



环境科学
Environmental Science
ISSN 0250-3301, CN 11-1895/X

《环境科学》网络首发论文

题目： 基于空间尺度效应的西南地区植被 NPP 影响因子探测
作者： 徐勇，黄雯婷，郑志威，戴强玉，李欣怡
DOI： 10.13227/j.hjcx.202203254
收稿日期： 2022-03-27
网络首发日期： 2022-06-23
引用格式： 徐勇，黄雯婷，郑志威，戴强玉，李欣怡. 基于空间尺度效应的西南地区植被 NPP 影响因子探测[J/OL]. 环境科学.
<https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202203254>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于空间尺度效应的西南地区植被NPP影响因子探测

徐勇, 黄雯婷, 郑志威, 戴强玉, 李欣怡

(桂林理工大学测绘地理信息学院, 桂林 541006)

摘要: 植被净初级生产力(NPP)是评价陆地生态系统质量的重要参数, 研究植被 NPP 时空演变特征及其驱动力对区域生态环境保护 and 可持续发展具有重大意义。基于 MODIS NPP 数据、气象数据、DEM 数据、人口密度数据、GDP 数据和土地利用类型数据, 采用一元线性回归分析、R/S 分析和地理探测器模型, 分析西南地区及其六大地貌单元植被 NPP 时空演变特征及未来变化趋势, 探究植被 NPP 空间分异的影响因子。结果表明, 2000~2020 年西南地区植被 NPP 整体呈极显著上升趋势。地貌单元中, 除青藏高原南部外, 其余地貌单元植被 NPP 均表现为改善态势, 其中四川盆地和云贵高原表现为极显著改善。西南地区的植被 NPP 变化斜率整体呈现“东高西低”的分布格局。西南地区及各地貌单元植被 NPP 呈上升趋势的区域面积均大于呈下降趋势的区域面积, 但未来植被 NPP 变化趋势均以下降为主。地理探测器结果表明, 除云贵高原植被 NPP 空间分异主要受气温影响外, 海拔是西南地区及各地貌单元植被 NPP 空间分异的主导因子。交互探测结果表明, 影响因子之间的交互作用均表现为双因子增强或非线性增强, 其中, 海拔 \cap 温度对西南地区植被 NPP 空间分异的解释力最大。地貌单元中, 广西丘陵、四川盆地、若尔盖高原、横断山地和青藏高原南部植被 NPP 空间分异主要受海拔与气象因子或 GDP 的交互作用, 云贵高原主要受气象因子之间的交互作用。综上可知, 西南地区植被 NPP 变化及驱动其空间分异的影响因子均表现出明显的空间尺度效应, 因此, 在不同空间尺度上探究植被 NPP 动态变化及其影响因子对全面了解西南地区植被覆盖状况, 因地制宜制定生态修复方案具有重要的现实意义。

关键词: 西南地区; 植被净初级生产力; 地理探测器; 影响因子; 空间尺度效应

DOI:10.13227/j.hjcx.202203254

Detecting Influencing Factor of Vegetation NPP in Southwest China Based on Spatial Scale Effect

XU Yong, HUANG Wen-ting, ZHENG Zhi-wei, DAI Qiang-yu, LI Xin-yi

(College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China)

Abstract: Vegetation net primary productivity (NPP) is an important parameter for evaluating the quality of terrestrial ecosystems. It is of great importance to study the spatio-temporal evolution of vegetation NPP and its driving force for regional ecological environment protection and sustainable development. On the basis of MODIS NPP data, meteorological data, DEM data, population density data, GDP data, and land use type data, this paper uses linear regression analysis, R/S analysis, and Geodetector model to analyze the spatio-temporal variation of vegetation NPP and its future changing trend both on regional and landform scales, and to detect the influencing factors that affects the spatial differentiation of vegetation NPP. Result show that the vegetation NPP exhibited an extremely significant upward trend in southwest China from 2000 to 2020. On landform scale, the vegetation NPP had showed an upward trend in all landforms, except for southern Tibet Plateau, among them, the vegetation NPP in the Sichuan Basin showed the most obvious upward trend. The variation of vegetation NPP exhibited obvious spatial heterogeneity in southwest China, with the changing rate “high in the east and low in the west”. The areas

收稿日期: 2022-03-27; 修订日期: 2022-05-06

基金项目: 广西自然科学基金项目(2020GXNSFBA297160); 广西科技基地和人才专项(桂科AD21220133); 国家自然科学基金项目(42061059, 42161028); 广西空间信息与测绘重点实验室项目(191851016)

作者简介: 徐勇(1988~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为气候变化和植被覆盖反演, E-mail: yongxu@glut.edu.cn

with an upward trend of vegetation NPP are greater than the areas with a downward trend, but the changing trend is dominated by a decreasing trend in the future both in southwest China and each landform unit. The results of Geodetector show that elevation was the dominant factor controlling the spatial differentiation of vegetation NPP in southwest China and all landform units, except for the Yunan-Guizhou Plateau, in which the spatial differentiation of vegetation NPP was mostly dominated by temperature. Interaction detection result show that the interaction between the influencing factors was manifested as two-factor enhancement or nonlinear enhancement. The interaction between elevation and temperature showed the highest impact on vegetation NPP distribution. On landform scale, the spatial differential of vegetation NPP was dominated by the interaction between elevation and climate factors or elevation and GDP in the Guangxi Hills, Sichuan basin, Zoige Plateau, Hengduan Mountains, and southern Tibet Plateau and between climate factors in the Yunan-Guizhou Plateau. Above results indicate that vegetation NPP variation and the influencing factors that dominates its spatial differential in southwest China show obvious scale effects. Therefore, exploring the dynamic variation of vegetation NPP and its influencing factors at different spatial scales has practical significance for comprehensive understanding of vegetation cover situation and formulating regional ecological restoration plans in southwest China.

Key word: southwest China; vegetation net primary productivity; Geodetector; influencing factor; spatial scale effect

植被净初级生产力 (net primary production, NPP) 指绿色植物在单位时间和单位面积上积累的有机碳总量, 可以有效指征植被群落的生长活力和生产能力^[1-3], 其变化不仅对全球及区域生态系统能量循环和物质的生物化学循环具有重要的影响^[4-6], 同时也可以在一定程度上体现气候变化和人类社会经济活动对陆地植被生态系统的影响^[7-9]。植被 NPP 在研究区域乃至全球气候变化和陆地生态系统演变中起着至关重要的作用。在全球尺度上, 国际生物圈计划、世界气候研究计划、国际地圈-生物圈计划和京都协定书均强调了研究植被 NPP 时空演变特征的重要性^[10-12]。我国也致力于推进全球生态文明建设, 植被 NPP 作为区域生态环境质量的指示器成为重要研究主题。

近年来, 国内外学者在植被 NPP 变化及其影响因子探究方面开展了大量研究并取得了丰硕成果。Liu 等^[13]研究表明全球尺度上植被 NPP 与干旱指数的相关性在干旱区和半干旱区强于半湿润区和湿润区, 澳大利亚东南部、非洲中部和俄罗斯南部的落叶针叶林和封闭式灌木丛对干旱的响应更加敏感。Brouwers 等^[5]研究发现澳大利亚西南部林地 NPP 呈下降趋势, 下降区域主要集中在林地和灌木的生态过渡带, 且固碳潜力随着林地到灌木的转换而降低。在全国范围内, Ge 等^[9]研究表明气候变化和人类活动对植被 NPP 增长均具有促进作用, 干旱区和半干旱区植被 NPP 变化主要受降水的影响, 而高原植被 NPP 变化主要受气温主导, 农业活动和退耕还林工程是植被覆盖状况整体好转的重要原因。Yang 等^[14]、Zhang 等^[15]、刘旻霞等^[16]和 Ren 等^[17]从省级行政区尺度上分别对安徽、甘肃、青海和内蒙古植被 NPP 时空分布及其影响因子进行了研究, 植被 NPP 变化主要受气候变化和人类活动的共同影响, 且影响机制存在明显的地域差异。

针对西南地区植被 NPP 变化及其影响因子方面的研究也有所成果。茆杨等^[18]研究发现西南地区植被 NPP 整体呈上升趋势, 温度是影响植被 NPP 变化的主导气象因子, 土地利用类型之间的转变对区域植被 NPP 具有双向影响。Yan 等^[7]研究发现人类扰动是导致若尔盖高原湿地植被 NPP 下降的重要原因。Song 等^[19]研究表明人类活动对贵州省植被 NPP 变化的影响高于气象因子和地形因子。孙治娟等^[20]研究表明气象因子对云南省植被 NPP 的影响强于地形因子, 而海拔对植被 NPP 的影响强于坡度。综上可知, 植被 NPP 的空间分布差异及动态变化主要受区域气候条件、地形条件和人类活动的共同作用。在长期内, 水、热和光等气象条件的地域性差异导致植被 NPP 呈现明显的时空差异; 在短期内, 人类活动的加强或

者减弱可以影响区域植被群落的活力进而影响植被生态系统的演替进程。西南地区地形结构错综复杂，地形地貌、气候条件和人类活动迥异，使得该地区植被 NPP 演变特征及其影响机制在不同地貌单元中具有较大差异^[21,24]。已有研究表明植被生长与影响因子的关系存在明显的尺度效应^[25,27]，但现有研究侧重于在单一空间尺度开展，西南地区及不同地貌单元的植被 NPP 变化及其影响因子仍缺少系统研究。

因此，本文在从不同空间尺度分析西南地区植被 NPP 时空演变特征及其未来变化特征的基础上，引入地理探测器模型定量探究地形因子（海拔、坡度、坡向）、气象因子（温度、降水量、日照时数、相对湿度）、人文因子（人口密度、GDP）和土地利用类型对西南地区及不同地貌单元植被 NPP 空间分异的影响，以期为准确把握西南地区生态系统动态演变过程，因地制宜实施生态建设工程提供数据支撑。

1 研究区概况

西南地区（20°54′~36°53′N、78°25′~112°04′E）即云南、贵州、四川、广西、西藏和重庆，总面积约 260.47 万 km²。该区海拔跨度从-20~8405m，地势自西向东逐渐降低。区域地形复杂，依据地貌类型可划分为广西丘陵、云贵高原、四川盆地、若尔盖高原、横断山地和青藏高原南部这 6 个地貌单元（图 1）。受地理位置、复杂地形和季风环流的影响，西南地区气候类型多样，以热带季风气候、亚热带季风气候和青藏高原特有的高原山地气候为主，水热条件时空分布不均，多年平均降水在 19~2689mm 之间，多年平均温度在 1~29°C 之间，皆呈现为自东南向西北梯度递减的趋势，多年平均相对湿度在 32%~86% 之间，多年平均日照时数在 844~3338h 之间。植被资源丰富，巨大的地形和气候差异造就了西南地区独特的“高-中-低海拔梯度”植被分布格局，其中高海拔地区以高山植被、草原和草甸为主，中海拔地区以针叶林、阔叶林、灌丛和沼泽为主，低海拔地区以栽培植被和草丛为主。

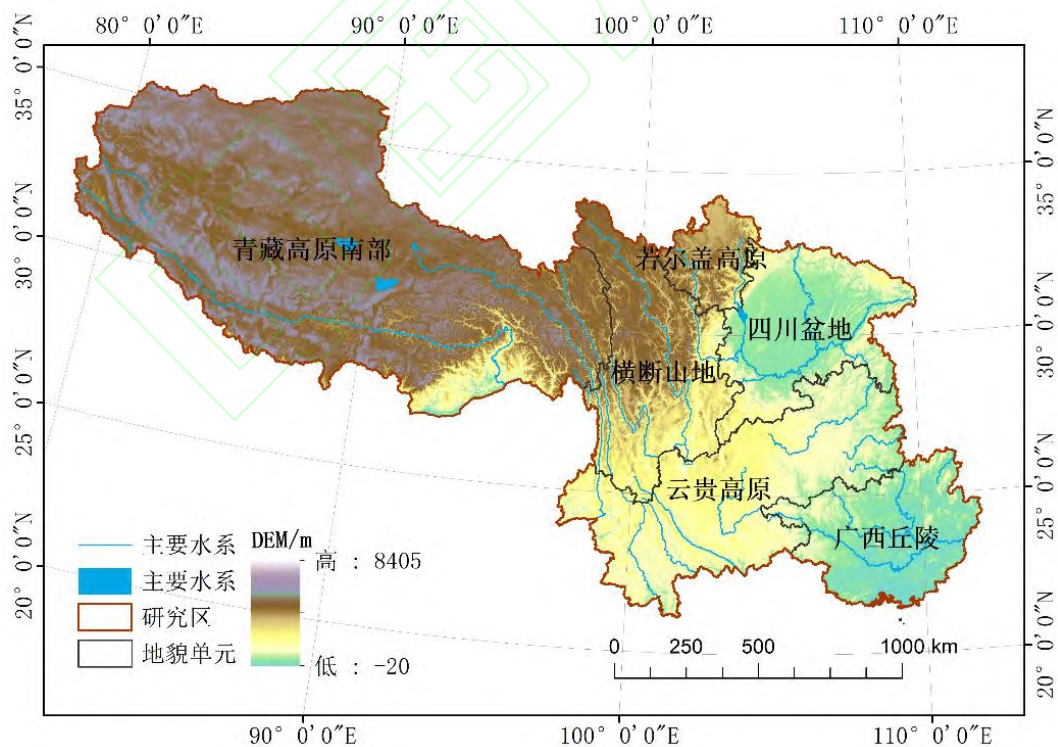


图 1 研究区概况示意

Fig. 1 Location of study area

2 材料与方方法

2.1 数据来源

植被 NPP 数据获取于美国国家航空航天局 (<http://lpdaac.usgs.gov>) 发布的陆地观测产品 MOD17A3, 时间跨度为 2000~2020 年, 时间分辨率为 1a, 空间分辨率为 500m。通过对数据进行拼接、格式转换、重采样、投影变换和裁剪等处理, 得到空间分辨率为 1km 的 2000~2020 年西南地区植被 NPP 时间序列。气象数据使用国家气象科学数据中心 (<http://data.cma.cn>) 提供的全国 2416 个气象站点 2000~2020 年的逐日数据, 包括气温、降水、相对湿度和日照时数, 利用 ANUSPLIN 插值得到时间分辨率、空间分辨率和投影与植被 NPP 时间序列相同的栅格数据, 通过掩膜提取得到覆盖西南地区的气象因子时间序列。DEM 数据、2010 年土地利用数据、2010 年人口密度和 2010 年 GDP 数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>), 空间分辨率为 1km。坡度和坡向数据由 DEM 数据派生得到, 空间分辨率都为 1km。

2.2 研究方法

2.2.1 一元线性回归和 F 检验

一元线性回归^[28]可用于拟合变量在时间上的变化趋势和变化幅度, 被广泛应用于气象、水文等研究领域。本文利用一元线性回归法探究西南地区植被 NPP 的年际变化趋势及空间演变特征, 计算公式如下:

$$\text{slope} = \frac{n \sum_{i=1}^n i x_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中, n 为研究总年数 ($n=21$, 即 2000~2020 年); x_i 为第 i 年的植被 NPP 值。slope 为植被 NPP 变化斜率: 当 $\text{slope} > 0$ 时, 表示植被 NPP 在研究时段内表现为上升趋势; 当 $\text{slope} = 0$ 时, 表示植被 NPP 在研究时段内较为稳定; 当 $\text{slope} < 0$ 时, 表示植被 NPP 在研究时段内表现为下降趋势。slope 的绝对值越大, 植被 NPP 变化幅度越明显。本文采用 F 检验法^[29]对植被 NPP 变化趋势进行显著性检验, 并根据检验结果分成极显著变化 ($P < 0.01$)、显著变化 ($0.01 \leq P < 0.05$) 和不显著变化 ($P \geq 0.05$) 这 3 个等级。

2.2.2 R/S 分析

R/S 分析即重标极差分析法(rescaled range analysis), 最早由英国水文学家 Hurst 提出, 通常用于分析时间序列的分型特征和长期记忆过程, 其 Hurst 指数可揭示时间序列的持续特征^[29,30]。本文通过 R/S 分析计算 Hurst 指数, 分析西南地区植被 NPP 时间序列变化的持续特征及其强度, 计算如下。

给定一个时间序列为 $\delta_t, t=1,2,3,\dots,n$, 对于任意正整数 $\tau \geq 1$, 均值序列为:

$$\langle \delta \rangle_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \delta_t \quad (2)$$

累计离差:

$$X(t, \tau) = \sum_{k=1}^t (\delta_k - \langle \delta \rangle_\tau), 1 \leq t \leq \tau \quad (3)$$

极差:

$$R_\tau = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau), \tau = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

标准差:

$$S_\tau = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (\delta_t - \langle \delta \rangle_\tau)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \tau = 1, 2, 3, \dots, n \quad (5)$$

计算 Hurst 指数为:

$$R/S = R_\tau / S_\tau \quad (6)$$

如果：

$$E(R/S) \propto c\tau^H \quad (7)$$

则说明给定的时间序列符合 Hurst 指数条件。

式中， H 为 Hurst 指数， $0 < H < 1$ ； c 为比例参数；当 $0 < H < 0.5$ 时，表示植被 NPP 表现为反持续变化特征；当 $H=0.5$ 时，表示植被 NPP 变化存在随机性；当 $0.5 < H < 1$ 时，表示植被 NPP 表现为持续性变化特征， H 越接近 1，持续性变化特征越强。本文使用 R/S 分析计算西南地区植被 NPP 的 Hurst 指数，并根据 Hurst 值域范围划分为强反持续性（0 ~ 0.25）、弱反持续性（0.25 ~ 0.5）、弱持续性（0.5 ~ 0.75）和强持续性（0.75 ~ 1）4 个等级。

2.2.3 地理探测器

地理探测器是一种通过探测地理现象空间分层异质性从而揭示其驱动力的统计学方法，常用于空间分异性的影响因子及其作用机理的研究^[31,32]。地理探测器包括 4 个部分：分异及因子探测器、风险探测器、交互作用探测器和生态探测器。分异及因子探测器可用于探测植被 NPP 的空间分异性，并通过表示影响因子 X 对植被 NPP 的影响程度 q ，揭示改变植被 NPP 空间分异的主导因子。 q 的取值范围为[0, 1]， q 值越大表明该影响因子对植被 NPP 空间分异的解释力越强。风险探测器用于识别影响因子各分类区间之间的植被 NPP 是否具有显著差异，并识别植被 NPP 较高的区域，检验方法为 T 检验。交互作用探测器能够识别不同的影响因子 X_1 与 X_2 之间的交互作用，即通过比较影响因子 X_1 与 X_2 共同作用下驱动力 q 和 X_1 与 X_2 单独作用下的驱动力 q 的大小，判断影响因子 X_1 与 X_2 之间是否存在交互作用以及交互作用的强度、方向、线性及非线性等。生态探测器利用 F 检验识别两种不同的影响因子 X_1 和 X_2 对植被 NPP 的空间分布影响的显著性差异。

植被 NPP 的变化并非由单一因子导致，而是受气候变化、地表形态、人类活动和区域植被类型的共同影响。参考已有研究^[25,33]，本文选取海拔（ X_1 ）、坡向（ X_2 ）和坡度（ X_3 ）这 3 个地形因子，2000~2020 年多年平均温度（ X_4 ）、降水量（ X_5 ）、相对湿度（ X_6 ）和日照时数（ X_7 ）这 4 个气象因子，2010 年土地利用类型（ X_8 ）加上 2010 年人口密度（ X_9 ）和 GDP（ X_{10} ）这 2 个人文因子共 10 个影响因子。影响因子数据都为连续变量，需要进行离散化处理，本文使用自然断点法，依据取值区间将每个影响因子分为 6 类，并与 2000~2020 年多年平均植被 NPP 一起进行采样点提取，在地理探测器中分析各影响因子对西南地区 NPP 植被变化的影响。

3 结果与分析

3.1 植被 NPP 时空演变特征

3.1.1 植被 NPP 时间变化特征

由图 2 可知，2000~2020 年西南地区植被 NPP 多年平均值（以 C 计，下同）为 $453.67\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ ，最小值出现在 2000 年，为 $424.98\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ ，最大值出现在 2020 年，为 $473.03\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 。各地貌单元中，云贵高原植被 NPP 多年平均值最高，为 $948.75\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ ，其次为广西丘陵，为 $856.91\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ ，最低为青藏高原南部，为 $128.49\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 。从时间变化上看，研究时段内西南地区植被 NPP 变化趋势整体呈现为极显著上升，上升速率为 $1.81\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 。如图 3 所示，除青藏高原南部外，其余地貌单元植被 NPP 均表现为上升趋势，其中四川盆地和云贵高原植被 NPP 表现为极显著上升，上升速率分别为 $7.15\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 和 $3.24\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 。相较其他地貌单元，青藏高原南部植被 NPP 在年际上变化幅度较小，呈现不显著下降趋势，变化速率为 $-0.11\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 。综上所述，除青藏高原南部外，西南地区整体及各地貌单元植被 NPP 均呈上升趋势，但在部分时段如 2003~2006 年和 2009~2012 年，植被 NPP 出现不同程度的下降，这主要是由于在上述时段西南地区受到了持续性的干旱等自然灾害的影响，破坏了植被的生境，造成了植被覆盖的退化，使得植被 NPP 出现下

降趋势。

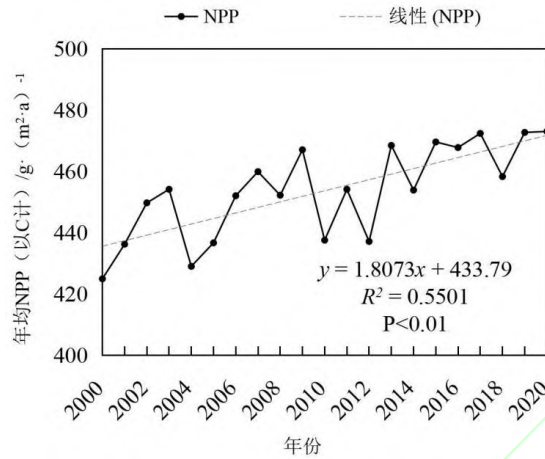


图2 西南地区植被 NPP 时空变化趋势

Fig. 2 Temporal changing trend of vegetation NPP in southwest China

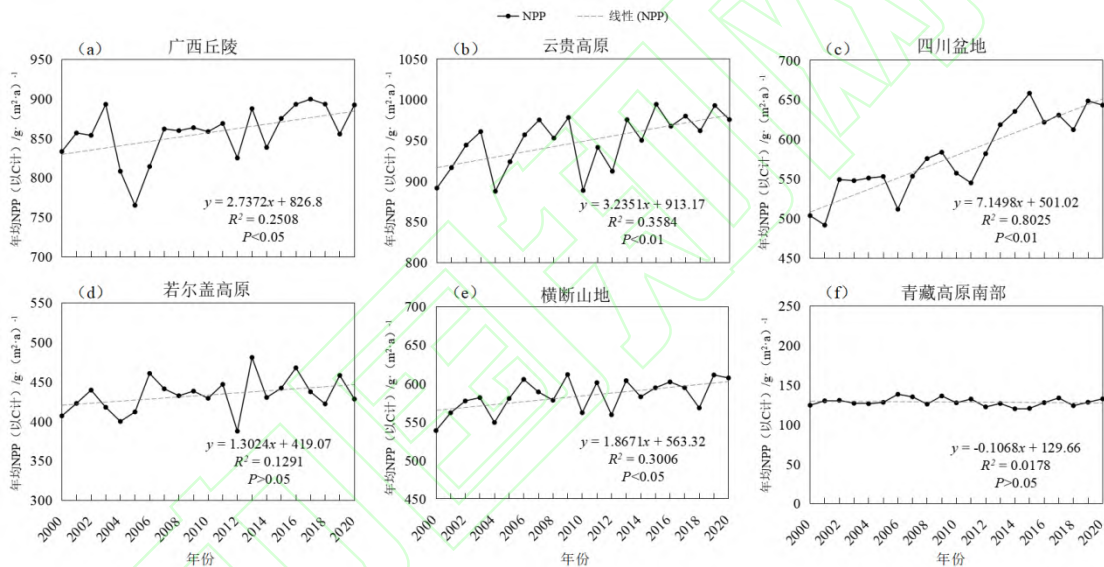


图3 各地貌单元植被 NPP 时空变化趋势

Fig. 3 Temporal changing trend of vegetation NPP of landform units

3.1.2 植被 NPP 空间变化特征

如图 4 (a) 所示, 2000~2020 年西南地区植被 NPP 变化趋势具有较强的空间分异特征, 变化斜率整体呈现“东高西低”的分布格局。西南地区 78.13% 的区域植被 NPP 呈上升趋势, 其中极显著上升区域占西南地区的 26.07%, 主要分布在广西丘陵、云贵高原中部、四川盆地和青藏高原那曲地区北部。西南地区 21.87% 的区域植被 NPP 呈下降趋势, 其中呈极显著下降和呈显著下降的区域占西南地区的 4.76%, 集中分布在青藏高原山南地区南部和各大中城市及其周边地区。

由图 4 (b) 可知, 2000~2020 年西南地区各地貌单元的植被 NPP 呈上升趋势的区域占比均超过 70%, 呈极显著下降的区域占比均在 6% 以下。在各地貌单元中, 四川盆地植被 NPP 呈上升趋势的区域占比最大, 为 95.58%, 其中极显著上升的区域占四川盆地的 84.02%, 远高于其他地貌单元。若尔盖高原植被 NPP 呈上升趋势的区域占比为 83.39%, 仅次于四川盆地, 但其中呈极显著上升的区域仅占若尔盖高原的 9.19%, 低于其他地貌单元, 呈不显著上升的区域占若尔盖高原的 62.10%。植被 NPP 呈下降趋势的区域占比超过 25% 的仅有广西

丘陵和云贵高原，分别为 26.60% 和 27.31%，且广西丘陵和云贵高原呈极显著下降和显著下降的区域占比相较于其他地貌单元更高。

综上所述，研究时段内，西南地区及各地貌单元植被 NPP 均以增加态势为主，四川盆地的植被 NPP 呈现增加态势的区域占比和增加程度均优于其他地貌单元；若尔盖高原虽然大部分地区植被 NPP 呈增加趋势，但其增加程度以不显著增加为主，极显著增加较少；广西丘陵和云贵高原植被 NPP 呈下降趋势的区域占比和下降程度均大于其他地貌单元。

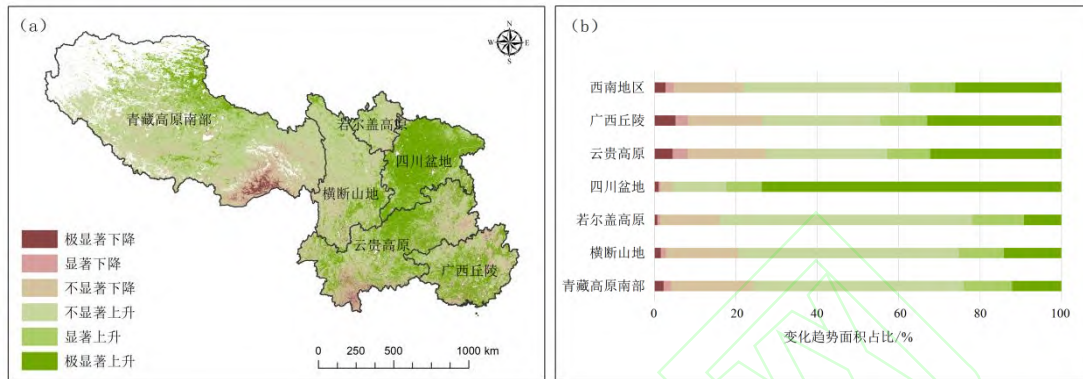


图 4 西南地区植被 NPP 空间变化及显著性统计

Fig. 4 Spatial variation and its statistical result of vegetation NPP in southwest China

3.2 西南地区植被 NPP 未来变化趋势

为探究西南地区植被 NPP 的持续性特征。结果表明[图 5 (a)], 西南地区的植被 NPP 的 Hurst 指数在 0.05~0.94 区间，平均值为 0.42，说明西南地区植被 NPP 整体趋于弱反持续性变化。在西南地区中，呈弱反持续性的区域占比最大，为 78.80%，呈弱持续性的区域占 19.80%，呈强反持续性和强持续性的区域较小，仅分别占西南地区的 1.32% 和 0.08%，上述结果说明西南地区植被 NPP 以弱反持续性变化为主。

为进一步揭示西南地区植被 NPP 未来变化情况，本文将 Hurst 指数与一元线性回归计算结果耦合，得到植被 NPP 未来变化趋势空间分布，如图 5 (b) 所示。由表 1 可知，西南地区植被 NPP 未来变化呈上升趋势的区域占 31.23%，其中表现为持续性上升的区域占西南地区的 14.59%，主要分布在广西丘陵中部、云贵高原中部、四川盆地南部和西藏的日喀则地区；表现为下降转上升的区域占西南地区的 16.64%，主要分布在广西丘陵东部、云贵高原西部和西藏的昌都、林芝、山南地区。西南地区植被 NPP 未来变化呈下降趋势的区域占比为 68.77%，其中表现为持续性下降的区域占西南地区的 5.29%，主要分布在青藏高原山南地区南部和各大中城市及其周边地区；表现为上升转下降的区域占西南地区的 63.48%，广泛分布于各地貌单元中。各地貌单元植被 NPP 未来变化呈上升趋势的区域均小于呈下降趋势的区域，在各地貌单元中呈上升趋势区域占比最大的是广西丘陵，为 38.84%，其次是云贵高原，为 36.83%，最小的是若尔盖高原，为 21.07%。植被 NPP 未来变化趋势表现为上升转下降的区域占比在各地貌单元中均超过 50%，表现为持续性下降的区域占比均低于 10%。综上所述，西南地区及各地貌单元植被 NPP 未来变化均以下降趋势为主，其中由上升转下降的地区较多，持续性下降的地区较少。

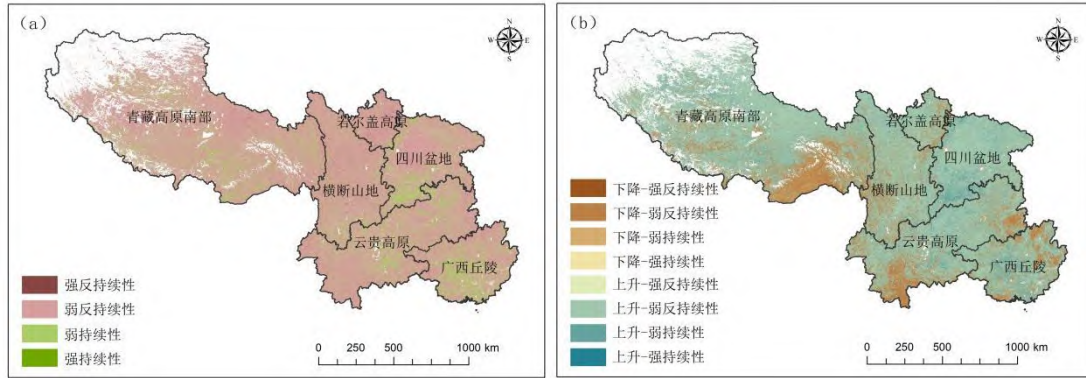


图5 西南地区植被 NPP 持续性变化特征

Fig. 5 Characteristics of consistent variation of vegetation NPP in southwest China

表 1 西南地区植被 NPP 持续性变化统计/%

Table 1 Statistical result of consistent variation of vegetation NPP in southwest China/%

持续性特征	未来变化趋势	西南	广西	云贵	四川	若尔盖	横断	青藏高原
		地区	丘陵	高原	盆地	高原	山地	南部
下降-强反持续性	上升	0.31	0.28	0.48	0.02	0.44	0.35	0.3
下降-弱反持续性	上升	16.33	16.99	20.82	2.36	13.7	15.95	18.68
下降-弱持续性	下降	5.24	9.01	5.91	1.94	1.8	4.32	5.61
下降-强持续性	下降	0.05	0.07	0.1	0.05	0.02	0.04	0.02
上升-强反持续性	下降	1.01	0.54	0.97	0.52	2.36	1.63	0.95
上升-弱反持续性	下降	62.47	51.54	56.19	75.1	74.75	66.24	62.09
上升-弱持续性	上升	14.56	21.5	15.48	19.98	6.92	11.45	12.34
上升-强持续性	上升	0.03	0.07	0.05	0.03	0.01	0.02	0.01

3.3 西南地区植被 NPP 影响因子地理探测

3.3.1 影响因子对植被 NPP 空间分异影响力探测

分异及因子探测结果 q 值可反映因子对西南地区植被 NPP 空间分异的影响程度。如表 2 所示, 各影响因子对西南地区植被 NPP 空间分异的 q 值排序如下: 海拔 > 相对湿度 > 温度 > 降水量 > 日照时数 > 土地利用类型 > GDP > 人口密度 > 坡度 > 坡向。在地势高低起伏较大的西南地区, 海拔是影响植被 NPP 空间分异的主导因子, 解释力达到 71.8%。气象因子和土地利用类型的解释力均在 40% 以上, 是西南地区植被 NPP 空间分异的主要影响因子。坡度、坡向、人口密度和 GDP 的解释力较小, 均低于 10%, 对西南地区植被 NPP 空间分异影响微弱。

由不同地貌单元中各影响因子的 q 值排序可知, 除温度是影响云贵高原植被 NPP 空间分异的第一主导因子, 其余地貌单元植被 NPP 空间分异的第一主导因子均为海拔。此外, 同一影响因子对不同地貌单元植被 NPP 空间分异的影响差异显著。例如, 地形因子中的海拔对若尔盖高原、横断山地和青藏高原南部的植被 NPP 空间分异的影响显著, 解释力分别为 54.8%、67.7%和 57.2%, 而在广西丘陵和云贵高原中其解释力仅为 11.4%和 1.9%。气象因子中的温度对除广西丘陵外的各地貌单元植被 NPP 空间分异的解释力均在 20% 以上, 其中在横断山地的解释力达 54.6%, 而在广西丘陵中其解释力仅为 1.8%。人口密度对植被 NPP 的解释力较小, 但在不同地貌单元中表现出明显的差异性, 具体表现为在广西丘陵和四川盆地解释力较高, 解释力在 9% 以上, 而在若尔盖高原和青藏高原南部, 解释力仅分别为 2.7%和 2.1%。GDP 对植被 NPP 空间分异的贡献在横断山地和四川盆地较大, 解释力分别为 44.4%和 32.4%, 而在其余地貌单元内解释力均不足 1%。

综合可知, 由于各地貌单元的自然环境、人类活动强度及植被群落等的差异, 影响因子对植被 NPP 空间分异的作用力在不同的地貌单元之间存在差异。海拔是除云贵高原外各地貌单元植被 NPP 空间分异的主要影响因子。气象因子对云贵高原、若尔盖高原、横断山地和青藏高原南部植被 NPP 空间分异影响较大。四川盆地植被 NPP 空间分异受人口密度和 GDP 的影响相对于其他地貌单元均较强。

表 2 西南地区影响因子探测 q 值¹⁾

Table 2 The q value of influencing factors in southwest China

地貌单元	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
西南地区	0.718**	0.003**	0.007**	0.628**	0.494**	0.634**	0.442**	0.428**	0.014**	0.040**
广西丘陵	0.114**	0.007**	0.086**	0.018**	0.010**	0.059**	0.027**	0.102**	0.094**	0.044**
云贵高原	0.019**	0.004**	0.047**	0.324**	0.303**	0.091**	0.270**	0.072**	0.057**	0.098**
四川盆地	0.441**	0.001**	0.306**	0.287**	0.053**	0.146**	0.157**	0.193**	0.094**	0.324**
若尔盖高原	0.548**	0.012**	0.112**	0.233**	0.055**	0.256**	0.236**	0.175**	0.027**	0.085**
横断山地	0.677**	0.004**	0.065**	0.546**	0.194**	0.453**	0.067**	0.299**	0.045**	0.444**
青藏高原南部	0.572**	0.001**	0.144**	0.286**	0.131**	0.416**	0.405**	0.279**	0.021**	0.023**

1) **表示 $P < 0.01$

3.3.2 影响因子对植被 NPP 影响差异探测

生态探测结果可反映西南地区各影响因子对植被 NPP 的影响是否具有显著差异 (置信水平为 95%), 具有显著差异记为“Y”, 反之记为“N”。如图 6 (a) 所示, 就西南地区而言, 地形因子之间对植被 NPP 影响均不具有显著差异。海拔与土地利用类型和人文因子对植被 NPP 的影响具有显著差异, 与气象因子之间表现为不显著差异, 以上结果进一步验证了海拔对西南地区植被 NPP 空间分异的影响。坡度和坡向与解释力较强的气象因子之间皆具有显著差异, 与其他因子差异不显著, 这与其影响微弱特征相符。温度、降水量和日照时数这 3 个因子的显著性差异皆表现在与坡度、坡向、土地利用和人文因子之间。土地利用类型、人口密度和 GDP 三者的差异显著性特征相同, 与除解释力较小的坡度和坡向外的因子之间皆存在显著差异。

影响因子间对植被 NPP 空间分异的作用机制差异具有地貌单元异质性, 例如, 除云贵高原外, 其余地貌单元海拔与人文因子对植被 NPP 的影响皆具有显著差异, 与气象因子之间无显著差异, 而在云贵高原, 海拔的显著差异性仅表现在与坡度和 4 个气象因子中。气象因子与其他因子对植被 NPP 影响的差异性在云贵高原最强, 在广西丘陵最弱, 呈显著差异的组合占比分别为 69.44%和 22.22%。广西丘陵中土地利用类型与除 GDP 外的所有因子对植被 NPP 的影响差异显著; 四川盆地中 GDP 仅与海拔和人口密度对植被 NPP 的影响存在显著差异; 若尔盖高原和青藏高原南部中 GDP 与除坡向外的所有因子对植被 NPP 空间分布均具有显著差异。以上生态探测的结果与因子探测的结果较为吻合。

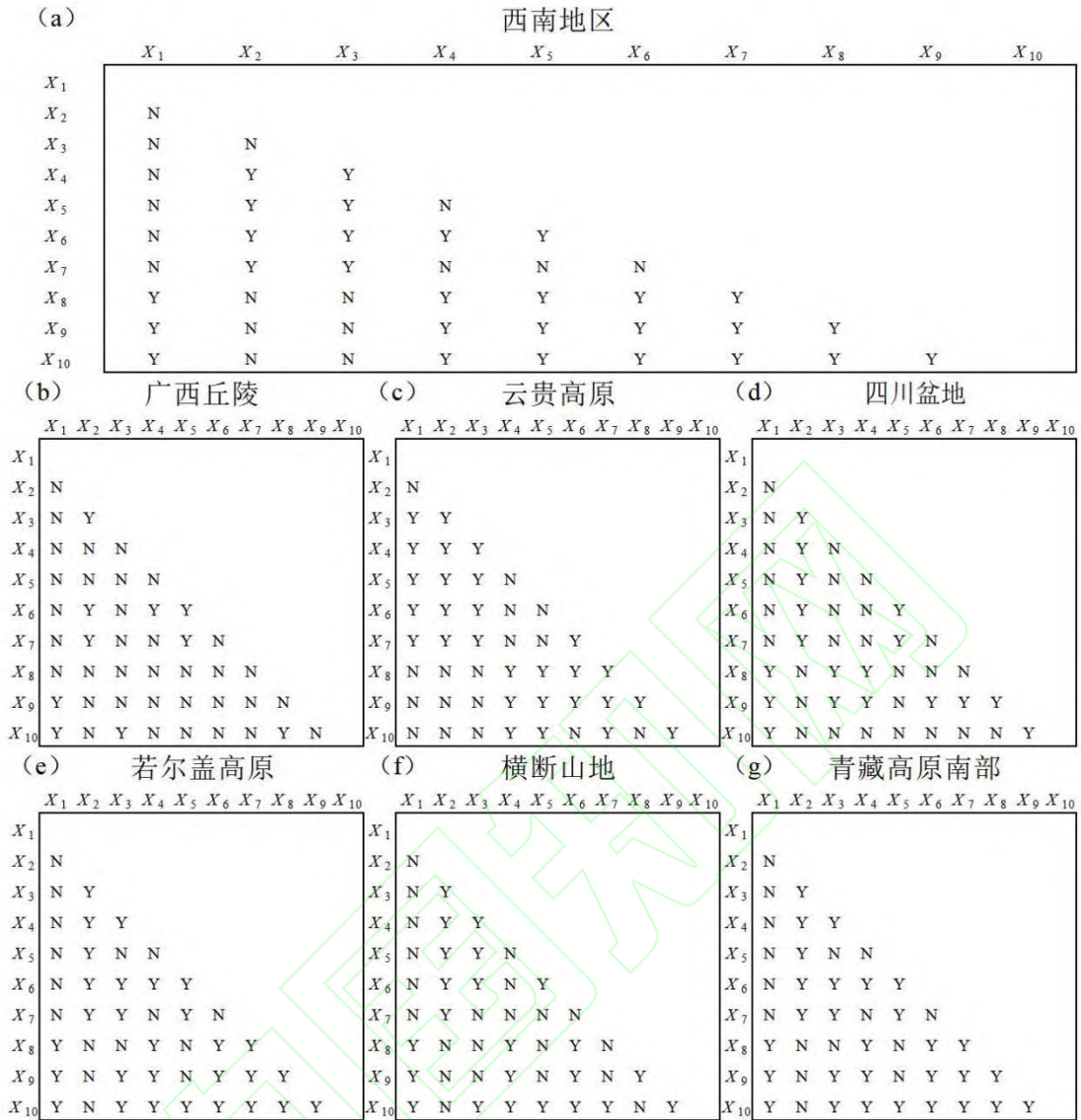


图 6 西南地区影响因子生态探测结果

Fig. 6 Ecological detection result of influencing factors in Southwest China

3.3.3 影响因子对植被 NPP 交互作用探测

交互作用探测结果表明,在西南地区及各地貌单元中,任意两个影响因子之间的交互作用对植被 NPP 空间分异的解释力均表现为双因子增强或非线性增强。本文根据 q 值的大小对交互作用方式进行排列并统计排在前三的交互作用方式,其结果如表 3 所示。海拔 \cap 温度对西南地区植被 NPP 空间分异的影响最为显著,解释力达到 80.8%。海拔 \cap 日照时数次之,解释力为 79.5%。海拔 \cap 降水量的解释力略低于海拔 \cap 日照时数,为 78.9%。以上结果进一步验证了海拔是影响西南地区植被 NPP 空间分异的主要因子,且与气象因子协同作用能够增强对植被 NPP 变化的影响。

不同地貌单元植被 NPP 空间分异的主导交互作用有所差异。在广西丘陵、四川盆地、若尔盖高原、横断山地和青藏高原南部,解释力排在前三的交互作用均为海拔与气象因子或 GDP 之间的交互作用。在云贵高原,解释力排在前三的交互作用均为气象因子之间的交互作用。分别对比不同地貌单元三组主导交互作用的 q 值,除云贵高原和四川盆地的第三主导交互作用外,三组主导交互作用的解释力 q 值大小均满足横断山地>青藏高原南部>若尔盖高原>云贵高原>四川盆地>广西丘陵,其中横断山地的三大主导交互作用的解释力均高于

72%，而广西丘陵三大主导交互作用的解释力均低于 21%。

综上可知，西南地区及各地貌单元植被 NPP 的空间分异不是由各影响因子独立作用或简单叠加作用形成的，而是多因子相互增强或线性增强作用的结果。交互作用在不同的地貌单元的作用表现出较大差异，广西丘陵、四川盆地、若尔盖高原、横断山地和青藏高原南部植被 NPP 空间分异解释力前三的交互作用均为海拔与其他因子之间的交互作用，海拔对植被 NPP 的影响力得以验证，云贵高原中对植被 NPP 空间分异解释力前三的交互作用为气象因子之间的交互作用，这也与云贵高原的因子探测结果相符。虽然各影响因子皆对植被 NPP 具有不同程度的影响，但地貌单元对植被 NPP 的宏观控制作用更大，空间尺度效应得以显现。

表 3 西南地区影响因子交互作用探测 q 值

Table 3 The q value of interaction detection between influencing factors in southwest China

地貌单元	第一主导交互作用	q 值	第二主导交互作用	q 值	第三主导交互作用	q 值
西南地区	$X_1 \cap X_4$	0.808	$X_1 \cap X_7$	0.795	$X_1 \cap X_5$	0.789
广西丘陵	$X_1 \cap X_7$	0.209	$X_1 \cap X_6$	0.173	$X_1 \cap X_4$	0.209
云贵高原	$X_5 \cap X_7$	0.531	$X_6 \cap X_7$	0.516	$X_4 \cap X_5$	0.473
四川盆地	$X_1 \cap X_5$	0.507	$X_1 \cap X_{10}$	0.491	$X_1 \cap X_4$	0.489
若尔盖高原	$X_1 \cap X_4$	0.646	$X_1 \cap X_7$	0.626	$X_1 \cap X_6$	0.612
横断山地	$X_1 \cap X_4$	0.728	$X_1 \cap X_6$	0.724	$X_1 \cap X_5$	0.721
青藏高原南部	$X_1 \cap X_5$	0.660	$X_1 \cap X_6$	0.654	$X_1 \cap X_7$	0.644

3.3.4 影响因子对植被 NPP 影响适宜性分析

风险探测器模块可以探测影响因子不同取值区间对植被 NPP 空间分异的影响，并在此基础上确定各影响因子对植被生长最适宜区间，结果如表 4 所示。西南地区植被 NPP 均值随着温度和降水量的升高而增大，年平均温度和年总降水量最适宜区间分别为 18.70~23.9°C 和 1536.02~2762.63mm，说明温度的升高和降水量的增加对西南地区植被 NPP 的增长有一定的促进作用。西南地区植被 NPP 均值随着海拔、相对湿度、日照时数、人口密度和 GDP 的升高呈现先上升后下降的趋势。其中，植被 NPP 均值随着海拔的升高先小幅上升，在海拔为 826~1712m 时达到最适宜区间，而后植被 NPP 均值随着海拔的升高而下降，下降幅度随着海拔升高逐渐增大，说明西南地区的低中海拔地区较适合植被生长，而高海拔地区不利于植被生长。植被 NPP 均值随着 GDP 和人口密度的增加的先大幅上升后逐渐下降，GDP 和人口密度的最适宜区间分别为 187.74~480.08 人·km² 和 262.27~530.86 万元，植被 NPP 均值在到达最适区间前的大幅上升趋势可能与部分地区环境恶劣，同时不适宜人类和植被生存，植被 NPP 较小有关。坡度和坡向的变化对植被 NPP 的影响均较小，植被 NPP 均值最高的土地利用类型为林地。

影响因子对不同地貌单元植被 NPP 的适宜区间各异。除海拔较高的若尔盖高原和青藏高原南部植被 NPP 均值随海拔的增长呈现下降趋势外，其余地貌单元均表现为先上升后下降。四川盆地、若尔盖高原、横断山地和青藏高原南部植被 NPP 整体表现为随坡度的增大而上升，而广西丘陵和云贵高原的植被 NPP 随坡度的增大呈先上升后下降的趋势。坡向的变化对各地貌单元植被 NPP 影响微弱。气象因子对植被 NPP 的适宜性随着不同地貌单元地貌特征的变化显示出较大的差异。随着温度的升高，除广西丘陵和四川盆地植被 NPP 呈现先上升后下降趋势外，其余地貌单元均为上升趋势。随着降水量增大，广西丘陵和若尔盖高原的植被 NPP 均值呈下降趋势，云贵高原、四川盆地和青藏高原南部反之，横断山地的植被 NPP 均值先上升后下降。广西丘陵、云贵高原和四川盆地的植被 NPP 均值随着人口密度和 GDP 的增长而下降，而若尔盖高原、横断山地和青藏高原南部的植被 NPP 均值均随着人口密度和 GDP 的增长分别呈先上升后下降和逐渐上升的变化特征。各土地利用类型中，耕

地、林地和草地的植被 NPP 均值在各地貌单元中均较大, 其中广西丘陵、云贵高原和青藏高原南部植被 NPP 最高的为林地, 四川盆地为草地, 若尔盖高原和横断山地为耕地。

表 4 西南地区影响因子适宜范围及植被 NPP 平均值¹⁾

Table 4 Average vegetation NPP and its suitable range of influencing factors in southwest China

因子	西南地区	广西丘陵	云贵高原	四川盆地	若尔盖高原	横断山地	青藏高原南部
X_1/m	826~1712	365~575	1462~1816	1816~2584	574~1707	1737~2414	82~1823
平均值	934.18	954.97	1008.96	764.03	719.35	853.11	1104.15
$X_2/ (^{\circ})$	112.~157.5	157.5~202.5	157.5~202.5	67.5~112.5	337.5~360	67.5~112.5	247.5~292.5
平均值	559.75	906.53	995.44	596.67	465.50	580.28	135.81
$X_3/ (^{\circ})$	16.05~20.30	3.67~6.38	12.37~16.05	20.30~25.72	25.72~49.31	25.72~49.31	25.72~49.31
平均值	575.08	950.68	1074.45	736.69	590.88	676.34	365.87
$X_4/^{\circ}C$	18.70~23.9	20.13~21.23	20.52~23.93	12.01~14.05	11.14~13.43	14.87~20.41	9.55~15.24
平均值	1004.31	928.45	1337.69	767.01	660.73	849.83	428.19
X_5/mm	1536.02~276	42.62~1265.	1818.32~268	1327.48~165	513.90~733.	976.30~112	1001.35~193
	2.63	02	8.61	1.64	42	3.37	8.39
平均值	1004.17	910.15	1429.90	657.94	472.09	725.50	380.49
$X_6/\%$	67.02~74.40	78.32~79.19	74.11~76.93	58.52~68.97	73.38~79.61	72.89~82.09	61.53~72.15
平均值	883.61	934.16	1138.95	744.49	728.60	818.08	560.13
X_7/h	1321.25~174	1617.35~174	1987.36~217	1853.51~221	902.9~1285.	846.68~126	1394.61~188
	0.04	3.65	1.43	2.90	9	8.41	7.87
平均值	803.75	918.50	1142.91	767.63	684.34	803.08	551.90
X_8	林地	林地	林地	草地	耕地	耕地	林地
平均值	822.86	927.79	1036.05	672.81	583.86	783.45	391.37
$X_9/人 \cdot km^2$	187.74~480.				320.58~406.	90.36~225.6	
	08	0.24~280.38	1.22~237.28	0~533.45	82	0	71.77~92.01
平均值	679.07	906.98	993.72	608.83	648.48	786.60	271.55
$X_{10}/万元$	262.27~530.	25.77~165.0			347.86~560	544.48~651.	75.70~3254.
	86	9	17.47~56.60	9.66~250.18	7.60	34	27
平均值	761.21	922.69	1141.03	679.20	667.95	866.12	197.84

1) NPP 平均值的单位为 $g \cdot (m^2 \cdot a)^{-1}$, 以 C 计

4 讨论

4.1 植被 NPP 时空演变及未来变化趋势

2000—2020 年西南地区植被 NPP 整体表现为“东高西低”的空间分布格局, 云贵高原和广西丘陵的主要植被类型为光能利用率较高的林地^[34], 且位于我国热带和亚热带地区, 水热光充足, 土壤养分较好, 有利于植被生长发育, 故植被 NPP 较高; 而青藏高原南部地势较高, 年均温度低, 降水稀少, 森林主要分布在东南部, 西北部则以草原和荒漠为主, 高山地区多年冻土分布, 土壤贫瘠, 植被生长条件差^[35], 故植被 NPP 较低。从时间上看, 近 21 年来, 西南地区及除青藏高原南部外的各地貌单元植被 NPP 整体呈现上升趋势, 与前人的研究结果一致^[18,33,36,37]。西南地区作为干旱、洪涝、地震等自然灾害的高发区, 重大自然灾害对植被生长的负面影响是造成部分时段内植被 NPP 出现下降趋势的原因之一^[38,39]。从空间上看, 西南地区植被 NPP 呈显著上升的区域主要分布在广西丘陵、云贵高原中部、四川盆地和青藏高原那曲地区北部, 除受到气候格局变化的影响外, 还与国家重视林业发展,

在西南地区实施了天然林保护工程、退耕还林工程、长江防护林工程和珠江防护林工程等一系列生态建设等有关^[33,40,41]。例如,在地方政府的大力推动下,西藏那曲地区通过持续开展高寒地区国土绿化行动,全面形成绿色发展格局,区域植被覆盖显著增加^[42]。然而,随着社会发展,人类活动的范围和强度不断增大,部分地区的植被覆盖出现退化,如在成都、贵阳和南宁等地区,经济快速发展,人口聚集效应凸显,城乡建设用地急剧增长侵占了大量耕地及林地,土地利用格局发生变化,植被覆盖减少^[33,43];西藏山南地区作为我国的重要牧区,人口增长和过度放牧加剧了当地的土地沙化问题,地区生态环境脆弱,加速了植被的退化^[42],人类活动对西南地区植被 NPP 增加的正向促进作用和负向抑制作用共存。

未来植被 NPP 空间分布将呈现新格局。未来植被 NPP 表现为持续性上升的区域主要分布在广西丘陵中部、云贵高原中部、四川盆地南部和西藏的日喀则地区,一方面这些地区随着植被恢复等生态环境保护工程的实施^[33,40,41],植被覆盖稳定增加,生态状况持续向好,抵御风险的能力不断提升。另一方面,以上地区大都地处亚热带,光照、水分和热量较为充足,为植被生长提供了良好的气候条件,气候变暖缓解了高寒草地植被的低温限制,延长了植被生长期^[44,45]。呈现持续退化趋势的区域主要分布在青藏高原山南地区南部和各大中城市及其周边地区,由此可知,自然资源的不合理利用及城市规模的扩张会对部分地区的植被 NPP 产生负向且持续的影响。西南地区及各地貌单元植被 NPP 未来变化趋势表现为上升转下降的区域占比均超过 50%,应持续关注植被 NPP 呈上升趋势但未来存在退化风险的区域,辅以适宜的植被保护措施,减缓或逆转植被未来的退化趋势。

4.2 西南地区植被 NPP 影响因子分析

由地理探测结果可知,西南地区植被 NPP 的空间分异受地形因素、气候因素、人类活动和土地利用类型的共同影响,但总体上自然因素对植被 NPP 的影响力要强于人文因素。海拔是西南地区植被 NPP 空间分异的主导因素。西南地区地形复杂,地势高低起伏大,区域海拔高差不仅影响着地区水热条件和土壤肥力,还会在一定程度上影响地区的植被类型和人类活动范围与强度,因此海拔对西南地区植被 NPP 空间分异的解释力较高。气象因子可以直接影响植被的光合、呼吸和蒸腾等代谢过程,土地利用类型能有效反映土地利用方式、植被类型以及人类活动程度的区域差异,因而对西南地区整体植被 NPP 的空间分异解释力也较高,这与已有研究结果一致^[20,46-48]。

地貌单元的宏观控制作用及其自然和人文特征导致不同地貌单元的植被 NPP 的空间分异及其影响因子差异性显著。如海拔对植被 NPP 的影响在地势较高的若尔盖高原、横断山地和青藏高原南部更为显著,这是由高地势地区内部特征的垂直分异性更明显导致的。云贵高原由于海拔与大气环流的影响,热量分布差异明显,温度是云贵高原植被 NPP 空间分异的第一主导因子。横断山地气候垂直变化显著,具有“一山有四季,十里不同天”的说法,温度随着地势的升高不断降低,成为影响横断山地植被生长过程的主要因素。人口密度对广西丘陵和四川盆地植被 NPP 的影响较大,这是由于广西丘陵和四川盆地人口规模较大,其中潯郁平原和成都平原地势低平,土壤肥沃,是著名的鱼米之乡,人口稠密,人类活动对植被 NPP 的影响显著。

由于地理变化过程的复杂性,因子之间的交互作用相较于单因子作用的影响力更大,其中对西南地区植被 NPP 空间分异解释力排在前三的皆为海拔与气象因子交互作用,说明在西南地区未来的生态规划中,除了要考虑海拔单因子的影响,还应将气象因子纳入考虑范畴。不同的地貌单元中影响因子对植被 NPP 的适宜特征各异,因此,考虑不同地貌单元各影响因子对植被 NPP 影响的适宜范围,因地制宜地开展生态保护,对提升西南地区生态文明建设成效,促进人与自然是和谐共处意义重大。

5 结论

(1) 2000—2020 年西南地区植被 NPP 整体呈极显著上升趋势, 除青藏高原南部外的各地貌单元植被 NPP 均表现为上升趋势, 其中四川盆地和云贵高原为极显著上升趋势, 青藏高原南部植被 NPP 年际变化较小, 呈现不显著下降趋势。西南地区植被 NPP 变化在空间格局上分异明显, 上升趋势整体呈现“东高西低”的分布特征, 植被 NPP 呈上升趋势的区域占 78.13%, 呈下降趋势的区域占 21.87%。在各地貌单元中, 植被 NPP 呈上升趋势面积占比大于呈下降趋势面积。

(2) 西南地区植被 NPP 整体呈弱反持续性变化, 且未来植被 NPP 呈上升趋势的面积大于呈下降趋势的面积, 呈持续上升、下降转上升、持续下降和上升转下降的区域分别占 14.59%、63.48%、5.29% 和 16.64%。西南地区各地貌单元植被 NPP 未来变化均以下降趋势为主, 其中由上升转下降的地区较多, 持续性下降的地区较少。

(3) 2000~2020 年各影响因子对西南地区植被 NPP 空间分异的影响力排序如下: 海拔 > 相对湿度 > 温度 > 植被类型 > GDP > 土地利用类型变化 > 降水量 > 人口密度 > 日照时数 > 坡度 > 坡向, 海拔对西南地区的植被 NPP 的解释力最高。西南地区及各地貌单元影响因子交互作用可以增强对植被 NPP 的解释力, 均表现为双因子增强或非线性增强, 其中, 海拔∩温度对西南地区植被 NPP 空间分异的解释力最强。

参考文献:

- [1] Piao S, Fang J, Zhou L, *et al.* Changes in vegetation net primary productivity from 1982 to 1999 in China[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, **19**(2), doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106392.
- [2] 尹云鹤, 马丹阳, 邓浩宇, 等. 中国北方干湿过渡区生态系统生产力的气候变化风险评估[J]. *地理学报*, 2021, **76**(7): 1605-1617.
Yin Y H, Ma D Y, Deng Hao Y, *et al.* Climate change risk assessment of ecosystem productivity in the arid/humid transition zone of northern China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, **76**(7): 1605-1617.
- [3] Sun H Z, Chen Y B, Xiong J N, *et al.* Relationships between climate change, phenology, edaphic factors, and net primary productivity across the Tibetan Plateau[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, doi: 10.1016/j.jag.2022.102708.
- [4] Vernet M, Ellingsen I, Marchese C, *et al.* Spatial variability in rates of net primary production (NPP) and onset of the spring bloom in Greenland shelf waters[J]. *Progress in Oceanography*, 2021, **198**, doi: 10.1016/j.pocean.2021.102655.
- [5] Brouwers N C, Coops N C. Decreasing net primary production in forest and shrub vegetation across southwest Australia[J]. *Ecological Indicators*, 2016, **66**: 10-19.
- [6] 齐玉春, 彭琴, 董云社, 等. 不同退化程度羊草草原碳收支对模拟氮沉降变化的响应[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 625-635.
Qi Y C, Peng Q, Dong Y S, *et al.* Responses of ecosystem carbon budget to increasing nitrogen deposition in differently degraded *leymus chinensis* steppes in Inner Mongolia, China[J]. *Environmental Scienc*, 2015, **36**(2): 625-635.
- [7] Yan W C, Wang Y Y, Chaudhary P, *et al.* Effects of climate change and human activities on net primary production of wetlands on the Zoige Plateau from 1990 to 2015[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2022, **35**, doi: 10.1016/j.gecco.2022.e02052.
- [8] Wen Y Y, Liu X P, Bai Y, *et al.* Determining the impacts of climate change and urban expansion on terrestrial net primary production in China[J]. *Journal of environmental management*, 2019, **240**: 75-83.
- [9] Ge W Y, Deng L Q, Wang F, *et al.* Quantifying the contributions of human activities and climate change to vegetation net primary productivity dynamics in China from 2001 to 2016[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **773**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145648.
- [10] IGBP Terrestrial Carbon Working Group. The terrestrial carbon cycle: Implications for the Kyoto Protocol[J]. *Science*, 1998, **280**(5368):1393.

- [11] 刘良云, 陈良富, 刘毅, 等. 全球碳盘点卫星遥感监测方法、进展与挑战[J]. 遥感学报, 2022, **26**(2): 243-267.
Liu L Y, Chen L F, Liu Y, *et al.* Satellite remote sensing for global stocktaking: Methods, progress and perspectives[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, **26**(2): 243-267.
- [12] 周天军, 陈晓龙, 吴波. 支撑“未来地球”计划的气候变化科学前沿问题[J]. 科学通报, 2019, **64**(19): 1967-1974.
Zhou T J, Chen X L, Wu B. Frontier issues on climate change science for supporting Future Earth[J]. Science China Press, 2019, **64**(19): 1967-1974.
- [13] Liu Y Y, Zhou R L, Wen Z M, *et al.* Assessing the impacts of drought on net primary productivity of global land biomes in different climate zones[J]. Ecological Indicators, 2021, **130**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108146.
- [14] Yang H, Hu D, Xu H, *et al.* Assessing the spatiotemporal variation of NPP and its response to driving factors in Anhui province, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, **27**(13): 14915-14932.
- [15] Zhang M, Liu X, Nazieh S, *et al.* Spatiotemporal distribution of grassland NPP in Gansu province, China from 1982 to 2011 and its impact factors[J]. Plos one, 2020, **15**(11), doi: 10.1371/journal.pone.0242609.
- [16] 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.
- [17] Ren H R, Shang Y J, Zhang S. Measuring the spatiotemporal variations of vegetation net primary productivity in Inner Mongolia using spatial autocorrelation[J]. Ecological Indicators, 2020, **112**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106108.
- [18] 茆杨, 蒋勇军, 张彩云, 等. 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[J]. 生态学报, 2022, **42**(7): 2878-2890.
Mao Y, Jiang Y J, Zhang C Y, *et al.* Spatio-temporal changes and influencing factors of vegetation net primary productivity in southwest China in the past 20 years and its response to ecological engineering [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, **42**(7): 2878-2890.
- [19] Song L Y, Li M Y, Xu H, *et al.* Spatiotemporal variation and driving factors of vegetation net primary productivity in a typical karst area in China from 2000 to 2010[J]. Ecological Indicators, 2021, **132**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108280.
- [20] 孙治娟, 谢世友. 基于地理探测器的云南省净初级生产力时空演变及因子探测[J]. 生态学杂志, 2021, **40**(12): 3836-3848.
Sun Z J, Xie S Y. Spatiotemporal variation in net primary productivity and factor detection in Yunnan province based on geodetector[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, **40**(12): 3836-3848.
- [21] Zuo L Y, Gao J B, Du F J. The pairwise interaction of environmental factors for ecosystem services relationships in karst ecological priority protection and key restoration areas[J]. Ecological Indicators, 2021, **131**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108125.
- [22] Wu L H, Wang S J, Bai X Y, *et al.* Climate change weakens the positive effect of human activities on karst vegetation productivity restoration in southern China[J]. Ecological Indicators, 2020, **115**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106392.
- [23] Guo B, Zang W Q, Luo W. Spatial-temporal shifts of ecological vulnerability of Karst Mountain ecosystem-impacts of global change and anthropogenic interference[J]. Science of the Total Environment, 2020, **741**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140256.
- [24] Peng J, Tian L, Zhang Z M, *et al.* Distinguishing the impacts of land use and climate change on ecosystem services in a karst landscape in China[J]. Ecosystem Services, 2020, **46**, doi: 10.1016/j.ecoser.2020.101199.
- [25] 徐勇, 郑志威, 郭振东, 等. 2000~2020 年长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测[J]. 环境科学, 2022, **43**(7), doi:10.13227/j.hjcx.202112081.
Xu Y, Zheng Z W, Guo Z D, *et al.* Dynamic variation of vegetation cover and its influencing factor detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020[J]. Environmental Science, 2022, **43**(7), doi:10.13227/j.hjcx.202112081.
- [26] 郭宇, 王宏伟, 张喆, 等. 南京市热环境与地表覆被的时空尺度效应及驱动机制研究[J]. 生态环境学报, 2020, **29**(7): 1403-1422.
Guo Y, Wang H W, Zhang J, *et al.* Spatio-temporal scale effect and driving mechanism of thermal environment and land surface cover in Nanjing[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, **29**(7): 1403-1411.
- [27] Xiong Y L, Wang H L. Spatial relationships between NDVI and topographic factors at multiple scales in a watershed of the

- Minjiang River, China[J]. *Ecological Informatics*, 2022, doi: 10.1016/j.ecoinf.2022.101617.
- [28] 何超, 慕航, 杨璐, 等. 中国暖季近地面臭氧浓度空间格局演变及主要气象驱动因素[J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4168-4179.
He C, Mu H, Yang L, *et al.* Spatial variation of surface ozone concentration during the warm season and its meteorological driving factors in China[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4168-4179.
- [29] Du L, Gong F, Zeng Y, *et al.* Carbon use efficiency of terrestrial ecosystems in desert/grassland biome transition zone: A case in Ningxia province, northwest China[J]. *Ecological indicators*, 2021, **120**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106971.
- [30] Hurst H E. A suggested statistical model of some time series which occur in nature[J]. *Nature*, 1957, **180**(4584): 494-494.
- [31] 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. Geodetector: principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(1): 116-134.
- [32] 王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 等. 长江经济带 PM_{2.5} 空间异质性和驱动因素的地理探测[J]. *环境科学*, 2022, **43**(3): 1190-1200.
Wang L L, Liu X J, Li D, *et al.* Geographical detection of spatial heterogeneity and drivers of PM_{2.5} in the Yangtze River economic belt[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(3): 1190-1200.
- [33] 徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 等. 2000~2020年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征[J]. *环境科学*, 2022, **43**(6), doi: 10.13227/j.hjlx.202108107.
XU Y, Huang W T, Dou S Q, *et al.* Responding mechanism of vegetation cover to climate change and human activities in Southwest China from 2000 to 2020[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(6), doi: 10.13227/j.hjlx.202108107.
- [34] Qiu, H H, Hu B Q, Zhang Z. Impacts of land use change on ecosystem service value based on SDGs report--Taking Guangxi as an example. *Ecological Indicators*, 2021, **133**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108366.
- [35] 李红英, 张存桂, 汪生珍, 等. 近 40a 青藏高原植被动态变化对水热条件的响应[J]. *生态学报*, 2022, **42**(12): 1-14.
Li H Y, Zhang C G, Wang S Z, *et al.* Response of vegetation dynamics to hydrothermal conditions on the Qinghai-Tibet Plateau in the last 40 years[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(12): 1-14.
- [36] 马炳鑫, 靖娟利, 徐勇, 等. 2000—2019 年滇黔桂岩溶区植被 NPP 时空变化及与气候变化的关系研究[J]. *生态环境学报*, 2021, **30**(12): 2285-2293.
Ma B X, Jin J L, Xu Y, *et al.* Spatial-temporal changes of NPP and its relationship with climate change in karst areas of Yunnan, Guizhou and Guangxi from 2000 to 2019 [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, **30**(12): 2285-2293.
- [37] Wang Y J, Shen X J, Jiang M, *et al.* Spatiotemporal change of aboveground biomass and its response to climate change in marshes of the Tibetan plateau [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, **102**, doi: 10.1016/j.jag.2021.102385.
- [38] Wang M, Ding Z, Wu C Y, *et al.* Divergent responses of ecosystem water-use efficiency to extreme seasonal droughts in southwest China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **760**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143427.
- [39] Li J, Wang Z, Lai C. Severe drought events inducing large decrease of net primary productivity in mainland China during 1982–2015 [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **703**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135541.
- [40] 罗旭玲, 王世杰, 白晓永, 等. 西南喀斯特地区石漠化时空演变过程分析 [J]. *生态学报*, 2021, **41**(2): 680-693.
Luo X L, Wang S J, Bai X Y, *et al.* Analysis on the spatio-temporal evolution process of rocky desertification in Southwest Karst area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(2): 680-693.
- [41] Ding Z, Liu Y, Wang L C, *et al.* Effects and implications of ecological restoration projects on ecosystem water use efficiency in the karst region of Southwest China[J]. *Ecological Engineering*, 2021, **170**, doi: 10.1016/j.ecoleng.2021.106356.
- [42] 柴立夫, 田莉, 奥勇, 等. 人类活动干扰对青藏高原植被覆盖变化的影响[J]. *水土保持研究*, 2021, **28**(6): 382-388.
Cai L F, Tian L, Ao Y, *et al.* Influence human disturbance on the change of vegetation cover in the Tibetan plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, **28**(6): 382-388.
- [43] 李茜荣, 杨东, 冯磊, 等. 成渝经济圈 2000~2018 年植被 NDVI 的动态变化[J]. *生态学杂志*, 2021, **40**(9): 2967-2977.
Li Q R, Yang D, Feng L, *et al.* Dynamics of vegetation NDVI in Chengdu-Chongqing economic circle from 2000 to 2018 [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, **40**(9): 2967-2977.
- [44] Piao S L, Tan J G, Chen A P, *et al.* Leaf onset in the northern hemisphere triggered by daytime temperature[J]. *Nature*

communications, 2015, **6**(1): 1-8.

- [45] 张艳可, 王金亮, 农兰萍, 等. 基于 MODIS 时序数据北回归线 (云南段) 地区植被物候时空变化及其对气候响应分析[J]. 生态环境学报, 2021, **30**(2): 274-287.

Zhang Y K, Wang J L, Nong L P, *et al.* Spatio-temporal variation of vegetation phenology and its response to climate in the tropic of cancer (Yunnan section) based on MODIS time-series data[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, **30**(2): 274-287.

- [46] 李晓丽, 曹敏, 茆杨. 基于地理探测器的西南岩溶槽谷区近 20 年 NDVI 变化特征及影响因素[J]. 水土保持学报, 2021, **35**(6): 38-44, 54.

Li X L, Cao M, Mao Y. Variation characteristics and influencing factors of NDVI in karst trough area of southwest China in recent 20 years based on geo-detector. Research of Soil and Water Conservation, 2021, **35**(6): 38-44, 54.

- [47] 彭文甫, 张冬梅, 罗艳玫, 等. 自然因子对四川植被 NDVI 变化的地理探测[J]. 地理学报, 2019, **74**(9): 1758-1776.

Peng W F, Zhang D M, Lou Y M, *et al.* Influence of natural factors on vegetation NDVI using geographical detection in Sichuan Province[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, **74**(9): 1758-1776.

- [48] 左丽媛, 高江波. 基于地理探测器的喀斯特植被 NPP 定量归因[J]. 生态环境学报, 2020, **29**(4): 686-694.

Zuo L Y, Gao J B. Quantitative attribution analysis of NPP in karst peak cluster depression based on geographical detector[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, **29**(4): 686-694.