呈不显著的下降趋势(*R*² = 0.111,*P* = 0.176),下降速率约为 0.189gCm⁻²a⁻¹, NPP 值波动范围为 313.72—301.48gCm⁻²a⁻¹。其最高值出现在 2001 年,最低值出现在 2016 年。MK 突变检验显示,热带 NPP 的突变时间分别为 2002 年、2012 年、2013 年。根据滑动 t 检验进一步验证,研究期间热带 NPP 并未存在显著突变年。



图 5 2001—2018 年热带 NPP 变化趋势及突变检验 Fig.5 rend and mutation test of NPP in tropical from 2001 to 2018

2.2.2 干旱气候带植被 NPP 变化趋势及突变点

如图 6 所示,干旱气候带 NPP 呈不显著上升趋势(*R*²=0.036,*P*=0.450),上升速率为 0.046gCm⁻²a⁻¹,NPP 值波动范围为 55.82—59.96gCm⁻²a⁻¹。最大值出现 2018 年,最小值出现在 2002 年。MK 突变检验显示,干旱 气候带 NPP 在 2004 年、2009 年、2011 年发生突变,根据滑动 t 检验进一步验证,干旱气候带 NPP 的实际突变 年为 2009 年。

2.2.3 亚热带植被 NPP 的变化趋势及突变点

如图 7 所示, 亚热带 NPP 呈现不显著的下降趋势(*R*² = 0.144, *P* = 0.120), 下降速率为 0.175gC m⁻² a⁻¹, NPP 值的波动范围为 212.90—202.63gC m⁻² a⁻¹。最大值出现在 2004 年, 最低值出现 2018 年。MK 突变检验 结果显示, 亚热带 NPP 分别在 2002 年、2004 年、2005 年、2015 年和 2017 年发生突变。根据滑动 t 检验结果验证, 热带 NPP 实际突变年为 2015 年。

2.2.4 温带寒温带植被 NPP 的变化趋势及突变点

由图 8 可见,温带寒温带植被 NPP 呈显著的上升趋势(R²=0.533, P=0.001),上升速率为0.297gCm⁻²a⁻¹,









NPP 值的波动范围为:119.71—127.53gCm⁻²a⁻¹。最大值出现在 2016 年,最小值出现在 2008 年。根据 MK 突 变检验结果,温带寒温带 NPP 的突变年为 2014 年。

2.2.5 极地带植被 NPP 的变化趋势及突变点

如图 9 所示,极地带 NPP 变化整体呈不显著的下降趋势(*R*²=0.002,*P*=0.854),下降速率为 0.005gCm⁻² a⁻¹,NPP 值的波动范围为 12.07—10.11gCm⁻²a⁻¹。最大值出现在 2010 年,最小值出现在 2004 年、2014 年。 MK 突变检验结果显示,极地带 NPP 的突变年为 2005 年。

2.3 全球不同气候带 NPP 变化与降水、气温的相关性

估算 2001—2018 年各气候带 NPP 分别与年降水量、年均气温的相关性,解析不同气候带 NPP 变化与气候因子的关系。

2.3.1 不同气候带 NPP 变化与年降水量变化的相关性

降水对 NPP 的作用在不同气候区会呈现差异。由图 10 可见,热带 NPP 变化与年降水量无明显相关性 (*R*²=0.001,*P*=0.894),干旱气候带 NPP 变化与年降水量存在显著的正相关关系(*R*²=0.269,*P*=0.027),亚热 带 NPP 变化与年降水量无明显相关性(*R*²=0.011,*P*=0.680),温带寒温带 NPP 变化与年降水量存在不显著



图 8 2001—2018 年温带寒温带 NPP 变化趋势及突变检验

Fig.8 Trend and mutation test of NPP in the temperate cold temperate zone from 2001 to 2018





的正相关关系(*R*²=0.133,*P*=0.137),极地带 NPP 变化与年降水量存在较显著的负相关关系(*R*²=0.257,*P*=0.032)。结果表明,热带、亚热带和温带寒温带 NPP 受年降水量影响不显著。在干旱气候带,年降水量增加可能会提高 NPP 和生态系统碳吸存。而在极地带,由于其降水多为较寒冷的固态水,固态水会对植被生产力产生抑制作用,因此年降水量增加会显著降低 NPP 和生态系统碳吸存^[35]。

2.3.2 不同气候带 NPP 变化与气温变化的相关性

气温也影响着植被生长,全球植被生产力的最佳适宜温度为(23±6)℃^[36]。不同气候带的气温具有显著 差异性,因而其 NPP 的变化特征也各不相同。如图 11 所示,热带 NPP 变化与年均气温有显著的负相关性 (*R*²=0.487,*P*=0.001),干旱气候带 NPP 变化与年均气温无明显相关性(*R*²=0.036,*P*=0.449),亚热带 NPP 变化与年均气温无明显相关性(*R*²=0.00002,*P*=0.985),温带寒温带 NPP 变化与年均气温有显著的正相关性 (*R*²=0.585,*P*<0.001),极地带 NPP 变化与年均气温有显著的正相关性(*R*²=0.419,*P*=0.04)。结果表明,在 热带,气温升高抑制了 NPP 和生态系统碳吸收。干旱气候带和亚热带 NPP 变化受气温影响不明显。温带寒 温带和极地带上升的气温大大提高了植被的固碳能力。

2.4 全球不同气候带 NPP 变化可持续性

揭示全球及不同气候带 NPP 变化的可持续性,有助于了解植被未来的发展动态,从而为制定有效的应对 策略提供参考。







2.4.1 全球 NPP 未来变化趋势的空间分布

如图 12 所示,全球陆地生态系统的未来演进中,NPP 呈减少的面积(51.31%)大于增加的面积(48.69%)。其中,NPP 持续减少的区域主要分布在北美洲西南部、亚马逊河流域中部和东部、南美洲南部、非洲北部、亚洲西部、加里曼丹岛北部、新几内亚岛东南部、澳大利亚大陆中部等地区,面积占比为 22.02%;NPP 由增变减的区域主要分布在北美洲中部和北部、亚洲北部、亚马逊河流域西部、非洲萨赫勒等地区,面积占比为 29.29%。总体上,未来全球陆地生态系统 NPP 趋于退化,NPP 变化以反持续性特征为主,占比为 58.45%。 2.4.2 不同气候带 NPP 变化的可持续性

图 13 显示各气候带未来的 NPP 变化可持续性分类情形。可看出:(1)热带、极地带 NPP 趋于稳定,热带、极地带 NPP 增加面积(分别为 49.50%、48.80%)与减少面积(分别为 50.1%、49.4%)基本相当。(2)干旱气候带、亚热带、温带寒温带 NPP 趋于退化,干旱气候带、亚热带、温带寒温带 NPP 增加面积(分别为43.40%、46.40%、43.30%)明显小于减少面积(分别为 46.5%、53.3%、56.3%)。结果表明,干旱气候带、亚热带、温带寒 温带三类地区是未来防止 NPP 退化工作的重点区域。

3 讨论

3.1 不同气候带降水、气温对 NPP 变化的影响

3.1.1 降水、气温对 NPP 的单独影响

不同气候带降水、气温有显著的差异,植被 NPP 受降水、气温的作用机制不同。具体来看,干旱气候带、





Fig.11 Correlation of NPP changes with annual mean temperature changes in different climatic zones





Fig.12 Spatial distribution of sustainability of global terrestrial NPP change from 2001 to 2018

http://www.ecologica.cn



图 13 不同气候带 NPP 变化的可持续性统计 Fig.13 Sustainability statistics of NPP changes in different climate zones

极地带 NPP 主要为水分限制型,而热带、温带寒温带 NPP 为热量限制型,亚热带 NPP 受气温、降水影响不显 著。干旱气候带受水分的正限制作用,表现为植被对降水变化的敏感性大于温度^[37],随降水增加,干旱得到 缓解,对植被生长越有利。极地带由于环境潮湿、气温极低,过多降水加剧植被霜冻灾害的同时^[38],还不利于 光合作用^[39],植被生长受到极大抑制,因此该地区植被表现出受水分的负限制影响,即随降水增加,NPP 下 降。对热带地区而言,其平均气温足够高,气温上升则会增加呼吸支出^[40],导致 NPP 降低。与之相反,在温 带寒温带地区,气温变暖对植被具有显著的积极作用^[41],表现为植被光合作用增加,植被固碳能力增强^[42], 进而使得 NPP 上升。

3.1.2 降水、气温对 NPP 的组合影响

降水和气温变化并非分别发生,两者的综合还共同决定了一个地区的冷、暖、干、湿变化[43]。冷暖干湿通

过改变植被的物候^[44]、代谢^[45]和功能性状^[46],进而直接影响陆地生态系统的植被生产力。并且不同水热组 合类型对植被 NPP 的影响是不一样的,主要表现为冷湿地区的 NPP 呈显著增加,暖湿地区的 NPP 呈显著减 少,其他区域的 NPP 则无显著变化^[47]。可见,NPP 除了受降水、气温的单独影响外,还受两者间协同作用的 影响,并且只有当降水和气温趋于平衡时,对植被的生长才更有利。

3.2 研究成果适用边界条件及未来研究方向

3.2.1 研究成果适用边界

本研究仅从宏观尺度上分析了陆地植被 NPP 的动态变化,揭示了各气候带植被 NPP 的变化特征,并阐明 NPP 变化与年均气温、年降水量的相关性,研究结果为国内外同行对比分析全球不同气候带陆地生态系统的碳源(汇)功能提供了一定参考。然而,除了气候因素的影响外,植被 NPP 的生长还与人类活动^[48-49]、土壤^[50]、地形^[51]、景观格局^[52]等因素有关,这些环境特征在不同区域情况不一,因此,研究结果仅代表宏观尺度的情况,不能反映微观尺度上的具体变化情况。

3.2.2 未来研究方向

不同气候带内部存有显著差异,又分为不同气候类型,不同气候类型的水热特征各不相同,进而导致陆地 植被 NPP 的变化及可持续性也会有差异性。而且,植被自身由于物种组成、群落结构、自然演替规律等存有 较大差异^[53],其对外界环境的响应和敏感性也均不相同。因此,未来工作中将继续开展不同气候类型以及不 同植被 NPP 变化差异的研究,以期为丰富研究结论和相关应对策略的制定提供重要支撑。

此外,本研究分析 NPP 变化的可持续性是基于现阶段植被变化情况预测得到,随时间的推移,陆地植被 NPP 可能会呈现不同的变化趋势。因此,要准确掌握未来植被的动态变化情况需要不间断地进行监测。

4 结论

全球陆地 NPP 有明显的地域分异规律,呈现低纬高、高纬低,沿海高、内陆低的分布特点,并以每年 0.05gC/m²的增速波动上升。各气候带的分布差异表现为热带(307.70gCm⁻²a⁻¹)>亚热带(206.95gCm⁻²a⁻¹)> 温带寒温带(123.19gCm⁻²a⁻¹)>干旱气候带(58.17gCm⁻²a⁻¹)>极地带(11.05gCm⁻²a⁻¹)。研究期间,NPP 变化 类型以轻微改善为主,占全球陆地表面的 40.34%,分布在北美洲北部、南美洲中南部、亚洲东部和澳大利亚大 陆东部。

不同气候带 NPP 变化趋势表现为热带总体表现为不显著下降趋势,无明显突变年份;干旱气候带整体呈 不显著上升趋势,突变点发生在 2009 年;亚热带整体呈不显著的下降趋势,突变点发生在 2015 年;温带寒温 带整体呈显著上升趋势,突变点发生在 2014 年;极地带整体呈不明显下降趋势,突变点发生在 2005 年。

各气候带 NPP 与降水、气温的关系为:干旱气候带、极地带 NPP 主要为水分限制型,而热带、温带寒温带 NPP 为热量限制型,亚热带 NPP 受气温、降水影响不显著。

在未来,热带、极地带的 NPP 趋于稳定,干旱气候带、亚热带、温带寒温带的 NPP 趋于退化,干旱气候带、 亚热带、温带寒温带三类地区将是防止 NPP 退化工作的重点区域。

参考文献(References):

- [1] 戴尔阜,黄宇,吴卓,赵东升.内蒙古草地生态系统碳源/汇时空格局及其与气候因子的关系.地理学报,2016,71(1):21-34.
- [2] Wolf S, Keenan T F, Fisher J B, Baldocchi D D, Desai A R, Richardson A D, Scott R L, Law B E, Litvak M E, Brunsell N A, Peters W, Van Der Laan-Luijkx I T. Warm spring reduced carbon cycle impact of the 2012 US summer drought. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, 113(21): 5880-5885
- [3] Sha Z Y, Bai Y F, Li R R, Lan H, Zhang X L, Li J, Liu X F, Chang S J, Xie Y C. The global carbon sink potential of terrestrial vegetation can be increased substantially by optimal land management. Communications Earth & Environment, 2022, 3(1): 8.
- [4] Canadell J G, Pataki D E, Pitelka L F. Terrestrial ecosystems in a changing world. Berlin: Springer, 2007.
- [5] 冯险峰,孙庆龄,林斌. 区域及全球尺度的 NPP 过程模型和 NPP 对全球变化的响应. 生态环境学报, 2014, 23(3): 496-503.
- [6] Del Grosso S, Parton W, Stohlgren T, Zheng D L, Bachelet D, Prince S, Hibbard K, Olson R. Global potential net primary production predicted from vegetation class, precipitation, and temperature. Ecology, 2008, 89(8): 2117-2126.

- [8] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, Falkowski P. Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components. Science, 1998, 281(5374): 237-240.
- [9] 郭睿妍,田佳,杨志玲,杨泽康,苏文瑞,刘文娟. 基于 GEE 平台的黄河流域森林 NPP 时空变化特征. 生态学报, 2022, (13): 1-9. (2022-03-18). http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2031.0.20220316.1720.030.html.
- [10] Zhang Y J, Yu G R, Yang J, Wimberly M C, Zhang X Z, Tao J, Jiang Y B, Zhu J T. Climate-driven global changes in carbon use efficiency. Global Ecology and Biogeography, 2014, 23(2): 144-155.
- [11] Wang J M, Sun R, Zhang H L, Xiao Z Q, Zhu A R, Wang M J, Yu T, Xiang K L. New global MuSyQ GPP/NPP remote sensing products from 1981 to 2018. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14: 5596-5612.
- [12] Liu F H, Xu C Y, Yang X X, Ye X C. Controls of Climate and Land-Use Change on Terrestrial Net Primary Productivity Variation in a Subtropical Humid Basin. Remote Sensing, 2020, 12(21): 3525.
- [13] Ge W Y, Deng L Q, Wang F, Han J Q. Quantifying the contributions of human activities and climate change to vegetation net primary productivity dynamics in China from 2001 to 2016. Science of The Total Environment, 2021, 773; 145648.
- [14] Yu D S, Li Y H, Yin B L, Wu N, Ye R H, Liu G X. Spatiotemporal variation of net primary productivity and its response to drought in Inner Mongolian desert steppe. Global Ecology and Conservation, 2022, 33: e01991.
- [15] Wu L Z, Ma X F, Dou X, Zhu J T, Zhao C Y. Impacts of climate change on vegetation phenology and net primary productivity in arid Central Asia. Science of the Total Environment, 2021, 796: 149055.
- [16] Jackson H, Prince S D. Degradation of net primary production in a semi-arid rangeland. Biogeosciences, 2016, 13(16): 4721-4734.
- [17] 刘杰, 汲玉河, 周广胜, 周莉, 吕晓敏, 周梦子. 2000-2020 年青藏高原植被净初级生产力时空变化及其气候驱动作用. 应用生态学报, 2022, 33(6): 1533-1538.
- [18] Xiao Z Q, Liang S L, Sun R, Wang J D, Jiang B. Estimating the fraction of absorbed photosynthetically active radiation from the MODIS data based GLASS leaf area index product. Remote Sensing of Environment, 2015, 171: 105-117.
- [19] Nemani R, Keeling C D, Hashimoto H, Jolly W M, Piper S C, Tucker C J, Myneni R B, Running S W. Climate-Driven Increases in Global Terrestrial Net Primary Production from 1982 to 1999. Science, 2003, 300(5625): 1560-1563.
- [20] Zhao M S, Running S W. Drought-Induced Reduction in Global Terrestrial Net Primary Production from 2000 Through 2009. Science, 2010, 329 (5994): 940-943.
- [21] Tum M, Zeidler J N, Günther K P, Esch T. Global NPP and straw bioenergy trends for 2000-2014. Biomass and Bioenergy, 2016, 90: 230-236.
- [22] Hubau W, Lewis S L, Phillips O L, Affum-Baffoe K, Beeckman H, Cuní-Sanchez A, Daniels A K, Ewango C E N, Fauset S, Mukinzi J M, Sheil D, Sonké B, Sullivan M J P, Sunderland T C H, Taedoumg H, Thomas S C, White L J T, Abernethy K A, Adu-Bredu S, Amani C A, Baker T R, Banin L F, Baya F, Begne S K, Bennett A C, Benedet F, Bitariho R, Bocko Y E, Boeckx P, Boundja P, Brienen R J W, Brncic T, Chezeaux E, Chuyong G B, Clark C J, Collins M, Comiskey J A, Coomes D A, Dargie G C, De Haulleville T, Kamdem M N D, Doucet J L, Esquivel-Muelbert A, Feldpausch T R, Fofanah A, Foli E G, Gilpin M, Gloor E, Gonmadje C, Gourlet-Fleury S, Hall J S, Hamilton A C, Harris D J, Hart T B, Hockemba M B N, Hladik A, Ifo S A, Jeffery K J, Jucker T, Yakusu E K, Kearsley E, Kenfack D, Koch A, Leal M E, Levesley A, Lindsell J A, Lisingo J, Lopez-Gonzalez G, Lovett J C, Makana J R, Malhi Y, Marshall A R, Martin J, Martin E H, Mbayu F M, Medjibe V P, Mihindou V, Mitchard E T A, Moore S, Munishi P K T, Bengone N N, Ojo L, Ondo F E, Peh K S H, Pickavance G C, Poulsen A D, Poulsen J R, Qie L, Reitsma J, Rovero F, Swaine M D, Talbot J, Taplin J, Taylor D M, Thomas D W, Toirambe B, Mukendi J T, Tuagben D, Umunay P M, Van Der heijden G M F, Verbeeck H, Vleminckx J, Willcock S, Wöll H, Woods J T, Zemagho L. Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests. Nature, 2020, 579(7797); 80-87.
- [23] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(第二版). 北京: 气象出版社, 2007.
- [24] Yang Y J, Wang S J, Bai X Y, Tan Q, Li Q, Wu L H, Tian S Q, Hu Z Y, Li C J, Deng Y H. Factors Affecting Long-Term Trends in Global NDVI. Forests, 2019, 10(5): 372.
- [25] Kendall M G. A New Measure of Rank Correlation. Biometrika, 1938, 30(1/2): 81-93.
- [26] 袁丽华,蒋卫国,申文明,刘颖慧,王文杰,陶亮亮,郑华,刘孝富. 2000-2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化. 生态学报, 2013, 33 (24):7798-7806.
- [27] Granero M A S, Segovia J E T, Pérez J G. Some comments on Hurst exponent and the long memory processes on capital markets. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2008, 387(22): 5543-5551.
- [28] 严恩萍,林辉,党永峰,夏朝宗. 2000-2012 年京津风沙源治理区植被覆盖时空演变特征. 生态学报, 2014, 34(17): 5007-5020.
- [29] Peng J, Liu Z H, Liu Y H, Wu J S, Han Y N. Trend analysis of vegetation dynamics in Qinghai-Tibet Plateau using Hurst Exponent. Ecological Indicators, 2012, 14(1): 28-39.
- [30] 王建邦,赵军,李传华,朱钰,康重阳,高超. 2001-2015年中国植被覆盖人为影响的时空格局. 地理学报, 2019, 74(3): 504-519.
- [31] Mandelbrot B B, Wallis J R. Robustness of the rescaled range R/S in the measurement of noncyclic long run statistical dependence. Water Resources Research, 1969, 5(5): 967-988.

- [32] 李美丽, 尹礼昌, 张园, 苏旭坤, 刘国华, 王晓峰, 奥勇, 伍星. 基于 MODIS-EVI 的西南地区植被覆盖时空变化及驱动因素研究. 生态学报, 2021, 41(3): 1138-1147.
- [33] 李茂华,都金康,李皖彤,李闰洁,吴森垚,王珊珊. 1982-2015 年全球植被变化及其与温度和降水的关系. 地理科学, 2020, 40(5): 823-832.
- [34] Beck H E, Zimmermann N E, Mcvicar T R, Vergopolan N, Berg A, Wood E F. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1km resolution. Scientific Data, 2018, 5(1): 180214.
- [35] Gang C C, Wang Z N, You Y F, Liu Y, Xu R T, Bian Z H, Pan N Q, Gao X R, Chen M X, Zhang M. Divergent responses of terrestrial carbon use efficiency to climate variation from 2000 to 2018. Global and Planetary Change, 2022, 208: 103709.
- [36] Huang M T, Piao S L, Ciais P, Peñuelas J, Wang X H, Keenan T F, Peng S S, Berry J A, Wang K, Mao J F, Alkama A, Cescatti A, Cuntz M, De Deurwaerder H, Gao M D, He H, Liu Y W, Luo Y Q, Myneni R B, Niu S L, Shi X Y, Yuan W P, Verbeeck H, Wang T, Wu J, Janssens I A. Air temperature optima of vegetation productivity across global biomes. Nature Ecology & Evolution, 2019, 3(5): 772-779.
- [37] Shen M G, Piao S L, Cong N, Zhang G X, Jassens I A. Precipitation impacts on vegetation spring phenology on the Tibetan Plateau. Global Change Biology, 2015, 21(10): 3647-3656.
- [38] Väisänen M, Krab E J, Dorrepaal E. Carbon dynamics at frost-patterned tundra driven by long-term vegetation change rather than by short-term nongrowing season warming. Biogeochemistry, 2017, 136(1): 103-117.
- [39] Thomey M L, Collins S L, Vargas R, Johnson J E, Brown R F, Natvig D O, Friggens M T. Effect of precipitation variability on net primary production and soil respiration in a Chihuahuan Desert grassland. Global Change Biology, 2011, 17(4): 1505-1515.
- [40] Corlett R T. Impacts of warming on tropical low land rainforests. Trends in Ecology & Evolution, 2011, 26(11): 606-613.
- [41] Keenan T F, Riley W J. Greening of the land surface in the world's cold regions consistent with recent warming. Nature Climate Change, 2018, 8 (9): 825-828.
- [42] Wu Z T, Dijkstra P, Koch G W, Peñuelas J, Hungate B A. Responses of terrestrial ecosystems to temperature and precipitation change: a metaanalysis of experimental manipulation. Global Change Biology, 2011, 17(2): 927-942.
- [43] Wang J S, Chen F H, Jin L Y, Bai H Z. Characteristics of the dry/wet trend over arid central Asia over the past 100 years. Climate Research, 2010, 41(1): 51-59.
- [44] Gill A L, Gallinat A S, Sanders-DeMott R, Rigden A J, Gianotti D J S, Mantooth J A, Templer P H. Changes in autumn senescence in northern hemisphere deciduous trees: a meta-analysis of autumn phenology studies. Annals of Botany, 2015, 116(6): 875-888.
- [45] Grossiord C, Buckley T N, Cernusak L A, Novick K A, Poulter B, Siegwolf R T W, Sperry J S, McDowell N G. Plant responses to rising vapor pressure deficit. New Phytologist, 2020, 226(6): 1550-1566.
- [46] Anderegg W R L. Spatial and temporal variation in plant hydraulic traits and their relevance for climate change impacts on vegetation. New Phytologist, 2015, 205(3): 1008-1014.
- [47] Li C H, Zhou M, Dou T B, Zhu T B, Yin H H, Liu L H. Convergence of global hydrothermal pattern leads to an increase in vegetation net primary productivity. Ecological Indicators, 2021, 132: 108282.
- [48] Milesi C, Hashimoto H, Running S W, Nemani R R. Climate variability, vegetation productivity and people at risk. Global and Planetary Change, 2005, 47(2/4): 221-231.
- [49] 茆杨,蒋勇军,张彩云,乔伊娜,吕同汝,邱菊.近20年来西南地区植被净初级生产力时空变化与影响因素及其对生态工程响应.生态 学报,2022,42(7):2878-2890.
- [50] Ugbaje S U, Odeh I O A, Bishop T F A, Li J L. Assessing the spatio-temporal variability of vegetation productivity in Africa: quantifying the relative roles of climate variability and human activities. International Journal of Digital Earth, 2017, 10(9): 879-900.
- [51] Li H, Zhang H Y, Li Q X, Zhao J J, Guo X Y, Ying H, Deng G R, Wu R H, Wang S L. Vegetation productivity dynamics in response to climate change and human activities under different topography and land cover in northeast China. Remote Sensing, 2021, 13(5): 975.
- [52] 安秀江, 张凌云, 范泽熙, 杨广斌, 肖钊富. 贵阳市植被净初级生产力与景观格局时空分布及相关性研究. 贵州师范大学学报: 自然科学 版, 2021, 39(4): 30-38, 69-69.
- [53] 刘静,温仲明, 刚成诚. 黄土高原不同植被覆被类型 NDVI 对气候变化的响应. 生态学报, 2020, 40(2): 678-691.

9期