

doi: 10.6046/zrzyyg.2021283

引用格式: 朱思佳,冯徽徽,邹滨,等. 2000—2019年洞庭湖流域植被 NPP 时空特征及驱动因素分析[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(3):196–206. (Zhu S J, Feng H H, Zou B, et al. Spatial-temporal characteristics of 2000—2019 vegetation NPP of the Dongting Lake basin and their driving factors[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(3):196–206.)

# 2000—2019年洞庭湖流域植被 NPP 时空特征及驱动因素分析

朱思佳, 冯徽徽, 邹滨, 叶书朝

(中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙 410083)

**摘要:** 植被净初级生产力(net primary production, NPP)是流域生态系统的重要评价指标, 该文基于2000—2019年MODIS长时序NPP数据产品, 分析了洞庭湖流域20 a间植被NPP时空变化规律, 进而采用时空分析与地理探测器等方法揭示了气象、地表等驱动因素对研究区植被NPP的影响特征及贡献程度。结果表明: ①洞庭湖流域植被NPP多年均值为 $0.65 \text{ kgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , 高值区域主要分布在流域西部及南部, 低值区域则主要位于洞庭湖附近; ②2000—2019年, 洞庭湖流域植被NPP呈现平稳上升趋势( $y = 0.003x + 0.6227$ ,  $R^2 = 0.437$ ,  $p < 0.001$ ), 增长区域主要位于流域西北及中部偏南, 而减少区域主要在流域东北及西南边界地区, 植被NPP重心在平衡发展中呈微弱迁移趋势; ③洞庭湖流域植被NPP变化总体上受气象因素(尤其是气温)影响较显著, 但NPP空间特征则主要受土地利用影响, 降水与高程次之。此外, 不同因子间交互作用显著, 主要表现为双因子增强(高程与土地利用或降水)及非线性增强(气温与降水、土地利用或高程, 降水与土地利用)2种类型。研究结果有助于正确认识与把握洞庭湖流域NPP时空变化特征及其内在影响机制, 从而为流域生态系统管理与治理提供科学的辅助依据。

**关键词:** 洞庭湖流域; 植被NPP; 时空特征; 驱动因素

**中图法分类号:** TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2022)03-0196-11

## 0 引言

植被生产力<sup>[1]</sup>包括总初级生产力(gross primary production, GPP)和净初级生产力(net primary production, NPP), 是植被通过光合作用实现光能向化学能的转化并为自身及异养生物提供有机物的能力, 也是维系生态系统运行与发展的核心参数<sup>[2]</sup>。明晰植被NPP的时空分布特征及其影响因素是精准掌握区域生态系统状态、制定科学的生态规划与管理的重要依据, 因而成为陆地生态系统研究的核心内容之一<sup>[3]</sup>。

传统NPP监测主要依托地面站点开展, 虽然精度较高, 但空间代表性弱, 只能反映站点周围的植被生产效率, 在区域大范围监测中受到较大限制<sup>[4]</sup>, 随着遥感技术的发展, 全球与区域大范围NPP遥感估算模型取得系列研究成果<sup>[5-8]</sup>, 模型精度逐渐提升。依托不同监测方法, 目前已有大量研究揭示了

全球<sup>[9-10]</sup>及区域<sup>[11-13]</sup>尺度下NPP的时空特征。

NPP影响因子较多, 主要包括气象因子(降水、气温等)、土壤条件、植被生理特性<sup>[9]</sup>等。光合作用“原料”之一为水, 植物细胞内的自由水决定着植被代谢活动的强度, 自由水含量越高代谢活动越旺盛<sup>[14]</sup>。温度对植物的影响主要在于植物的生理及生化过程都需要在适宜的温度下进行, 适当的升温能够加快生长发育、降温会延缓生长发育, 但极端的低温或高温都会对植物的正常生长造成阻碍, 更甚者会造成植物死亡<sup>[15]</sup>。土壤条件、植被生理特性等因子深刻影响了植被对外界物质和能量的吸收方式与强度, 进而对植被NPP产生重要影响<sup>[9]</sup>。此外, 不同因子对植被NPP的影响并不是单一独立的, 而是在地球复杂巨系统框架下呈现复杂的交互作用<sup>[9, 16]</sup>, 导致精准解析NPP影响因子依然面临较大不确定性, 这也是陆地生态系统研究中的重要内容。

洞庭湖流域是我国重要的长江集水蓄洪和生态

收稿日期: 2021-09-03; 修订日期: 2021-11-14

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“土地利用/覆盖变化(LUCC)对区域大气污染多尺度影响的水文气象机理”(编号: 42071378)和湖南省自然科学基金优秀青年项目“土地利用/覆盖变化(LUCC)的生态环境响应”(编号: 2020JJ3045)共同资助。

第一作者: 朱思佳(1996-), 女, 硕士研究生, 主要从事自然资源方面研究。Email: 0107150123@csu.edu.cn。

通信作者: 冯徽徽(1986-), 男, 博士, 副教授, 从事资源环境遥感与可持续发展研究。Email: hhfeng@csu.edu.cn。

区,其植被变化特征不仅影响了区域生态系统结构与质量,同时也会对长江流域生态环境产生显著影响,但该区域目前相应研究成果不足,分析洞庭湖流域植被 NPP 时空特征及其驱动因素具有较重要的理论与实践意义。鉴于上述问题,本文基于 2000—2019 年 MODIS NPP 数据产品,分析了 20 a 间洞庭湖流域 NPP 时空变化特征,并在此基础上结合流域气象与地表特征,利用地理探测器定量探究 NPP 驱动因素及因子间交互作用。研究结果有助于准确把握洞庭湖流域生态系统生产更新能力变化特征,并为生态保护与恢复政策的制定提供科学决策依据。

## 1 研究区概况与数据源

### 1.1 研究区概况

洞庭湖流域 (N24°39' ~ 30°24', E107°16' ~ 114°14') 主要包含湖南省大部及周边六省(市区)部分地区(图 1),处于亚热带季风气候带,多年降水量均值约为 1 437 mm,平均气温为 17 °C,是长江重要的集水和蓄洪区<sup>[17]</sup>。研究区东部整体地势较低,高海拔地区主要分布在中西部山地,呈西北—东南走向。流域内植被以常绿阔叶林为主,兼有混交林、灌木、草地等类型。2000—2019 年,该地区耕地面积增加明显(约 4 129 km<sup>2</sup>)而林地、草地有一定程度减少,分别为 1 491 km<sup>2</sup>和 2 911 km<sup>2</sup>。

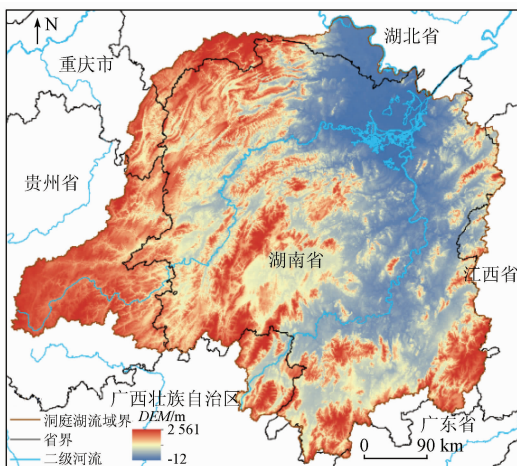


图 1 洞庭湖流域地理位置

Fig.1 Location of the Dongting Lake basin

### 1.2 数据源及预处理

本文基于遥感与地面多源数据,开展洞庭湖流域 NPP 时空特征及其驱动因子研究,数据说明如下:

1) NPP 数据。本文采用 2000—2019 年的 MOD17A3HGF 数据集作为植被 NPP 的数据源(ht-

tps://e4ftl01.cr.usgs.gov/),该数据集能够提供通过光能利用模型估算得到的 500 m 分辨率的年净初级生产力信息,是 MOD17 的改进版本产品,清除了 8 d 合成 LAI/FPAR 质量差的输入,较前版精度有所提升。根据 MOD17A3HGF 数据集质量控制数据(Npp\_QC)可以得到在洞庭湖流域研究时相内 NPP 反演产品中、高等级 20 a 平均可信度高达 97.04%,具有一定可靠性。

2) 气象数据。主要包括降水及气温数据,用于研究 NPP 气象驱动因子分析。数据来源于国家资源环境与数据中心(http://www.resdc.cn/Default.aspx),由全国气象站日气象数据经整理、插值等形成年均结果,空间分辨率为 1 km。

3) 土地利用数据。该数据主要用于分析不同用地类型 NPP 的空间差异性,数据来源于 2001—2019 年 MODIS MCD12Q1 数据集,该数据集包括 5 个分类产品,本文采用其中 IGBP 分类规则产品。

4) 数字高程模型数据。数据由资源环境与数据中心发布的 90 m STRM (shuttle Radar topography mission, SRTM) 裁剪得到。

本文数据来源不一,数据格式差异较大,因此,本文将所有数据统一到 WGS84 UTM 投影,并重采样至 1 km 分辨率。

## 2 研究方法

为探讨洞庭湖流域 NPP 时空变化特征及其影响因子,本文首先采用地理信息系统时空分析方法分析 NPP 时空趋势,并采用重心模型等方法,研究 NPP 聚集效应及其迁移规律。在此基础上,利用相关性分析方法,分析了 NPP 与气象、地表参数的整体相关关系,最后采用地理探测器等方法,定量解析各驱动因子对 NPP 时空差异性的解释程度及其交互作用。

### 2.1 趋势分析

本文综合采用 Theil - Sen Median 与 Mann - Kendall 方法研究洞庭湖流域 NPP 长时序变化趋势<sup>[18]</sup>,其计算公式为:

$$\beta = \text{median}\left(\frac{NPP_j - NPP_i}{j - i}\right), i, j \in n, (1)$$

式中: median() 为求中位数函数;  $\beta$  为变化趋势检测因子,若  $\beta > 0$ ,则植被 NPP 表现为增加趋势;若  $\beta < 0$ ,则植被 NPP 表现为减少趋势;  $n$  为研究期数。进一步对  $\beta$  值采用 Mann - Kendall 方法检验其显著性,公式为:

$$\text{sgn}(NPP_j - NPP_i) = \begin{cases} 1 & (NPP_j - NPP_i > 0) \\ 0 & (NPP_j - NPP_i = 0) \\ -1 & (NPP_j - NPP_i < 0) \end{cases}, \quad (2)$$

$$S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n \text{sgn}(NPP_j - NPP_i), \quad (3)$$

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}, \quad (4)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}}} & (S < 0) \end{cases}, \quad (5)$$

式中： $\text{sgn}()$ 为符号函数； $\text{var}()$ 为求方差函数； $S$ 为检验统计量； $Z$ 为标准化检验统计量。检验结论为：若  $|Z| \geq 1.28, 1.64, 2.32$  则分别表示该结果通过了置信度为 90%, 95%, 99% 的显著性检验，指导意义分别为无明显变化、显著变化、极显著变化。

### 2.2 重心模型

重心是一个物理概念，表征物理受力平衡点的位置，在地理学中同样可以引入该概念用以对环境因子或人为影响在空间上“偏向”情况<sup>[19]</sup>进行描述。其计算公式如下：

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n z_i x_i}{\sum_{i=1}^n z_i}, \quad (6)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n z_i y_i}{\sum_{i=1}^n z_i}, \quad (7)$$

式中： $z_i$ 为空间某点 NPP 的值； $x_i, y_i$ 分别为该点处的地理横、纵坐标； $\bar{x}, \bar{y}$ 为最终求得的重心坐标。对重心坐标所在研究区的相对位置的迁移过程（含距离和方向）进行分析，能够得到植被 NPP 高密度区的变化情况，也能从另一个角度来观察研究区内植被 NPP 的空间分布变化情况。

### 2.3 地理探测器

地理探测器集成了探测因子驱动力的多种统计学方法，交互友好，使用方便，在地理环境或人为因素探测中得到广泛应用<sup>[20]</sup>。地理探测器中包含因子探测、风险探测、交互作用探测及生态探测 4 个模块，通过地理探测器的分析能够实现对多个影响因子对研究变量影响程度及因子间交互作用关系的研

究。其中，因子探测及交互作用探测模块被广泛应用于地理现象与过程的驱动因子解析研究，具体原理如下：

1) 因子探测。该模块能够检验研究变量的空间分异性，也能对影响因子之于研究变量的影响程度进行估计，结果以  $q$  值表达，公式为：

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2}, \quad (8)$$

式中： $h$ 为某一解释数据范围； $N, N_h$ 分别为整体数据总量及某类解释数据量； $\sigma, \sigma_h$ 为整体数据及某类解释因子的标准差。 $q$ 的取值位于 0~1 之间，数值越大表明解释因子对研究变量的驱动性越强，地理探测器结果中还会给出有关  $q$  值的显著性  $F$  检验结果。

2) 交互作用探测。该模块用于探测解释因子间的交互作用会对研究变量产生怎么样的结果，通过比较解释因子单独的  $q$  值与交互作用下  $q$  的相对大小分为非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、独立和非线性增强 5 种结果。对应关系如表 1 所示。

表 1 地理探测器交互作用  
Tab.1 Interaction of GeoDetector

判据	交互作用
$q(X1 \cap X2) < \min(q(X1), q(X2))$	非线性减弱
$\min(q(X1), q(X2)) < q(X1 \cap X2) < \max(q(X1), q(X2))$	单因子非线性减弱
$q(X1 \cap X2) > \max(q(X1), q(X2))$	双因子增强
$q(X1 \cap X2) = q(X1) + q(X2)$	独立
$q(X1 \cap X2) > q(X1) + q(X2)$	非线性增强

## 3 结果分析

### 3.1 洞庭湖流域植被 NPP 时空变化特征

2000—2019 年洞庭湖流域地表覆盖变化较为明显，如表 2 所示，表中，↗和↘分别表示某用地类型面积较上一年呈增加或减少态势。在此背景下，流域 NPP 空间分布如图 2 所示，其多年平均值为 0.65 kgC/(m<sup>2</sup>·a)，总体处于中等初级生产力水平。NPP 高值区 (>0.83 kgC/(m<sup>2</sup>·a)) 主要分布于流域西部及南部，低值区 (<0.44 kgC/(m<sup>2</sup>·a)) 主要位于洞庭湖区附近及流域中部。从时间变化上看(图 3)，流域 NPP 呈较稳定的上升趋势( $y = 0.003x + 0.6227, R^2 = 0.437, p < 0.001$ )。此外，NPP 的标准差呈微小变化趋势，表明流域植被生产力空间分布趋于稳定状态。图 4 显示了 2000—

表 2 2001—2019 年洞庭湖流域土地利用二级类面积变化

Tab.2 Change of land use second class area in the Dongting Lake basin from 2001 to 2019

(km<sup>2</sup>)

年份	林地				草地			耕地	
	常绿针叶林	常绿阔叶林	落叶阔叶林	混交林	木本稀树草原	稀树草原	草地	耕地	耕地/自然植被
2001 年	2 379	6 943	3 168	27 361	115 558	66 318	1 899	11 698	22 760
2002 年	↗2 419	↗7 050	↗3 374	↗27 788	↘114 570	↘65 384	↘1 878	↗12 014	↗23 630
2003 年	↘2 280	↘6 622	↗3 622	↘27 182	↗115 066	↘63 631	↘1 870	↗12 591	↗25 240
2004 年	↘2 160	↘6 511	↗3 786	↘26 661	↗115 165	↘62 661	↘1 838	↗12 795	↗26 552
2005 年	↘2 081	↘6 154	↗4 006	↘25 751	↗115 436	↗62 706	↗1 881	↗13 057	↗27 081
2006 年	↘2 002	↘5 901	↗4 188	↘25 092	↗115 542	↗63 358	↘1 745	↘13 039	↗27 275
2007 年	↘1 944	↘5 506	↗4 430	↘24 608	↘115 129	↗65 317	↗1 774	↗13 066	↘26 356
2008 年	↘1 849	↘4 805	↗4 542	↘24 061	↗115 692	↗66 073	↗1 855	↗13 126	↘26 079
2009 年	↗1 857	↘4 701	↗4 612	↘23 723	↗115 884	↗66 815	↘1 668	↘12 567	↗26 170
2010 年	↗1 900	↗4 811	↗4 821	↗23 729	↘115 366	↗67 792	↘1 594	↘12 244	↘25 666
2011 年	↗1 930	↗5 089	↗5 082	↘23 612	↘114 674	↗67 812	↗1 603	↘12 013	↗26 051
2012 年	↗1 962	↗5 472	↗5 147	↗23 751	↘114 385	↘66 595	↗1 618	↘11 774	↗27049
2013 年	↗1 996	↗6 223	↗4 928	↗24 049	↘113 266	↘66 318	↘1 584	↘11 578	↗27 700
2014 年	↗2 093	↗7 225	↘4 789	↗25 179	↘111 579	↘65 933	↗1 679	↘11 447	↘27 597
2015 年	↗2 110	↗8 182	↗4 888	↗26 992	↘109 240	↘65 109	↗1 737	↗11 516	↗27 619
2016 年	↗2 137	↗8 571	↗4 950	↗28 011	↘107 972	↘63 996	↘1 732	↗11 521	↗28 384
2017 年	↘2 125	↗9 351	↗5 184	↗29 176	↘105 259	↗64 488	↘1 705	↗11 926	↘27 919
2018 年	↗2 285	↗10 886	↗5 737	↗31 015	↘102 356	↘63 081	↘1 608	↗11 934	↗28 173
2019 年	↗2 299	10 248	↘5 704	↗31 817	↗103 293	↗63 566	↘1 451	↘11 465	↘27 164
总变化	-80	3 305	2 536	4 456	-12 265	-2 752	-448	-233	4 404

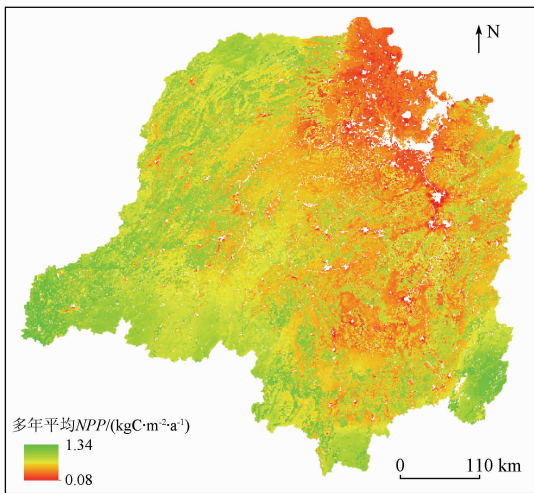


图 2 洞庭湖流域 2000—2019 年多年平均 NPP 空间分布

Fig.2 Spatial pattern of multi-year average NPP in the Dongting Lake basin from 2000 to 2019

2019 年 NPP 变化的空间特征。趋势检验(图 4(a)及(b))结果表明,植被 NPP 的减少主要分布在北部小范围、东南部及南部边缘的大部分地带,占流域总面积的 21.78%,但这种变化不具有显著性;

而植被 NPP 增加的范围较为广泛,且主要表现为“极显著增加”趋势,表明流域内从 2000—2019 年空间上植被生产力增强的普遍性。图 4(c)及(d)进一步展示了 NPP 变化程度,流域大部分区域呈较明显增长趋势,特别是西北及中东部地区(增加超过 88 gC/(m<sup>2</sup>·a)),而 NPP 降低区域在范围及强度上均远不及增加,再一次证实流域内生态系统“动力强化”的事实。进一步分析不同阶段 NPP 变化特征可以发现(图 5),2000—2005 年及 2005—2010 年 NPP 的变化较为均衡,增长与减少的比例在 -30~88 gC/(m<sup>2</sup>·a)内均匀分布,且变化面积较接近;2010—2015 年和 2015—2019 年时期 NPP 变化较集中,前者为整体上的增加且大部分区域增幅超 88 gC/(m<sup>2</sup>·a),后者则表现为一致的减少但减幅相对较小。综上可以发现,洞庭湖流域 NPP 在 2000—2019 年呈现较复杂的波动变化,主要原因可能是受流域气候条件的周期性变化,加之退耕还林还草等一系列人类活动的影响,导致研究区植被 NPP 变化出现复杂响应特征。

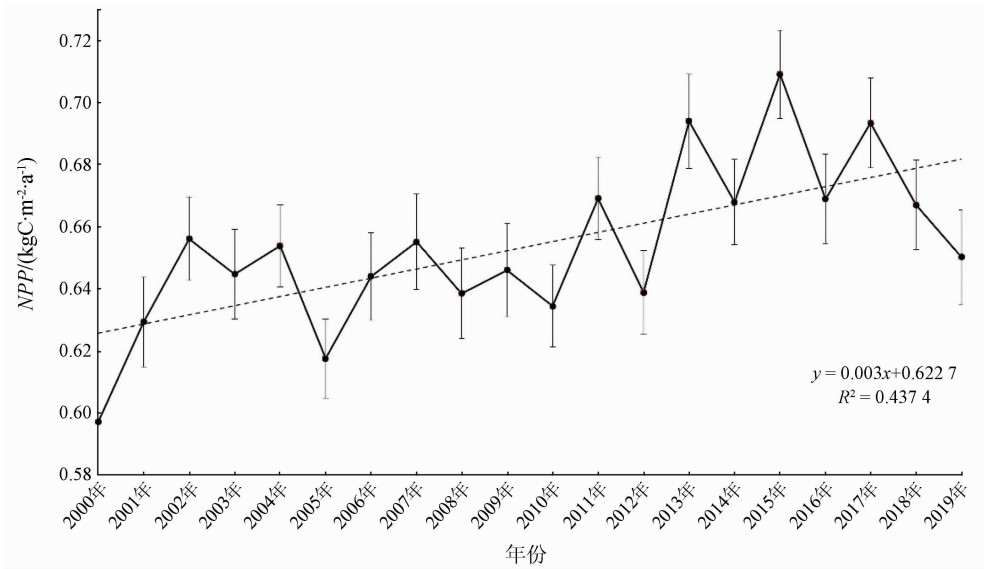
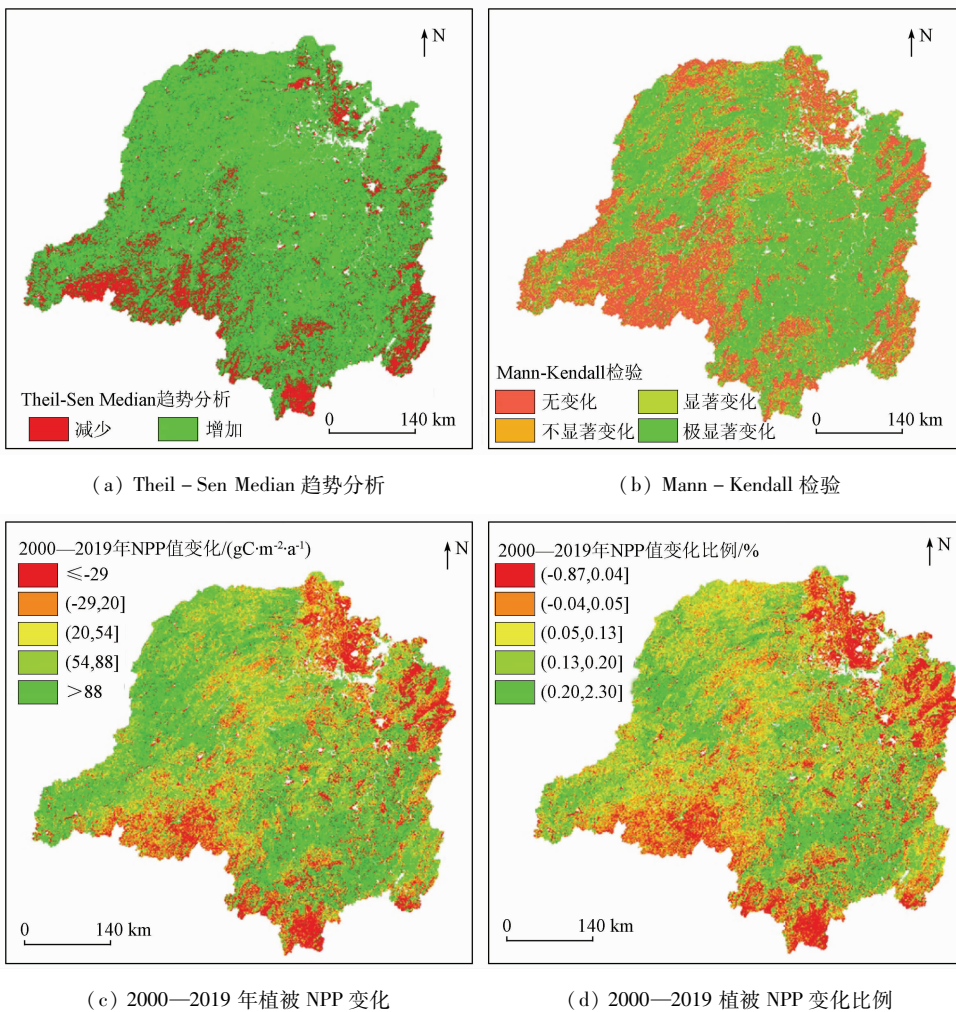


图3 洞庭湖流域 2000—2019 年 NPP 年均值时序变化趋势

Fig. 3 Temporal trend of multi-year average NPP in the Dongting Lake basin from 2000 to 2019



(c) 2000—2019 年植被 NPP 变化

(d) 2000—2019 植被 NPP 变化比例

图4 2000—2019 年洞庭湖流域 NPP 时空变化特征

Fig. 4 Spatial pattern of NPP in the Dongting Lake basin from 2000 to 2019

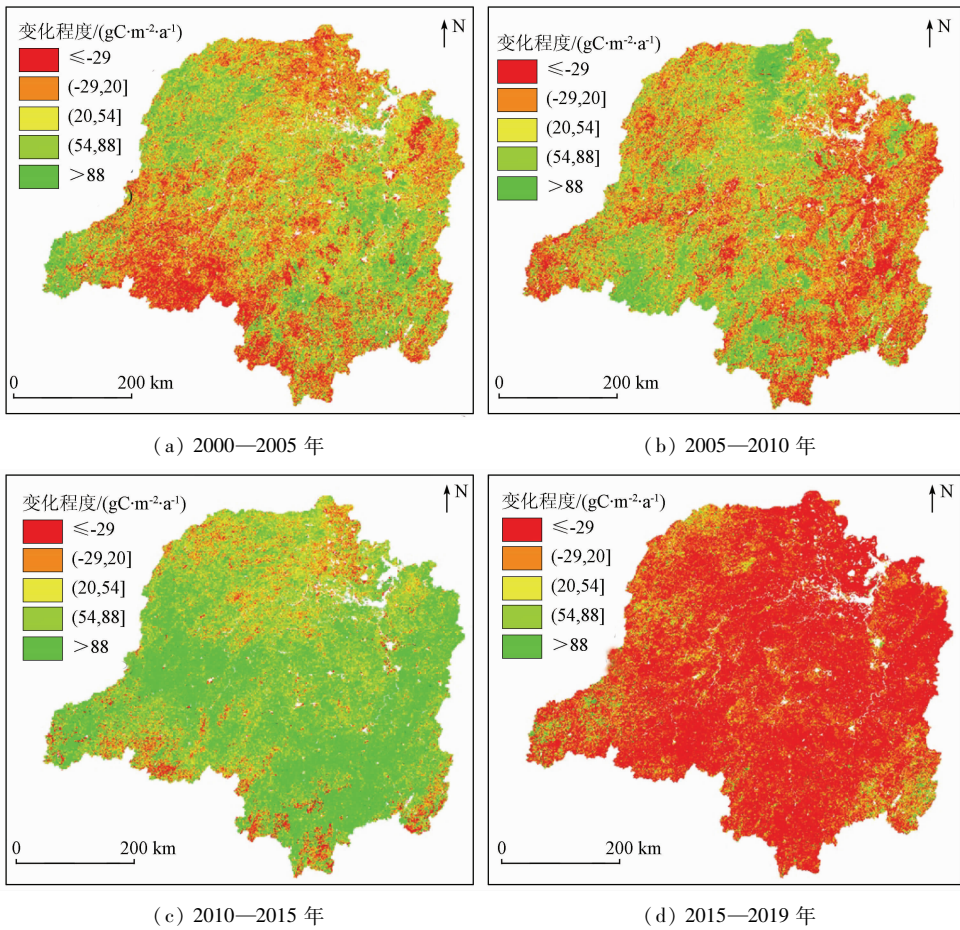


图 5 不同阶段洞庭湖流域 NPP 变化特征

Fig. 5 Patterns of four phases of NPP in the Dongting Lake basin

对洞庭湖流域 NPP 重心分布进行分析(图 6), 2000—2019 年 NPP 重心变化较弱, 迁移距离最长不超过 5.8 km, 总体上呈微弱西移趋势, 不同阶段迁移轨迹较混乱。从方向轴上来讲, 洞庭湖流域 NPP 在东北—西南和垂直向的大小分布更为平衡, 容易

发生重心沿此两轴线的交替变化, 而在西北—东南和水平方向上, NPP 的大小差距大于前面两方向, 故发生此两轴线重心迁移的情况略少; 从迁移距离上来讲, 最远的距离出现在 2018—2019 年和 2003—2004 年, 均超过了 5 000 m, 表明这 2 个时间段洞庭湖该方向轴线上两端 NPP 出现了较大差距, 形成了强拉扯力, 而在 2014—2018 年之间每年 NPP 重心迁移距离都较小, 研究区生态系统内部及环境扰动较小。

### 3.2 植被 NPP 变化驱动因素

采用地理探测器对洞庭湖流域 NPP 时空变化的驱动因子进行探索。结果表明, 土地利用变化对 NPP 时空差异性的解释程度最高( $q = 0.162\ 0$ ), 其次分别为降水( $q = 0.010\ 6$ )、DEM( $q = 0.010\ 5$ )及气温( $q = 0.003\ 22$ )。

土地利用类型及其空间差异性直接决定了 NPP 的时空分布特征。不同用地类型 NPP 统计结果(图 7)表明, 林地 NPP 最高( $0.70\ \text{kgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ), 其次为草地( $0.63\ \text{kgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ )和耕地( $0.55\ \text{kgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ )。虽然各用地类型 NPP 值差异较大, 但其变化趋势较为一致, 均呈较显著上升趋势, 其中草地的 NPP 增

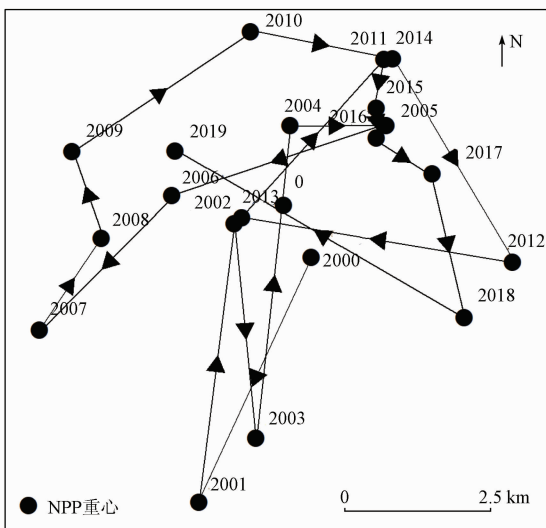


图 6 洞庭湖流域 2000—2019 年 NPP 重心迁移规律

Fig. 6 Migration of center of the gravity of NPP in the Dongting Lake basin from 2000 to 2019

长速率最快,约为林地增长速率的 2 倍,而耕地介于 两者之间。

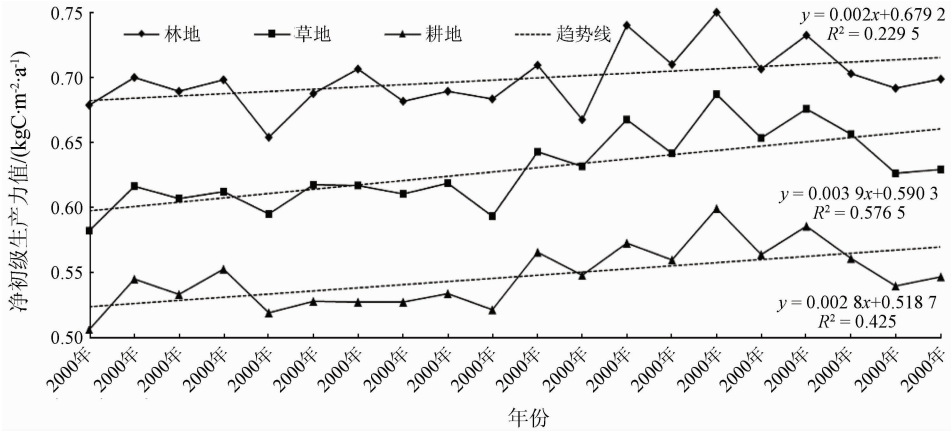
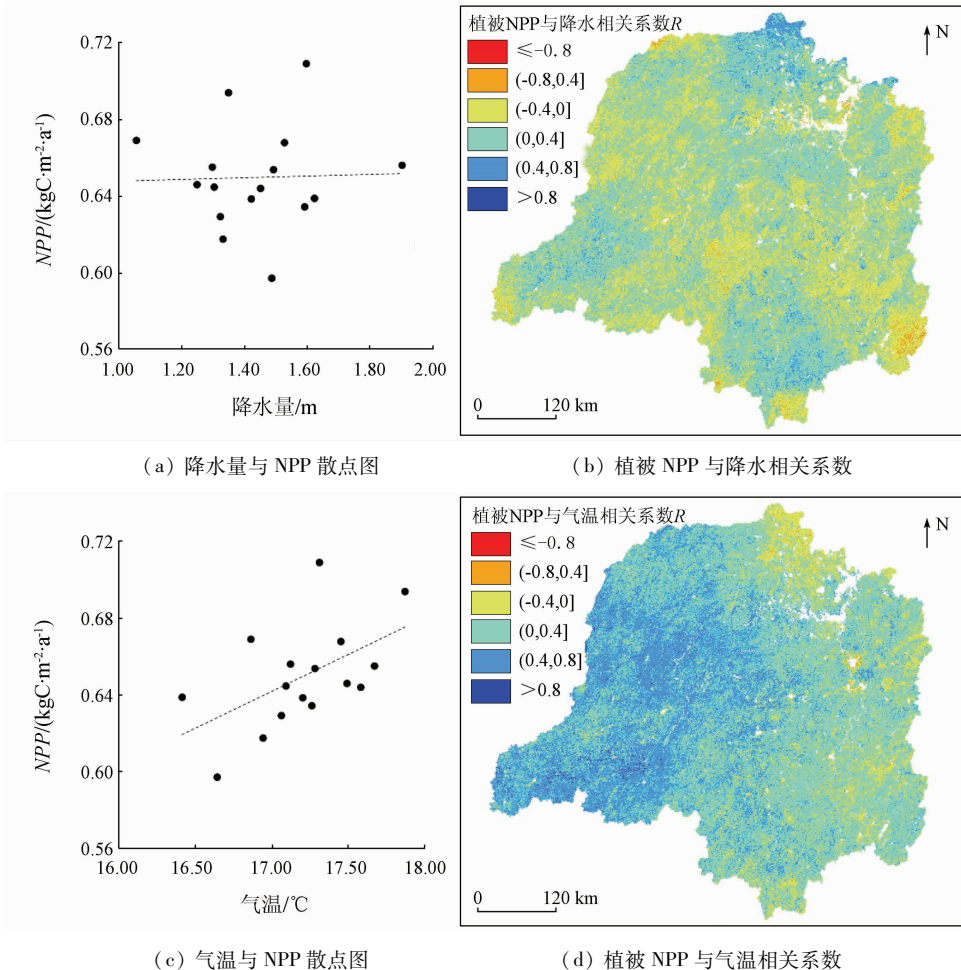


图 7 洞庭湖流域 2000—2019 年不同地类 NPP 年均值时序变化趋势

Fig. 7 Trends of NPP of different land use types in the Dongting Lake basin from 2000 to 2019

气温、降水等气象因素是影响植被光合作用的决定性条件,相关性分析研究结果表明(图 8(a)和(c))气温对 NPP 的影响更加显著,该流域内植被 NPP 受到降水量的限制微弱。进一步分析气象条件与 NPP 相互关系的空间特征(图 8(b)和(d)),可以发现,气温在更大的范围内与 NPP 呈正相关(约占

研究区面积 33.49%),尤其是西部林地地区;降水与 NPP 的空间相关性相对较弱,主要原因可能是对于位于降水充沛的长江中下游的洞庭湖流域而言,过多的降水天气导致的太阳辐射减少或水量过于丰沛反而抑制了植被的光合作用<sup>[9]</sup>。



(a) 降水量与 NPP 散点图

(b) 植被 NPP 与降水相关系数

(c) 气温与 NPP 散点图

(d) 植被 NPP 与气温相关系数

图 8 降水、气温与植被 NPP 相关性及其空间异质性

Fig. 8 Scatters and Pearson's correlation coefficient of precipitation and temperature with vegetal NPP

地形条件对于植被类型分布具有较大影响,同时不同下垫面特征也会对气象条件产生一定的间接作用,进而影响区域 NPP 分布特征。分析不同采样尺度下(1 km,10 km,50 km,100 km)高程与 NPP 的时空相关性(图 9),发现两者均具有显著的正相关性,主要原因是洞庭湖流域地处丘陵地带,平原地带

以耕地为主,而山坡则为林地为主。进一步统计结果表明,研究区内高生产力( $>1.50 \text{ kgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ )植被主要生长于 0.6~0.9 km 间,中等生产力( $0.2 \sim 1.5 \text{ kgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ )植被广泛分布于 0.3~0.6 km 之间,较低生产力( $<0.2 \text{ kgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ )植被则存在于低海拔地区。

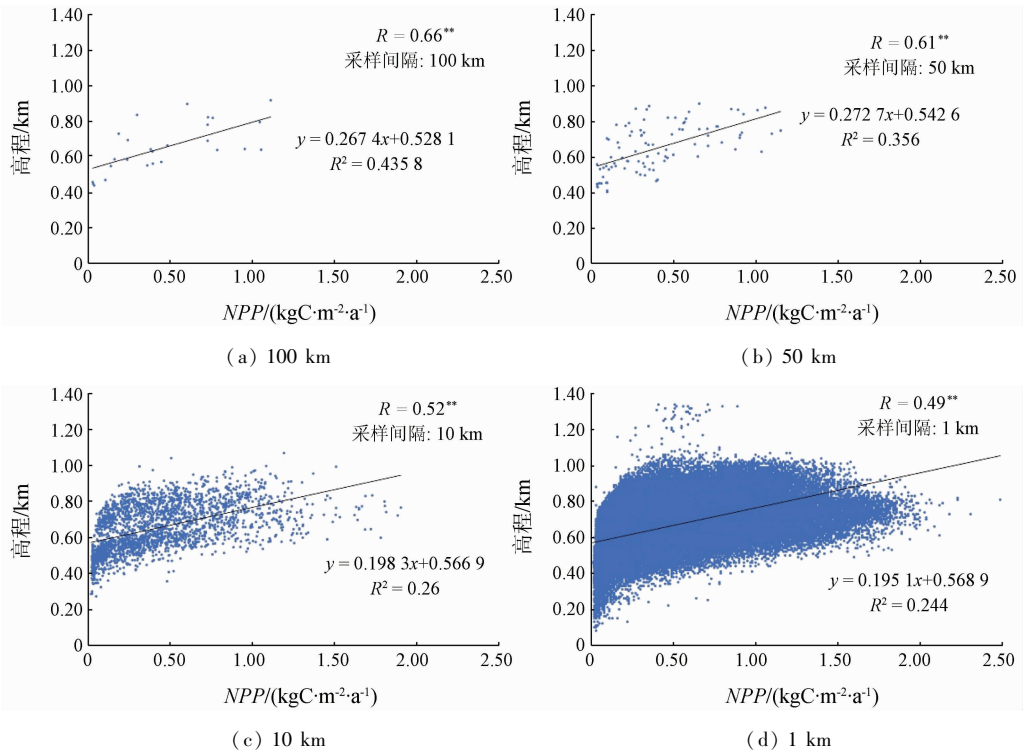


图 9 洞庭湖流域高程与 NPP 不同尺度采样散点图

Fig.9 Scatters of DEM and NPP at four sampling intervals in the Dongting Lake basin at different scales

### 3.3 多因子交互作用

进一步探讨不同因子对研究区 NPP 影响的交互作用,结果表明,洞庭湖流域 NPP 各因子间主要表现为双因子增强或非线性增强,其中降水—土地利用、气温—土地利用、降水—气温、高程—气温组合呈现较显著的非线性增强特征,而土地利用—高

程和降水—高程则为双因子增强及非线性增强交替出现(图 10)。已有大量研究表明,作为气象系统中的重要参数,降水与气温间存在复杂的交互作用与反馈关系<sup>[21]</sup>。此外,土地利用变化作为地—气交互作用的重要因子,通过改变下垫面特征,对区域能量平衡与水文循环产生重要影响,进而影响区域与局

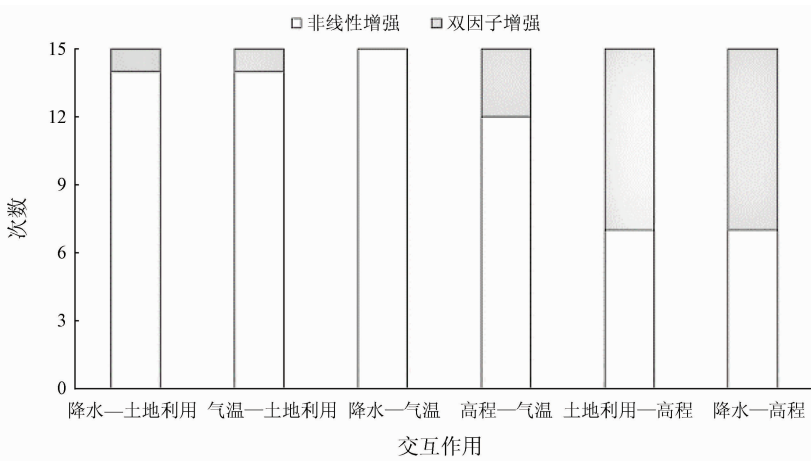


图 10 不同因子的典型交互作用统计

Fig.10 Statistics on the typical interactions of driving factors



地气象特征,并对 NPP 产生复杂的非线性叠加作用<sup>[22]</sup>。洞庭湖流域地形多山地丘陵、地貌多元,不同高程分布的优势植被差异显著,此外,不同地形地势条件对空气动力学特征也具有较强影响,从而影响区域气象条件。然而,相对于其他因子而言,地形特征变化较小,其长时序非线性加强相对较弱,导致其与其他因子的交互作用较多呈现双因子增加特征。上述多因子交互作用的研究结果有助于正确认识研究区植被 NPP 变化的内在机理,并为相关生态治理与规划提供科学的辅助依据,由于地理系统的复杂性特征,其交互作用的物理机制尚须进一步深入研究。

## 4 讨论

综上,在全球气候变化及区域人类活动等多因子复杂交互作用下,2000—2019 年间洞庭湖流域植被 NPP 呈现复杂的时空变化特征,对上述结果开展进一步分析,可以发现:

洞庭湖流域植被 NPP 的时间特征表现为波动上升的态势,表明在经历了一系列“退耕还林还草”等生态修复措施后,研究区植被生产力得到逐步提升,为促进区域生态系统可持续发展奠定了较好基础。另一方面,区域生态修复效果具有明显的空间异质性,NPP 增长区域主要位于中部地势平坦地区,该区域主要为洞庭湖农业生产区,在地方政府的高度重视下,其生态系统服务价值得到较大的恢复与改善。然而,对于周边丘陵林地区域,NPP 增长并不明显甚至出现一定的退化现象(如西南部武陵山片区等),未来需要进一步加强对森林区域的保护力度,避免森林质量退化导致的植被生产力减弱的风险。

洞庭湖流域植被 NPP 时空演化的影响因子较多,本文结果表明其主导驱动因子主要包括土地利用、降水、高程和气温。土地利用直接反映了植被类型及其时空分布特征,因而对流域 NPP 起到决定性作用。其他地形、气象因素等则通过影响植被光合作用方式与强度,直接影响了 NPP 总量。根据地理探测器分析结果,降水与高程对洞庭湖流域 NPP 的贡献特征较强,表明在亚热带湿润区的典型丘陵地带,水分与地形特征是区域植被生产力的主导外部因素。气温对洞庭湖流域植被 NPP 的贡献特征相对较小,表明在降水、地形等诸多因素的影响下,气温对植被光合作用的影响受到一定程度的削弱,其内在关联机制还有待于进一步野外实验监测予以解释与验证。

此外,不同因素对 NPP 的影响还存在较显著的交互作用,主要表现为“降水—土地利用”、“气温—土地利用”、“降水—气温”、“高程—气温”等因子间的非线性增强特征以及“土地利用—高程”和“降水—高程”等双因子增强。已有诸多研究表明,土地利用与气象条件间具有显著的交互作用。一方面,气象条件是影响植被长势等关键外部因素;另一方面,土地利用变化过程通过改变下垫面特征,强烈改变了“地—气”界面水热交互通量,从而对不同尺度气象特征产生显著影响<sup>[23-24]</sup>。此外,气象条件与高程间的交互作用主要体现在随着海拔不断变化,其气压、温度、大气水汽等关键参数差异较大,从而对气象条件产生显著影响<sup>[25]</sup>;同时,地形条件改变了下垫面粗糙程度,对风场具有较强影响,从而间接影响了温度与降水的形成过程<sup>[26]</sup>。上述结果表明,植被 NPP 成因机制具有显著的复杂性,任何单一因子均难以完全解释 NPP 时空演化的内在原因,从而为区域植被生产力成因分析与监测评估带来了极大难度,亟待进一步深入研究。

## 5 结论

本文针对长江中下游洞庭湖流域 2000—2019 年显著的植被变化特征,采用长时序遥感数据,系统分析了 NPP 时空变化特征及其内在影响因素,为理解流域植被变化、指导开展合理的生态治理与土地规划管理提供科学的辅助依据,主要结论有:

1) 2000—2019 年洞庭湖流域植被 NPP 多年均值为  $0.65 \text{ kgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , 高值区域主要分布在流域西部及南部,而低值区域主要位于洞庭湖附近;流域内植被多年平均 NPP 主要位于  $0.44 \sim 0.96 \text{ kgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  区间内,占据了整体的 91.26%,相对于其他地区处于较高生产力水平。

2) 2000—2019 年,洞庭湖流域植被 NPP 发展变化较为稳定,且表现为上升趋势( $y = 0.003x + 0.6227, R^2 = 0.437, p < 0.001$ ); 2019 年相对于 2000 年,在洞庭湖流域东北及西南边缘植被 NPP 发生了较为明显的下降,而其他区域主要表现为不同程度的增长。植被 NPP 重心在流域内接近几何中心的位置,表明流域内植被 NPP 的分布较为均衡。

3) 洞庭湖流域植被 NPP 总体上受气象因素(尤其是气温)影响较显著,但 NPP 空间特征则主要受土地利用影响较大,其次是降水、高程;显著的 2 个因子交互作用中主要为非线性增强,少量为双因子增强,在生态恢复工作中应根据该特性发挥因子的

协同影响效应,实现高效率改善。

未来研究将进一步量化分析不同因素对研究区植被 NPP 变化的贡献率,并基于不同气候变化背景及人工干预条件下,开展流域 NPP 未来情景预测研究,以期客观揭示洞庭湖流域植被变化规律,更好地服务于区域生态规划,促进人与自然和谐发展。

## 参考文献 (References):

- [1] 梁顺林,李小文,王锦地. 定量遥感:理念与算法[M]. 北京:科学出版社,2013.  
Liang S L, Li X W, Wang J D. Quantitative remote sensing: Concepts and algorithms [M]. Beijing: Science Publishing Company, 2013.
- [2] 李登科,王 钊. 基于 MOD17A3 的中国陆地植被 NPP 变化特征分析[J]. 生态环境学报,2018,27(3):397-405.  
Li D K, Wang Z. The characteristics of NPP of terrestrial vegetation in China based on MOD17A3 data[J]. Ecology and Environmental Sciences,2018,27(3):397-405.
- [3] 王 莺,夏文韬,梁天刚. 陆地生态系统净初级生产力的时空动态模拟研究进展[J]. 草业科学,2010,27(2):77-88.  
Wang Y, Xia W T, Liang T G. Research progress on spatial-temporal dynamic simulation model of net primary productivity of terrestrial ecosystems[J]. Pratacultural Science,2010,27(2):77-88.
- [4] 周 珺. 基于遥感数据的重庆市净初级生产力(NPP)时空特征研究[D]. 重庆:西南大学,2013.  
Zhou J. Spatial and temporal characteristics of net primary productivity (NPP) in Chongqing based on remote sensing data[D]. Chongqing: Southwest University,2013.
- [5] 朱文泉,潘耀忠,张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J]. 植物生态学报,2007,31(3):413-424.  
Zhu W Q, Pan Y Z, Zang J S. Remote sensing estimation of net primary productivity of terrestrial vegetation in China[J]. Journal of Plant Ecology,2007,31(3):413-424.
- [6] Pan S F, Tian H Q, Danggal S, et al. Modeling and monitoring terrestrial primary production in a changing global environment: Toward a multiscale synthesis of observation and simulation[J]. Advances in Meteorology,2014,6426:1-14.
- [7] 焦 伟,陈亚宁,李 稚. 西北干旱区植被净初级生产力的遥感估算及时空差异原因[J]. 生态学杂志,2017,36(1):181-189.  
Jiao W, Chen Y N, Li Z. Remote sensing estimation of net primary productivity of vegetation in arid area of Northwest China and its spatio-temporal differences [J]. Chinese Journal of Ecology, 2017,36(1):181-189.
- [8] Robinson N P, Allred B W, Smith W K, et al. Terrestrial primary production for the conterminous United States derived from Landsat 30 m and MODIS 250 m[J]. Remote Sensing in Ecology and Conservation,2018,4(3):264-280.
- [9] 杨允菲,祝廷成. 植物生态学(第2版)[M]. 北京:高等教育出版社,2011.  
Yang Y F, Zhu T C. Plant ecology (2nd Ed.) [M]. Beijing: Higher Education Press,2011.
- [10] Grosso S D, Parton W, Stohlgren T, et al. Global potential net primary production predicted from vegetation class precipitation and temperature[J]. Ecology,2010,89(8):2117-2126.
- [11] 刘 凤,曾永年. 近16年青海高原植被 NPP 时空格局变化及气候与人为因素的影响[J]. 生态学报,2019,39(5):1528-1540.  
Liu F, Zeng Y N. Spatial-temporal change in vegetation net primary productivity and its response to climate and human activities in Qinghai Plateau in the past 16 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(5):1528-1540.
- [12] 徐雨晴,肖风劲,於 琨. 中国森林生态系统净初级生产力时空分布及其对气候变化的响应研究综述[J]. 生态学报,2020,40(14):4710-4723.  
Xu Y Q, Xiao F J, Yu L. Forest ecosystem net primary productivity and its response to climate change in China: A review [J]. Acta Ecologica Sinica,2020,40(14):4710-4723.
- [13] 刘旻霞,焦 骄,潘竟虎,等. 青海省植被净初级生产力(NPP)时空格局变化及其驱动因素[J]. 生态学报,2020,40(15):5306-5317.  
Liu M X, Jiao J, Pan J H, et al. Spatial and temporal patterns of planting NPP and its driving factors in Qinghai Province[J]. Acta Ecologica Sinica,2020,40(15):5306-5317.
- [14] 潘瑞焱,董愚得. 植物生理学[M]. 北京:高等教育出版社,1979.  
Pan R C, Dong Y D. Plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press,1979.
- [15] 张其德. 温度对植物光合作用的影响[J]. 植物杂志,1989(3):28-30.  
Zhang Q D. Effects of temperature on photosynthesis in plants[J]. The Plant Journal,1989(3):28-30.
- [16] 张雪萍. 生态学原理[M]. 北京:科学出版社,2011.  
Zhang X P. Principles of ecology[M]. Beijing: Science Publishing Company,2011.
- [17] 黄怀勇,杜国铨,范蔚茗,等. 全流域蓄水与洞庭湖蓄洪能力[J]. 世界科技研究与发展,2020(s1):42-44.  
Huang H Y, Du G Q, Fan W M, et al. Water storage and flood storage capacity of Dongting Lake[J]. World Science and Technology Research and Development,2020(s1):42-44.
- [18] 刘 恒,汤弟伟,宋鄂平,等. 2000—2015年武陵山区植被净初级生产力的时空动态特征及其驱动因子[J]. 水土保持研究,2020,143(6):224-231.  
Liu H, Tang D W, Song E P, et al. Temporal and spatial dynamics of vegetation net primary productivity and its driving factors in Wuling Mountain area from 2000 to 2015[J]. Research of Soil and Water Conservation,2020,143(6):224-231.
- [19] 陈舒婷,郭 兵,杨 飞,等. 2000—2015年青藏高原植被时空变化格局及其对气候变化的响应[J]. 自然资源学报,2020,35(10):2511-2527.  
Chen S T, Guo B, Yang F, et al. Temporal and spatial patterns of vegetation and its response to climate change in the Tibetan Plateau during 2000—2015 [J]. Journal of Natural Resources, 2020,35(10):2511-2527.
- [20] 王劲峰,徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报,2017,72(1):116-134.  
Wang J F, Xu C D. Geodetectors: Principles and prospects [J].

- Journal of Geographical Sciences, 2017, 72(1): 116–134.
- [21] 孟凡超, 郭军, 周莉, 等. 气温、浓度和降水交互作用对作物生长和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(12): 4117–4126.  
Meng F C, Guo J, Zhou L, et al. Effects of precipitation and concentration on crop growth and yield[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(12): 4117–4126.
- [22] Feng H H, Liu Y B, et al. Combined effects of precipitation and air temperature on soil moisture in different land covers in a humid basin[J]. Journal of Hydrology, 2015, 531: 1129–1140.
- [23] Feng H H, Zou B. A greening world enhances the surface–air temperature difference[J]. Science of the Total Environment, 2019, 658: 385–394.
- [24] Feng H H, Zou B, Luo J. Coverage–dependent amplifiers of vegetation change on global water cycle dynamics[J]. Journal of Hydrology, 2017, 550: 220–229.
- [25] 孙杰, 范士杰, 臧建飞, 等. 3种全球气压与温度模型的精度对比分析[J]. 测绘科学, 2018, 43(9): 63–67, 75.  
Sun J, Fan S J, Zang J F, et al. Comparative analysis of accuracy of three global pressure and temperature models[J]. Science of Surveying and Mapping, 2018, 43(9): 63–67, 75.
- [26] 邓院昌, 刘沙, 余志, 等. 实际地形风场 CFD 模拟中粗糙度的影响分析[J]. 太阳能学报, 2010(12): 1644–1648.  
Deng Y C, Liu S, Yu Z, et al. Effect analysis of roughness in CFD simulation of real terrain wind field[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2010(12): 1644–1648.

## Spatial–temporal characteristics of 2000—2019 vegetation NPP of the Dongting Lake basin and their driving factors

ZHU Sijia, FENG Huihui, ZOU Bin, YE Shuchao

(School of Geosciences and Info–Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The net primary productivity (NPP) of vegetation is a vital indicator for assessing a basin ecosystem. Based on a long time series of NPP data of 2000—2019 from a moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS), this study analyzed the spatio–temporal variations in the vegetation NPP of the Dongting Lake basin in the past 20 years. Then, it revealed the influence characteristics and contribution of driving factors (e. g., meteorology and ground surface) on the vegetation NPP of the study area using methods including the GIS spatio–temporal analysis and GeoDetector. The results are as follows. ① The NPP values in the study area have an average of  $0.65 \text{ kgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , with high values mainly distributed in the west and south of the basin and low values concentrated near the lake. ② During 2000—2019, the vegetation NPP of the Dongting Lake basin presented a slightly rising trend ( $y = 0.003x + 0.6227$ ,  $R^2 = 0.437$ ,  $p < 0.001$ ). It increased in the northwest and south–central parts and decreased in the northeast and southwest boundaries, and its center of gravity slightly shifted. ③ The changes in the vegetation NPP of the Dongting Lake basin was significantly affected by meteorological factors (especially temperature). By contrast, its spatial characteristics were mainly affected by land use, followed by precipitation and DEM. In addition, the results suggested significant interactions between different factors, which was mainly reflected by the bi–factor enhancement (DEM and land use, or DEM and precipitation) and nonlinear enhancement (temperature and precipitation, land use and DEM, and precipitation and land use). The conclusions of this study help to correctly understand and grasp the spatio–temporal characteristics of the vegetation NPP of the Dongting Lake basin and their internal influencing mechanisms, thus providing a scientific basis for the management and governance of the ecosystem in the basin.

**Keywords:** Dongting Lake basin; vegetation NPP; spatio–temporal characteristics; driving factor

(责任编辑: 李瑜)