

莫建飞, 陈燕丽, 莫伟华. 广西喀斯特地区植被生态质量多尺度时空演变分析[J]. 中国岩溶, 2023, 42(5): 1117-1130.

DOI: 10.11932/karst2023y037

# 广西喀斯特地区植被生态质量多尺度时空演变分析

莫建飞<sup>1,2</sup>, 陈燕丽<sup>1,2</sup>, 莫伟华<sup>1,2</sup>

(1. 广西壮族自治区气象科学研究所, 广西南宁 530022; 2. 广西壮族自治区生态气象和卫星遥感中心, 广西南宁 530022)

**摘要:**为更客观监测评估喀斯特地区植被生态质量状况及阐明植被生态质量不同时间尺度的时空异质性特征, 基于多年植被净初级生产力(NPP)、湿润指数(MI), 建立植被净初级生产力极大值(NPP<sub>m</sub>)边缘函数, 并结合植被覆盖度, 构建出广西喀斯特地区植被综合生态质量模型(MQI), 以分析2000—2019年该地区植被生态质量多尺度时空演变特征。结果表明:(1)植被NPP<sub>m</sub>是随气候条件变化的动态值, 不同植被类型生产潜力对气候条件的响应不同, 其中农田植被响应最敏感, 灌草次之、森林最弱;(2)广西喀斯特地区月份与季度植被生态质量指数呈抛物线形式, 年度植被生态质量指数呈波动式增加, 年际植被生态质量发展经历了缓慢增长、逐步增长、迅速增长、显著提升4个演变阶段, 且植被生态质量由广西喀斯特地区东北部向西南部、北部向南部逐渐递增, 总体良好;(3)2000—2019年, 广西喀斯特地区植被生态改善指数为0.71/20 a, 98.83%的区域植被生态质量在20 a期间呈上升趋势, 大部区域植被生态改善良好, 这主要得益于退耕还林、石漠化治理工程和良好气候条件;(4)此植被生态质量模型区域适宜性较高, 能精细化、精准化反映广西喀斯特地区植被生态质量的时空演变特征。

**关键词:** 植被生态质量; 植被净初级生产力; 时空演变; 湿润指数; 广西喀斯特地区

中图分类号: X171.1; Q948 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2023)05-1117-14

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## 0 引言

植被是生态环境的重要组成部分, 也是反映区域生态环境质量的较好标志之一。喀斯特地区植被以灌木、灌丛、草丛为主, 土地贫瘠, 土层薄, 水土涵养能力差, 土地石漠化严重, 开展生态恢复治理难度大, 是气候变化和气象灾害影响的敏感区, 也是生态文明建设和生态扶贫的重点关注区域。科学合理开展喀斯特地区植被生态质量评价及其时空演变分析, 对喀斯特地区生态恢复治理及实现“双碳”目标有着重要意义。

随着“3S”(RS、GIS、GPS)技术发展, 植被生态质量评价已实现多指数综合定量评估, 极大程度改善了传统单一指数定性评价的局限。采用单一指数进行植被生态质量评价的代表主要有归一化植被指数(NDVI)<sup>[1-2]</sup>、增强型植被指数(EVI)<sup>[3]</sup>、基于植被净初级生产力(NPP)的生态气象指数(EMD)<sup>[4-6]</sup>。而多指数综合定量评价的代表主要有遥感生态指数(RSEI)<sup>[7]</sup>和植被综合生态质量指数(QI)<sup>[8]</sup>。两种评价方法对区域植被生态质量监测评估都有较好的实用性和推广价值。但是, 植被生态质量变化的复杂性使得单一利用植被NDVI、EVI、NPP来衡量植被

资助项目: 广西重点研发计划项目(桂科 AB23026052; 桂科 AB17292051); 广西气象科研计划重点项目(桂气科 2023Z03)

第一作者简介: 莫建飞(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事生态遥感与GIS应用研究。E-mail: mojfei@163.com。

通信作者: 莫伟华(1968—), 女, 硕士, 正高级工程师, 主要从事生态气象监测评估与应用研究。E-mail: mwh-0419.@163.com。

收稿日期: 2022-04-28

生态质量的高低其结果可能不全面。多指数综合评价方面,RSEI是纯遥感反演指数,集成了植被指数、湿度分量、温度和建筑指数4个评价指标,降低了生态指标提取的难度、改善了权重主观性、可提供可视化的植被生态质量时空变化结果,但由于RSEI构建采用主成分分析进行建模,容易造成信息利用不充分或信息冗余<sup>[9]</sup>。QI较全面考虑了植被的生态和生产功能,首次将植被覆盖度和净初级生产力两个植被关键参量进行耦合建模,实现了全国植被综合生态质量年际对比和多年变化趋势评价。其中植被生态功能以植被覆盖度指标表征,植被生产功能利用年植被NPP与研究区最好气候条件下的植被NPP极大值(NPP<sub>m</sub>)的比值来表征。中国幅员辽阔,热量和降水资源空间分布存在较明显的气候梯度差异,植被生态系统类型地域差异明显,植被生态系统的生产力最大潜力值也具有较大差异。利用QI在不同气候梯度区应用时,采用统一的植被NPP<sub>m</sub>值,植被生态质量评价结果可能存在较大的出入。气候变化和人类活动的影响,具有复杂的空间差异性<sup>[10]</sup>。因此,植被综合生态质量评价中植被生产力最大潜力的区域性问题有待深入探讨。

广西喀斯特地区地貌发育典型、分布广阔,总面积达833.4万hm<sup>2</sup>,占中国西南地区喀斯特土地总面积的18.9%,占广西土地总面积的35.1%。该地区降水时空分布不均,存在较明显的气候梯度;大雨、暴雨发生频率高,易引发水土流失、洪涝等灾害;近20年该地区实施了多项生态修复治理工程。本身的地形、地质、复杂多变气候和人类的有利和不利影响,使广西喀斯特地区生态环境变化十分复杂。尽管已有研究对该地区的植被覆盖度<sup>[11-13]</sup>、植被生产力<sup>[14-16]</sup>等生态环境进行了分析,但是对该地区植被综合生态质量年、季、月等多尺度长时间序列变化的空间异质性缺乏详细研究。鉴于此,本研究以广西喀斯特地区植被为对象,基于植被生态恢复“相似生境”原则,在考虑气候基准值的基础上,利用多年植被NPP和湿润指数极大值,构建不同植被类型NPP<sub>m</sub>边缘函数,确定喀斯特地区不同植被类型潜在生产力的自然基准,结合植被覆盖度,建立不同时间尺度的广西喀斯特地区植被综合生态质量模型,改进区域植被生态质量监测评估的适用性,实现任一植被类型、任一气候区内的植被综合生态质量客观对比评估、植被生态质量时空演变异质性分析,以期为喀斯

特地区的生态建设与恢复工作提供参考。

## 1 研究区概况

广西喀斯特地区集中分布于N21°57′~26°06′,E105°02′~111°43′之间,主要包括西江流域中上游的河池市、百色市、桂林市、崇左市、南宁市等老、少、边、山地区。研究区整体地势由桂西、桂西北、桂东北部逐步向桂中、桂东南倾斜;地貌以峰丛洼地、峰林谷地、孤峰、残丘等类型为主,峰丛洼地主要分布于桂西、桂西北,海拔可达1000m以上,峰林谷地主要分布于桂北、桂东北、桂中、桂西以及桂西南部地区,多为长条状谷地或者为宽阔的溶蚀洼地,孤峰、残丘分散式分布于溶蚀平原之上;气候类型属于亚热带季风气候,雨热同期,降水量时空分布不均,年平均气温17~23℃,年降雨1100~1500mm;植被类型有阔叶林(暖性落叶阔叶林、常绿落叶阔叶混交林、常绿阔叶林、季节性雨林、次生季雨林)、针叶林(黄枝油杉林、翠柏林、短叶黄杉林等)、灌丛(龙须藤、小果蔷薇、火棘等)、草丛(扭黄茅、龙须草等)、竹林(梁山慈竹林、吊丝球竹等)<sup>[17]</sup>;其区域内总人口占广西总人口的一半左右,经济发展相对落后,是广西重要生态保护、生态恢复治理重点关注区域(图1)。

## 2 研究方法

### 2.1 数据来源

研究数据主要包括卫星遥感产品数据、气象数据、基础地理信息数据、植被生态系统类型等资料,栅格数据统一空间分辨率为250m×250m、投影方式为CGCS2000\_GK\_Zone\_18。

(1)NDVI数据:NDVI数据来源于NASA EOS/MODIS的2000—2019年MOD13Q1数据集,空间分辨率为250m,时间分辨率为16d。采用国际通用的最大值合成法MVC(Maximum Value Composites)将MOD13Q1产品数据生成时间分辨率为月尺度的NDVI数据;利用MRT(Modis Reprojection Tool)工具将覆盖研究区的图像进行拼接、裁剪等一系列预处理,获得研究区月尺度NDVI数据,用于计算植被覆盖度、植被NPP。

(2)气象数据:气象数据来源于广西气象信息中

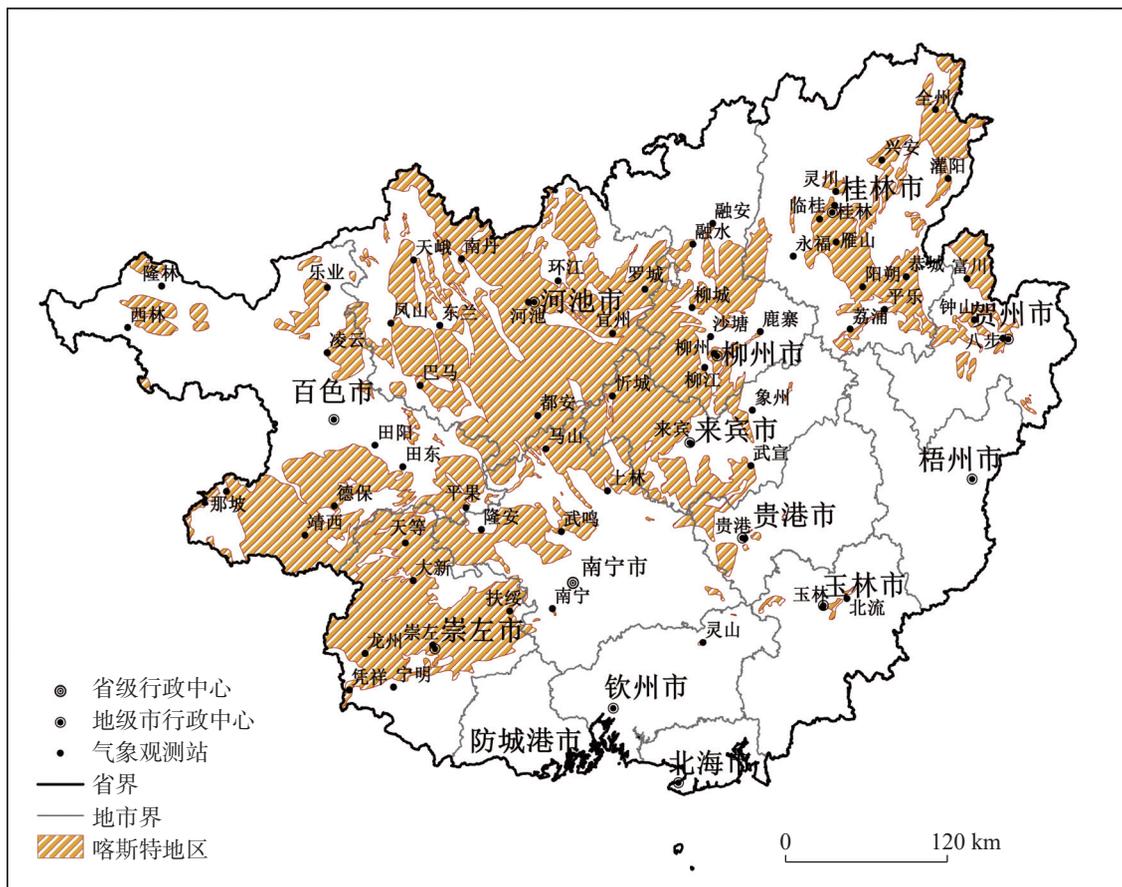


图 1 研究区图

Fig. 1 Map of the study area

心, 选取 2000—2019 年研究区境内 62 个气象站点的逐日平均气温、降水等数据, 计算其月值、年值, 采用反距离权重法插值生成  $250\text{ m} \times 250\text{ m}$  的气象要素栅格数据。

(3) 基础地理信息数据: 基础地理信息数据来源于广西气象信息中心, 主要包括 1:250 000 广西行政边界、行政区点、喀斯特区边界数据。

(4) 植被生态系统类型: 植被生态系统类型使用国家地球系统科学数据共享网提供的中国 1:250 000 植被生态系统类型数据, 空间分辨率为 1 km。采用 GIS 技术, 对其进行相应的裁剪、拼接预处理, 并将其降尺度到统一的空间分辨率。

## 2.2 数据处理

依据植被生态学原理, 从植被多样性功能、植被生产功能、植被生态服务功能, 构建植被综合生态质量评价指标体系。植被多样性通过其生境反映, 采用其地理分布面积表示; 植被生产功能是决定植被分布与量度的内在与外在原因, 采用其生

产力表示; 植被生态服务功能主要指植被对自然生态过程或生态平衡所做出的以经济作为指标评价的贡献, 采用植被覆盖度表示。在此基础上, 采用权重加权法构建植被综合生态质量模型, 利用线性趋势法, 构建植被生态改善模型, 分析植被生态质量时空演变特征。

### 2.2.1 植被净初级生产力 (NPP)

目前, NPP 的估算模型主要包括光能利用率模型、气候生产力模型、生理生态过程模型等, 不同模型都有其优缺点<sup>[18]</sup>。本研究基于植被光能利用原理<sup>[19]</sup>, 根据陆地生态系统碳通量模型 (TEC), 利用 NDVI 数据、地面气象观测资料, 计算 2000—2019 年空间分辨率为 250 m 的广西喀斯特地区植被 NPP, 公式如下:

$$NPP_{ij} = GPP_{ij} - R_{ij} \quad (1)$$

$$GPP_{ij} = \varepsilon_{ij} \times FPAR \times PAR_{ij} \quad (2)$$

式中:  $NPP_{ij}$ 、 $GPP_{ij}$ 、 $R_{ij}$  分别为第  $i$  年第  $j$  月的植被净初级生产力、总初级生产力、呼吸消耗量, 单位为克

碳每平方米( $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$ );  $\varepsilon$  为植被所吸收的光合有效辐射转化为有机物的转化率, 即光能转化率, 单位为克碳每兆焦 ( $\text{gC}\cdot\text{MJ}^{-1}$ );  $FPAR$  为植被吸收光合有效辐射的比例, 是随植被生长而变化的量, 本文利用逐月  $NDVI$  估测逐月  $FPAR$ ;  $PAR$  为植被所利用的光合有效辐射, 单位为兆焦每平方米( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ), 采用世界粮农组织推荐的方法由气象站日照时数计算太阳总辐射, 然后根据入射光合有效辐射占太阳总辐射的比例 0.48 计算  $PAR$ 。

$FPAR$  计算公式如下:

$$FPAR = \frac{(VI - VI_{i,\min})(FPAR_{\max} - FPAR_{\min})}{VI_{i,\max} - VI_{i,\min}} + FPAR_{\min} \quad (3)$$

$VI$  与  $NDVI$  之间存在如下换算关系:

$$VI = \frac{1 + NDVI}{1 - NDVI} \quad (4)$$

式中:  $FPAR_{\max}=0.950$ ,  $FPAR_{\min}=0.001$ ,  $FPAR_{\max}$  和  $FPAR_{\min}$  不随植被类型变化。 $VI_{i,\max}$  对应着第  $i$  植被类型  $FPAR$  达到最大值时的  $NDVI_{i,\max}$  值;  $VI_{i,\min}$  对应于第  $i$  植被类型  $FPAR$  最小时的  $NDVI_{i,\min}$  值。

### 2.2.2 植被覆盖度 (FVC)

基于 MODIS  $NDVI$  数据, 利用像元线性分解法<sup>[20]</sup>, 计算 2000—2019 年空间分辨率为 250 m 的广西喀斯特地区植被覆盖度, 公式如下:

$$FVC_{ij} = (NDVI_{ij} - NDVI_o) / (NDVI_g - NDVI_o) \quad (5)$$

式中:  $FVC_{ij}$  为第  $i$  年第  $j$  月植被覆盖度;  $NDVI_{ij}$  为第  $i$  年第  $j$  月  $NDVI$  合成数据;  $NDVI_o$  为裸土或无植被覆盖区域  $NDVI$  值, 即无植被像元  $NDVI$  值;  $NDVI_g$  代表完全被植被所覆盖的像元  $NDVI$  值, 即纯植被像元  $NDVI$  值。当最大植被覆盖度可以近似取 100% 且最小植被覆盖度可以近似取 0 时, 可得  $NDVI_g = NDVI_{\max}$  和  $NDVI_o = NDVI_{\min}$ ; 当最大、最小植被覆盖度不能分别近似取 100% 和 0 时, 需要有一定量的实测数据, 那么只需要取一组实测数据中的植被覆盖的最大值与最小值, 并在图像中找到这两个实测数据所对应像元的  $NDVI$  值。本研究中根据研究区植被特点, 参照前人研究成果<sup>[21]</sup>,  $NDVI_o=0.05$ ,  $NDVI_g=0.95$  计算月植被覆盖度。

### 2.2.3 植被综合生态质量指数 (QI)

植被净初级生产力( $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}$ )是个绝对量, 植被覆盖度 (%) 是个相对量值, 以像元为单元尺度, 关键问

题可转化为单位面积的植被净初级生产力与植被覆盖度二者的问题。因此, 基于植被净初级生产力和植被覆盖度, 钱拴等<sup>[8]</sup>采用权重加权法构建植被综合生态质量模型, 定量描述植被生态质量的高低, 计算公式为:

$$Q_i = 100 \left( f_1 \times \frac{NPP_i}{NPP_m} + f_2 \times FVC_i \right) \quad (6)$$

式中:  $Q_i$  为第  $i$  年植被综合生态质量指数;  $FVC_i$  为第  $i$  年平均植被覆盖度, 由全年 12 个月植被覆盖度取平均值获得;  $NPP_i$  为第  $i$  年植被净初级生产力, 由全年 12 个月累加值获得;  $NPP_m$  为某时段年植被  $NPP$  的历史最高值, 即空间区域范围内相应时段最好气候条件下的年植被  $NPP$ ;  $f_1$ 、 $f_2$  分别为权重系数 ( $f_1=0.5$ ,  $f_2=0.5$ )。

根据植被生态恢复“相似生境”原则, 在局地地貌、气候等生境相似区, 植被最终恢复形成的景观具有相似性<sup>[22]</sup>。由公式(6)得知,  $NPP_m$  表征的是植被的潜在最大净初级生产力, 对于同一气候区内同一植被类型, 其植被  $NPP_m$  应具有相似值, 反之, 则植被  $NPP_m$  不同。植被类型和气候条件是决定  $NPP_m$  的关键。因此, 针对喀斯特地区不同气候区, 构建不同植被类型  $NPP_m$  边缘函数, 确定植被  $NPP$  的潜在极大值。思路如下: 首先, 利用气候资料计算研究区多年湿润指数, 划定气候梯度; 其次计算相应时段的植被  $NPP_m$ , 分析湿润指数与植被  $NPP_m$  的相关性, 构建不同植被  $NPP_m$  边缘函数, 确定气候梯度内植被潜在生产力的自然“基准”, 改进植被综合生态质量指数模型, 建立广西喀斯特地区植被综合生态质量模型。

#### (1) 湿润指数计算方法

湿润指数 (MI) 是指年降水量与同期潜在蒸散之比, 其计算公式为<sup>[23]</sup>:

$$MI = \frac{P}{PE} \quad (7)$$

式中:  $MI$  为湿润指数,  $P$  为年降水量;  $PE$  为年潜在蒸散。

采用 Thornthwaite 方法计算潜在蒸散, 公式为<sup>[24]</sup>:

$$PE = \sum_{i=1}^{12} PE_i \quad (8)$$

$$PE_i = \begin{cases} 0, & T_i \leq 0 \\ 16 * \left( 10 \frac{T_i}{I} \right)^a, & 0 < T_i \leq 26.5 \\ a_1 + a_2 T_i + a_3 T_i^2, & T_i > 26.5 \end{cases} \quad (9)$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left( \frac{T_i}{5} \right)^{1.514} \quad (10)$$

$$a = 0.675 \times 10^{-6} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.792 \times 10^{-2} I + 0.49239 \quad (11)$$

式中： $PE_i$  为月潜在蒸散； $I$  为年热量指数； $T_i$  为第  $i$  月均温； $a$  为因地而异的常数； $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  为常数， $a_1=4\ 158.547$ ， $a_2=322.441$ ， $a_3=4.325$ 。

(2) 植被  $NPP_m$  边缘函数构建方法

根据研究区年度湿润指数分布特点，以一定间隔划分气候区。利用 GIS 技术，将植被类型数据与气候区进行叠加分析，得到森林、灌草、农田植被的气候分区。采用统计分析方法，统计森林、灌草、农田植被每类气候区中  $NPP_m$  概率分布图，为避免误差，选取概率分布的 95% 分位数所对应的  $NPP_m$  值作为植被净初级生产力上限值。上限值一定程度上表达了每个气候区内植被性能和生产力的最大能力。分析气候区每类植被类型的极大值和每类植被气候区间湿润指数的中值的相关性，利用多项式回归分析方法，建立研究区森林、灌草、农田植被的  $NPP_m$  边缘函数。

2.2.4 植被生态改善模型

植被生态质量变化趋势率可用来反映植被生态质量在一段时间内的变化速度，运用线性趋势法，构建植被生态改善指数，计算公式为<sup>[25]</sup>：

$$Q_c = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times Q_i - \left( \sum_{i=1}^n i \right) \left[ \sum_{i=1}^n Q_i \right]}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left[ \sum_{i=1}^n i \right]^2} \quad (12)$$

式中： $Q_c$  为植被生态改善指数， $Q_i$  为第  $i$  年的年植被生态质量； $n$  为要评价的年限。 $Q_c > 0$  表示在某段时间研究区域植被生态改善，反之植被退化。

3 结果与分析

3.1 广西喀斯特地区植被生态质量模型

基于湿润指数、植被  $NPP$  计算方法，利用统计分析方法，统计 2000—2019 年广西喀斯特地区年湿润指数平均值、年植被净初级生产力极大值，结果见图 2。2000—2019 年广西喀斯特地区年湿润指数平均值、年植被净初级生产力极大值空间差异较大。广西喀斯特地区年平均湿润指数由桂东北向桂西南递减，湿润指数在 0.90~2.45 之间，平均值为 1.45，气候条件较湿润，高值区主要分布在桂东北的桂林市、柳州市，低值区主要分布在桂西南的崇左市、桂西北的百色市；年植被净初级生产力极大值在 500~1 500  $gC \cdot m^{-2}$  之间，平均值为 1 100  $gC \cdot m^{-2}$ ，高值区主要分布在河池市北部、来宾市西北部、百色市西南部、崇左市北部。

根据广西喀斯特地区年湿润指数平均值分布特点，参考相关研究成果<sup>[23]</sup>，以 0.05 间隔，划分为 30 个气候区。统计分析各气候区内森林、灌草、农田植被年净初级生产力极大值  $NPP_m$  的 95% 分位数与对应气候区内年湿润指数的中值的相关关系，结果见图 3。2000—2019 年广西喀斯特地区湿润条件与植被生产力的相关性存在差异。不同植被类型，植被  $NDVI$  存在差异，在不同气候区，则植被  $NPP_m$  不

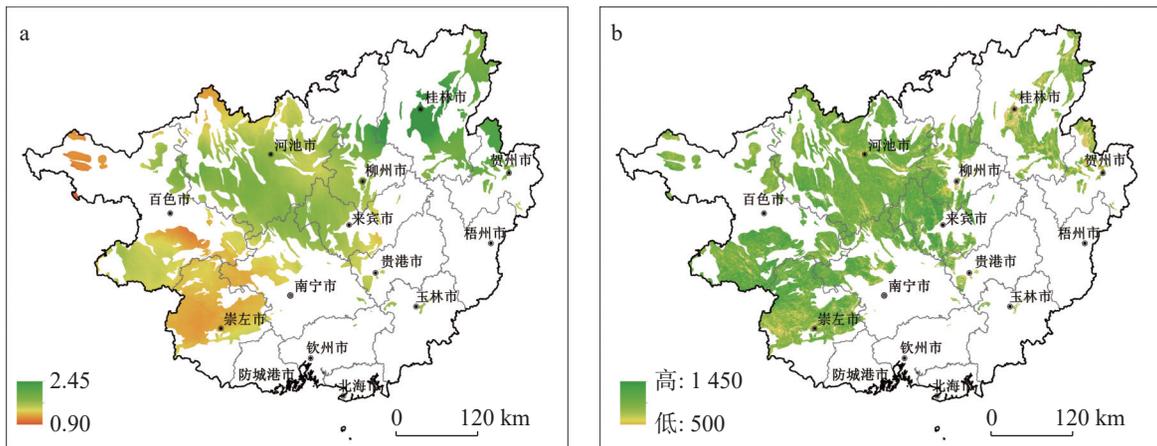


图 2 2000—2019 年广西喀斯特地区年湿润指数平均值(a)与年植被  $NPP$  极大平均值图(b)

Fig. 2 Distribution of MI (a) and  $NPP_m$  from 2000 to 2019 (b)

同。森林  $NPP_m > 灌草 NPP_m > 农田 NPP_m$ ，且随气候湿润指数先增加后降低。其中，森林区： $1.0 < MI \leq 1.3$ ，森林  $NPP_m$  值增加， $MI > 1.3$ ，森林  $NPP_m$  开始降低；灌草区： $1.0 < MI \leq 1.2$ ，灌草  $NPP_m$  值增加， $MI > 1.2$ ，灌草  $NPP_m$  开始降低；农田区： $1.0 < MI \leq 1.1$ ，农田  $NPP_m$  值增加， $MI > 1.1$ ，农田  $NPP_m$  开始降低。地表湿度的增

加促进了植被的生长，使植被生产力生长迅速，但随着湿润指数的增加，喀斯特植被稀疏地区基岩混杂，浅薄土层的保水保墒能力较差，丰富的降水并不利于植被生长且会加剧水土流失，从而导致植被生产力的降低。

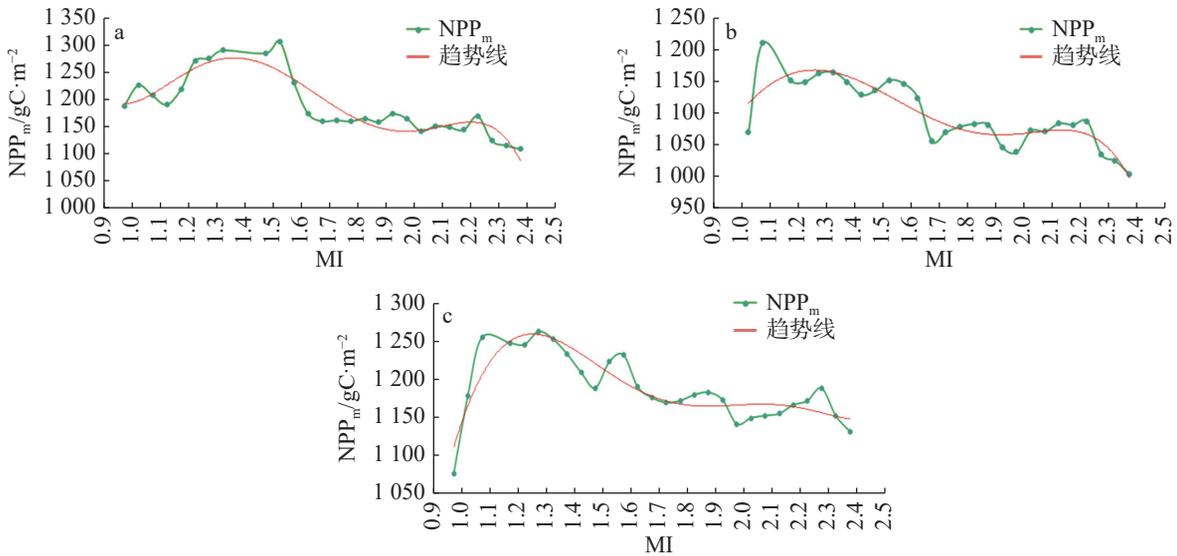


图3 2000—2019年广西喀斯特地区植被  $NPP_m$  与湿润指数关系(a.森林; b.灌草; c.农田)

Fig. 3 Relationship between  $NPP_m$  and MI in the karst area of Guangxi from 2000 to 2019 (a. forest; b. thickets and grass; c. farmland)

以植被  $NPP_m$  为因变量(Y)，MI 为自变量(X)，利用一元多次回归分析法，拟合植被  $NPP_m$  与 MI 关系，建立广西喀斯特地区森林、灌草、农田植被的边缘函数  $NPP_m(MI)$  (表1)。拟合结果表明： $NPP_m$  边缘函数的拟合优度良好，决定系数  $R^2$  均大于 0.8。基于植被综合生态质量指数(QI)，利用  $NPP_m(MI)$  边缘函数，建立广西喀斯特地区植被生态质量模型(MQI)，公式如下：

$$MQ_i = 100 \left( f_1 \times \frac{NPP_i}{NPP_m(MI)} + f_2 \times FVC_i \right) \quad (13)$$

式中： $MQ_i$  为第  $i$  月或季或年植被综合生态质量指数； $FVC_i$  为对应第  $i$  月或季(季度内各月平均值)或年(年内各月平均值)植被覆盖度； $NPP_i$  为对应第  $i$  月或季(季度内各月累加值)或年(年内各月累加值)植被  $NPP$ ； $NPP_m(MI)$  为植被  $NPP_m$  边缘函数(表1)； $f_1$ 、 $f_2$  分别为权重系数( $f_1=0.5, f_2=0.5$ )。

表1 广西喀斯特地区植被  $NPP_m$  边缘函数

Table 1 Edge function of  $NPP_m$  in the karst area of Guangxi

植被类型	$NPP_m(Y)$	$MI(X)$	模型	决定系数( $R^2$ )
森林	$FOR\_NPP_m$	$MI$	$Y=347.1X^3-1\ 844.3X^2+3\ 052.4X-359$	0.8653
灌草	$GRS\_NPP_m$	$MI$	$Y=264.73X^3-1\ 394.3X^2+2\ 308.4X$	0.9046
农田	$FAR\_NPP_m$	$MI$	$Y=162.6X^3-860.98X^2+1\ 370.5X+462.97$	0.8087

### 3.2 广西喀斯特地区植被生态质量时空演变特征

利用 MQI 模型，计算 2000—2019 年年度、季度、月份的广西喀斯特地区植被生态质量指数，结果见图 4。2000—2019 年广西喀斯特地区植被生态质量年度、季度、月份时空差异显著。广西喀斯特地区

年度植被综合生态质量指数在 50~80 之间，时间上呈现波动式增加趋势，增加速率为 5.57/10 a(通过  $\alpha=0.1$  信度检验，故年植被综合生态质量指数变化趋势显著)；季度与月份植被生态质量大致呈现抛物线形式，其中，季度植被生态质量表现为“夏秋高、冬

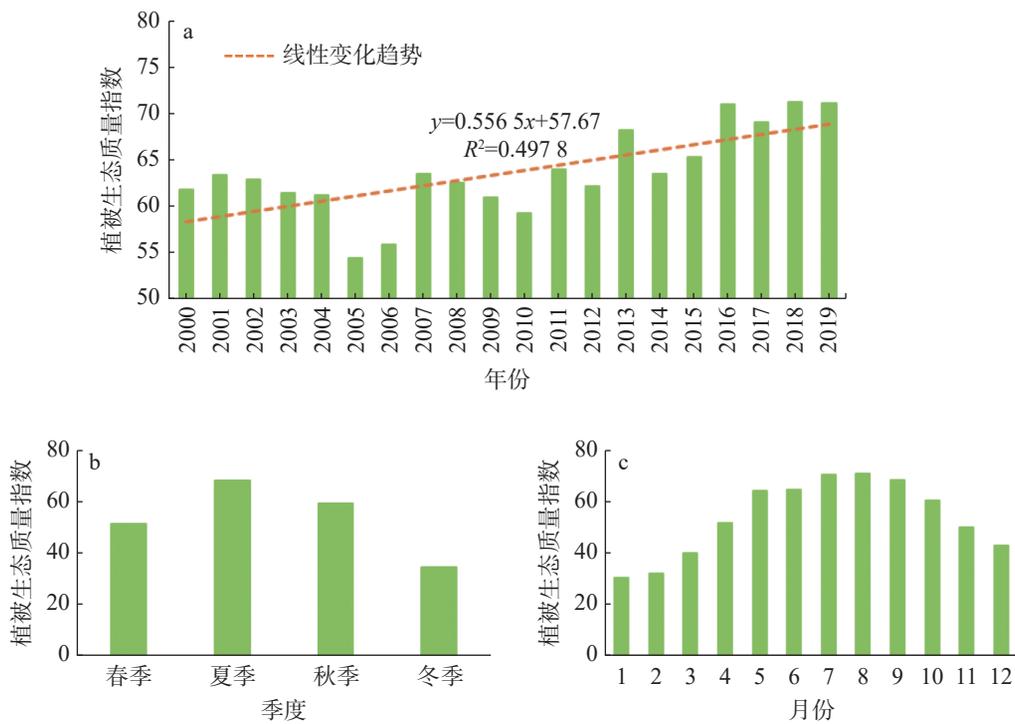


图 4 2000—2019 年广西喀斯特地区植被生态质量指数变化图(a.年度; b.季度; c.月份)

Fig. 4 Change of vegetation ecological quality in the karst area of Guangxi from 2000 to 2019 (a. year; b. quarter; c. month)

春低”的特点,夏季(6—8月)植被生态质量最高(68.5),秋季(9—11月)次之(59.6),冬季(12—2月)最低(35.1);月植被生态质量均值 53.7,最高值出现在 8 月(70.7),最低值出现在 1 月(30.3),年内植被生态质量变幅最大达 40.4。

根据广西喀斯特地区植被生态质量的实际情况,参考《陆地植被气象与生态质量监测评价等级》<sup>[26]</sup>气象行业标准等级划分,确定广西喀斯特地区植被生态质量监测评估等级指标。以每 5 a 为统计时段,统计分析 2000—2019 年不同时段广西喀斯特地区植被质量时空变异特征,结果见表 2 和图 5。2000—2004 年广西喀斯特地区有 96.25% 的区域植被生态质量正常偏好,主要分布在河池市西北部、柳州市中

部、崇左市北部;2005—2009 年可能受自然灾害影响,较 2000—2004 年植被生态质量总体稍下降,有 92.92% 的区域植被生态质量偏好以上,主要分布在百色市南部、崇左市北部;2010—2014 年区域植被生态质量逐渐恢复,有 97.14% 的区域植被生态质量偏好以上,主要分布在河池市西部和北部、百色市南部、崇左市北部;2015—2019 年有 99.07% 的区域植被生态质量偏好以上,其中,植被生态质量较好、好等级占比分别为 42.21%、49.80%,大部分植被生态质量总体趋向好的态势发展。

### 3.3 广西喀斯特地区植被生态改善时空演变特征

基于广西喀斯特地区植被生态质量指数( $MQ_i$ ),

表 2 2000—2019 年各时段广西喀斯特地区植被生态质量等级面积及比例统计

Table 2 Statistics of grade, area and proportion of vegetation ecological quality in the karst area of Guangxi in different periods from 2000 to 2019

生态质量指数( $MQ_i$ )	等级	2000—2004年		2005—2009年		2010—2014年		2015—2019年	
		面积/ $km^2$	比例/%						
$\leq 20$	差	217.32	0.32	324.00	0.47	254.86	0.37	139.29	0.20
$> 20 \sim 40$	偏差	2 353.64	3.43	4 535.71	6.61	1 709.94	2.49	493.29	0.72
$> 40 \sim 60$	偏好	22 429.71	32.71	31 385.14	45.77	20 758.29	30.27	4 844.31	7.06
$> 60 \sim 70$	较好	36 439.83	53.14	29 519.90	43.05	40 829.98	59.54	28 947.34	42.21
$\sim 70$	好	7 136.19	10.40	2 811.94	4.10	5 023.63	7.33	34 152.38	49.80

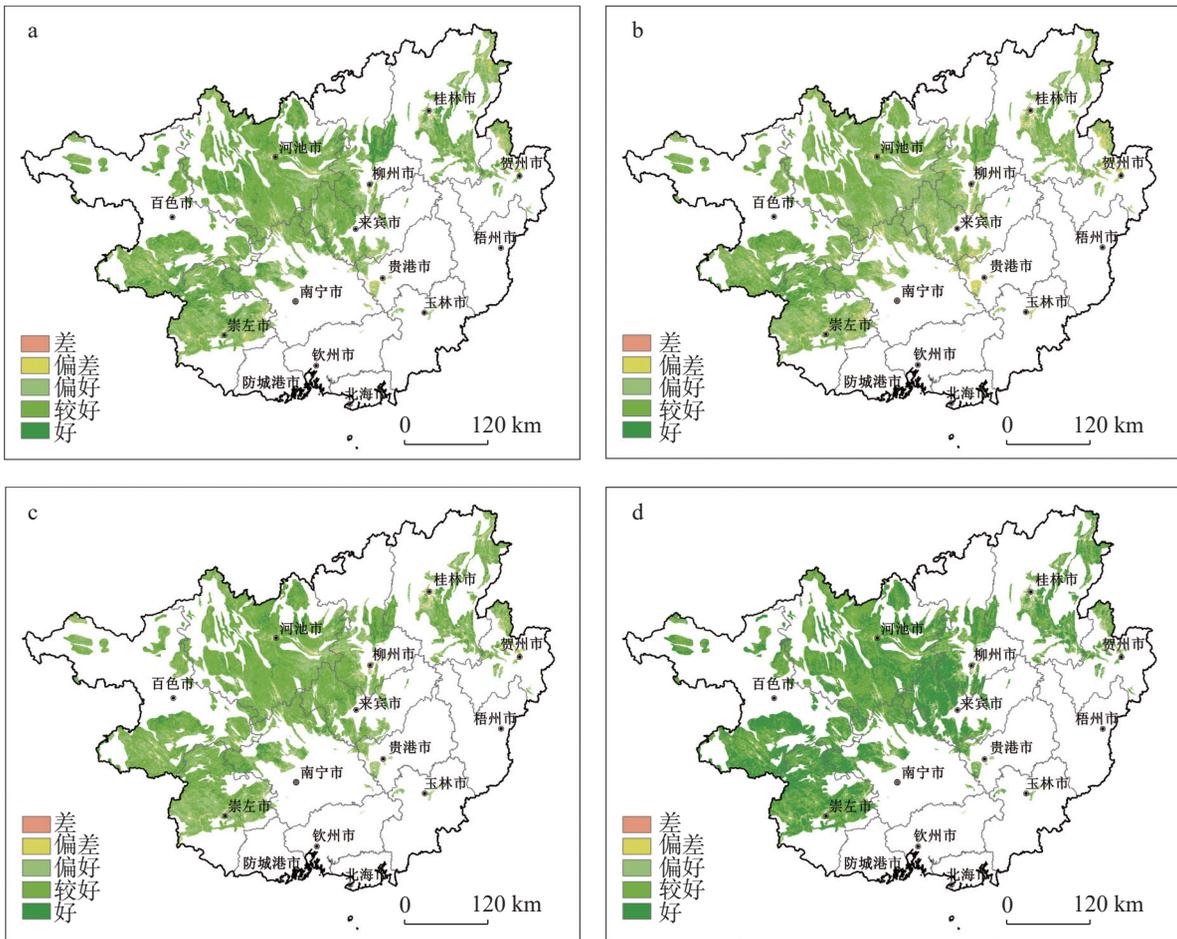


图 5 2000—2019 年广西喀斯特地区植被生态质量空间变异分布图

(a.2000—2004 年; b.2005—2009 年; c.2010—2014 年; d.2015—2019 年)

Fig. 5 Spatial variation distribution of vegetation ecological quality in the karst area of Guangxi

(a. 2000—2004; b. 2005—2009; c. 2010—2014; d. 2015—2019)

以 2000 年为基准, 利用植被生态改善模型, 分别计算 2000—2004 年、2000—2009 年、2000—2014 年、2000—2019 年不同时间段的广西喀斯特地区植被生态改善指数 ( $MQ_c$ )。利用自然断点法, 结合植被生态改善的实际情况, 确定广西喀斯特地区植被生态改善评价等级指标, 结果见表 3 和图 6。2000—2019 年, 广西喀斯特地区植被生态改善指数为  $0.71/20 a$ , 植被生态显著提升, 有 98.83% 的区域植被生态质量在 20 a 期间呈上升趋势, 大部区域植被生态改善良好。其中 2000—2004 年广西喀斯特地区植被生态改善指数为  $-0.32/5 a$ , 总体区域植被生态变差, 改善缓慢, 有 58.85% 的区域植被生态质量在 5 a 期间呈下降趋势, 主要分布在河池市南部、百色市南部、柳州中部、崇左市中部、南宁市北部, 但仍有 16.56% 的区域植被生态质量呈较明显提高趋势, 主要分布在河池市西北部、崇左市北部、来宾市西部; 2000—2009 年, 广

西喀斯特地区植被生态改善指数为  $-0.20/10 a$ , 较 2000—2004 年植被生态改善指数提高了 0.12, 植被生态改善逐步提升, 但可能受自然灾害或人为影响, 仍有 64.60% 的区域植被生态质量在 10 a 期间呈下降趋势, 主要分布在河池市东南部、百色市东北部、崇左市中部、柳州市中部、来宾市西部; 2000—2014 年, 广西喀斯特地区植被生态改善指数为  $0.15/15 a$ , 植被生态逐渐恢复, 有 62.43% 的区域植被生态质量在 15 a 期间呈上升趋势, 主要分布在河池市北部、崇左市东北部。综上所述, 广西喀斯特地区植被生态质量时空演变特征显著: 在时间上, 20 a 期间植被生态逐步恢复改善, 在空间上, 植被生态改善等级空间逐步扩大。

### 3.4 MQI 与 QI 对比

利用 QI 模型计算 2000—2019 年度广西喀斯特地区植被生态质量指数 ( $Q_c$ ), 在此基础上, 计算广西

表 3 2000—2019 年广西不同时段植被生态改善面积及占比统计  
Table 3 Statistics of improvement degree of vegetation ecology and proportion in the karst area of Guangxi in different periods from 2000 to 2019

生态改善指数( $MQ_c$ )	等级	2000—2004年		2000—2009年		2000—2014年		2000—2019年	
		面积/ $km^2$	比例/%						
$\leq -1.0$	明显变差	20 746.45	30.25	4 906.76	7.16	206.44	0.30	22.13	0.03
$> -1.0 \sim -0.5$	变差	9 395.92	13.70	14 903.45	21.74	2 735.87	3.99	68.61	0.10
$> -0.5 \sim 0.0$	略变差	10 217.86	14.90	24 474.07	35.70	22 824.12	33.28	697.48	1.04
$> 0.0 \sim 0.5$	略变好	9 452.25	13.78	17 591.07	25.66	33 262.74	48.51	14 192.59	21.12
$> 0.5 \sim 1.0$	变好	7 416.11	10.81	5 564.83	8.12	8 535.98	12.45	41 638.30	61.96
$> 1.0$	明显变好	11 348.10	16.56	1 111.00	1.62	1 007.09	1.47	10 578.78	15.75

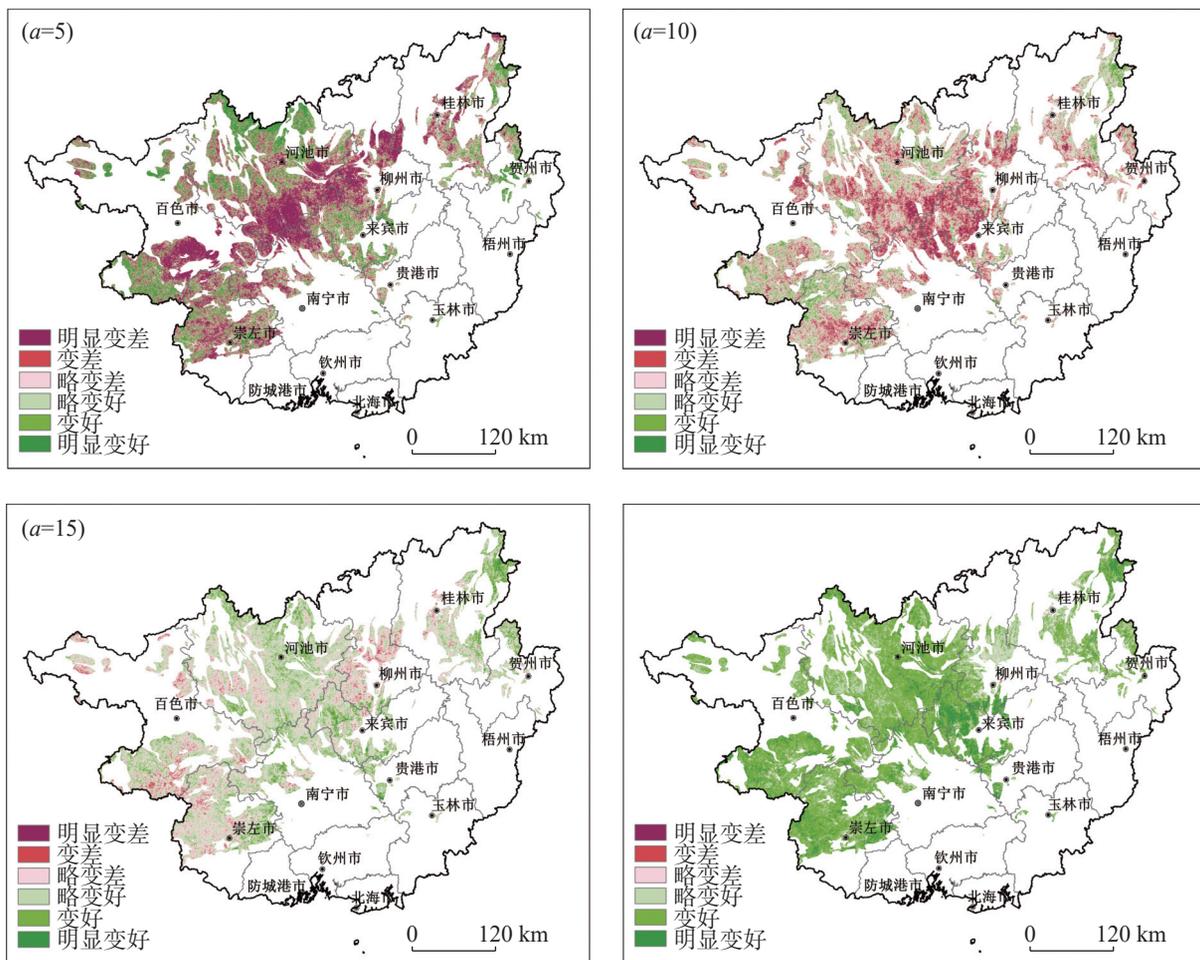


图 6 2000—2019 年不同时段广西喀斯特地区植被生态改善程度分布图

Fig. 6 Distribution of improvement degree of vegetation ecology in the karst area of Guangxi in different periods from 2000 to 2019

喀斯特地区植被生态改善指数( $Q_c$ ), 与  $MQ_i$ 、 $MQ_c$  进行对比, 分析植被生态质量模型的适宜性。由表 4 可知: 从植被生态质量等级看,  $MQ_i$  较  $Q_i$  等级高, 其中,  $Q_i$ : 2000—2004 年、2005—2009 年、2010—2014 年时段为中等偏好等级, 2015—2019 年时段为较好等级;  $MQ_i$ : 2000—2004 年、2010—2014 年时段为较

好等级、2004—2009 年为中等偏好等级、2015—2019 年为好等级。从不同植被生态系统类型看, 基于 MQI 模型的森林生态质量较 QI 模型提升快。 $Q_i$ : 2000—2004 年、2005—2009 年、2010—2014 年时段, 灌草>森林>农田, 2015—2019 年时段, 森林>灌草>农田;  $MQ_i$ : 2000—2004 年、2005—2009 年时段, 灌

表4 2000—2019年不同时段广西喀斯特地区植被生态质量对比  
Table 4 Comparative analysis of the indexes of vegetation ecological quality in the karst area of Guangxi in different periods from 2000 to 2019

时段/年	植被生态质量	森林	灌草	农田	均值
2000—2004	$Q_i$	57.83	59.05	51.00	55.96
	$MQ_i$	62.19	63.87	57.68	61.25
2000—2004	$Q_c$	-0.05	-0.37	-0.18	-0.20
	$MQ_c$	-0.07	-0.43	-0.24	-0.25
2005—2009	$Q_i$	55.67	56.59	48.92	53.73
	$MQ_i$	60.86	61.08	55.13	59.02
2000—2009	$Q_c$	-0.05	-0.20	-0.14	-0.13
	$MQ_c$	-0.08	-0.24	-0.19	-0.17
2010—2014	$Q_i$	58.33	59.06	51.57	56.49
	$MQ_i$	65.93	64.79	60.22	63.65
2000—2014	$Q_c$	0.20	0.05	0.12	0.12
	$MQ_c$	0.25	0.07	0.15	0.15
2015—2019	$Q_i$	66.77	65.42	58.22	63.47
	$MQ_i$	71.76	70.76	67.75	70.09
2000—2019	$Q_c$	0.26	0.09	0.14	0.16
	$MQ_c$	0.81	0.68	0.73	0.74

草>森林>农田, 2010—2014年、2015—2019年时段, 森林>灌草>农田。从植被生态质量变化趋势看, 至2004年、2009年, 植被生态质量变化趋势较慢, 且 $Q_c > MQ_c$ , 至2014年, 植被生态质量变化趋势逐步加快, 且 $MQ_c > Q_c$ , 至2019年, 植被生态质量变化趋势迅速加快, 且 $MQ_c$ 较 $Q_c$ 更明显。其中, 森林植被生态改善最快, 为0.81/20 a。

#### 4 讨论

本研究结果显示, 广西喀斯特地区湿润指数较高, 气象条件较好, 有利于植被生长, 植被 $NPP_m$ 呈增加趋势, 但湿润指数的继续增加, 不利于植被生长,  $NPP_m$ 呈降低趋势; 植被 $NPP_m$ 是随气候条件变化的动态值, 且不同植被类型 $NPP_m$ 不同, 对气候条件的响应也不同, 其中农田植被响应最敏感, 灌草次之、森林最弱。王冰等<sup>[27]</sup>指出气候的湿润程度对喀斯特地区植被指数的变化影响较大。熊康宁等<sup>[28]</sup>研究也表明, 林地植被覆盖率高, 气候湿润程度对区域植被覆盖的变化影响减小。可见, 相同植被类型和气候条件下, 植被生态恢复潜力具有区域相似性特征, 反之, 则具有异质性特征, 这与“植被生境越相似的区域, 植被生态恢复越接近”的原则一致。基于湿润指

数构建的植被 $NPP_m$ 边缘函数, 能准确反映出气候梯度内植被生态恢复潜在生产力的自然“基准”, 以此构建的广西喀斯特地区生态质量模型, 能指示气候变化对区域植被生长的影响, 适宜监测评估广西喀斯特地区植被生态质量。

前人研究结果表明, 气候变化背景下的干旱、洪涝及极端气温变化等极端气象灾害造成森林覆盖率、森林质量、森林固碳能力有一定下降, 林地涵养水源、调蓄抗洪、保持水土等生态功能降低<sup>[29]</sup>。2004年、2005年、2006年、2009年广西喀斯特地区旱情严重( $SPEI < 1.5$ )<sup>[30]</sup>。2008年初, 广西遭受历史罕见的低温雨雪冰冻灾害, 大量林木被损毁, 受害森林面积168.59万 $hm^2$ , 占全区森林面积的13.02%, 生态环境受到严重影响<sup>[31]</sup>。本研究结果显示, 2005—2009年广西喀斯特地区平均植被生态质量指数为近20 a最低; 从 $QI$ 与 $MQI$ 对比结果看,  $QI$ 模型评价的2000—2004年、2005—2009年时段植被生态质量等级均以中等偏好为主, 而 $MQI$ 模型评价的2000—2004年时段植被生态质量等级以较好等级为主、2005—2009年时段以中等偏好等级为主, 这说明由于2005—2009年时段气象灾害的影响,  $MQI$ 模型评价的2005—2009年时段较2000—2004年时段的生态质量等级降低了一等级。由此可知,  $MQI$ 模

型较 QI 模型更能体现广西喀斯特地区气象灾害对生态敏感性、生态脆弱性的影响作用,更适应该区域评价。

喀斯特地区生态恢复治理工程显示,1999 年以来,国家实施多项退耕还林和石漠化治理工程,特别是黔滇桂喀斯特区石漠化综合治理工程,增加对林草植被保护的投入<sup>[32]</sup>。广西各级政府也十分重视石漠化综合防治和喀斯特地区的扶贫攻坚工作,防治工作主要经历了试点(2006—2010 年)、示范性推广和综合治理(2011—2020 年)阶段。前人研究结果表明,以林业生态建设为中心的石漠化治理工程对减少石漠化起到了显著效果,2012 年广西石漠化减少面积在全国 8 个石漠化省区中最多,全区森林覆盖率达 61.4%,跃居全国第三<sup>[33]</sup>;2002—2015 年广西石漠化呈逐渐减少趋势,石漠化程度得到控制<sup>[34]</sup>。2000 年以来在生态工程实施背景下中国西南喀斯特地区植被指数、生产力和生物量明显增加,特别是桂西北等地区<sup>[35-39]</sup>。2000 年以来影响喀斯特地区植被变化的因素不是单一的人为影响或者气候变化,而是社会经济发展、生态政策、人类活动等因素共同作用的结果。本研究结果表明,2000—2019 年广西喀斯特地区年度植被综合生态质量指数呈现波动式增加趋势,年际植被生态质量发展经历了缓慢增长、逐步增长、迅速增长、显著提升 4 个演变阶段,这与广西喀斯特地区石漠化治理阶段是基本一致的。同时,月份与季度尺度的广西喀斯特地区植被生态质量大致呈现抛物线形式,8 月最高、1 月最低,“夏秋高、冬春低”特点的研究结果与广西气候特点也相对应。MQI 模型能较好表征广西喀斯特地区植被生态质量的发展演变历程和对气候变化的响应。

气候变化、气象灾害、人类活动对区域植被生态质量的不同尺度时空演变均产生深远影响。广西喀斯特地区植被生态质量年、季、月时空演变异质性较大。本研究植被生态质量评价方法,更适用于广西喀斯特地区植被生态质量的不同时空尺度的监测评估,对区域植被生态质量的精准化评价有可推广与应用的价值。但本研究尚未研究出植被生态质量变化的气象条件、气象灾害、人类活动贡献率的定量化评价。在此基础上,有待进一步深入研究基于气象模型模拟的潜在植被净初级生产力和植被覆盖度,估算潜在植被生态质量指数,构建植被生态质量变化气象条件、气象灾害、人类活动贡献率评价模型。

## 5 结 论

(1)广西喀斯特地区不同气候条件下植被生态恢复潜力差异明显。植被 NPP<sub>m</sub> 是随气候条件变化的动态值,不同植被类型生产潜力对气候条件的响应不同,其中农田植被响应最敏感,灌草次之、森林最弱;

(2)广西喀斯特地区植被生态质量月份、季度、年度、年际尺度时空差异显著。时间上,月份与季度植被生态质量指数呈现抛物线形式;年度植被生态质量指数呈现波动式增加趋势;年际植被生态质量发展经历了缓慢增长、逐步增长、迅速增长、显著提升 4 个演变阶段。空间上,植被生态质量由广西喀斯特地区东北部向西南部、北部向南部逐渐递增,植被生态质量总体良好;

(3)广西喀斯特地区植被生态改善显著提升。2000—2019 年,广西喀斯特地区植被生态改善指数为 0.71/20 a,有 98.83% 的区域植被生态质量在 20 a 期间呈上升趋势,大部区域植被生态改善良好,主要得益于国家实施的退耕还林、石漠化治理工程和广西良好的气候条件;

(4)广西喀斯特地区植被生态质量模型区域适宜性较高,能精细化、精准化反映广西喀斯特地区植被生态质量的时空演变特征。

## 参 考 文 献

- [1] Yuan Fei, Bauer M E. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 106(3): 375-386.
- [2] Wright C K, De Beurs K M, Henebry G M. Combined analysis of land cover change and NDVI trends in the Northern Eurasian grain belt[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2012, 6(2): 177-187.
- [3] 吕妍,张黎,闫慧敏,任小丽,王军邦,牛忠恩,顾峰雪,何洪林. 中国西南喀斯特地区植被变化时空特征及其成因[J]. *生态学报*, 2018, 38(24): 8774-8786.  
LYU Yan, ZHANG Li, YAN Huimin, REN Xiaoli, WANG Junbang, NIU Zhongen, GU Fengxue, HE Honglin. Spatial and temporal patterns of changing vegetation and the influence of environmental factors in the karst region of Southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(24): 8774-8786.
- [4] 毛留喜,李朝生,侯英雨. 2006年上半年全国生态气象监测与评估研究[J]. *气象*, 2006, 32(12): 88-95, 141-142.  
MAO Liuxi, LI Chaosheng, HOU Yingyu. China meteorologically-driven ecological monitoring and assessment in the first

- half of 2006[J]. *Meteorological Monthly*, 2006, 32(12): 88-95, 141-142.
- [5] 毛留喜, 钱拴, 侯英雨. 2006年夏季川渝高温干旱的生态气象监测与评估[J]. *气象*, 2007, 33(3): 83-88, 132-133.  
MAO Liuxi, QIAN Shuan, HOU Yingyu. Study on the meteorologically-driven ecological monitoring and assessment of high temperature and drought of Sichuan-Chongqing area in summer 2006[J]. *Meteorological Monthly*, 2007, 33(3): 83-88, 132-133.
- [6] 钱拴, 毛留喜, 侯英雨. 北方草地生态气象综合监测预测技术及其应用[J]. *气象*, 2008, 34(11): 62-68, 130.  
QIAN Shuan, MAO Liuxi, HOU Yingyu. Technology and application of ecology meteorological synthetic monitoring and predicting for northern grassland in China[J]. *Meteorological Monthly*, 2008, 34(11): 62-68, 130.
- [7] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用[J]. *生态学报*, 2013, 33(24): 7853-7862.  
XU Hanqiu. A remote sensing urban ecological index and its application[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(24): 7853-7862.
- [8] 钱拴, 延昊, 吴门新. 植被综合生态质量时空变化动态监测评价模型[J]. *生态学报*, 2020, 40(18): 1-11.  
QIAN Shuan, YAN Hao, WU Menxin. Dynamic monitoring and evaluation model for spatio-temporal change of comprehensive ecological quality of vegetation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(18): 1-11.
- [9] 宋美杰, 罗艳云, 段利民. 基于改进遥感生态指数模型的锡林郭勒草原生态环境评价[J]. *干旱区研究*, 2019, 36(6): 1521-1527.  
SONG Meijie, LUO Yanyun, DUAN Limin. Evaluation of ecological environment in the Xilin Gol Steppe based on modified remote sensing ecological index model[J]. *Arid Zone Research*, 2019, 36(6): 1521-1527.
- [10] 邓晨晖, 白红英, 高山, 刘荣娟, 马新萍, 黄晓月, 孟清. 秦岭植被覆盖时空变化及其对气候变化与人类活动的双重响应[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(3): 425-438.  
DENG Chenhui, BAI Hongying, GAO Shan, LIU Rongjuan, MA Xinping, HUANG Xiaoyue, MENG Qing. Spatial-temporal variation of the vegetation coverage in Qinling Mountains and its dual response to climate change and human activities[J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(3): 425-438.
- [11] 陈燕丽, 黄敏堂, 莫伟华. 基于MODIS NDVI的广西西南典型生态区植被变化对比监测[J]. *气象科学*, 2015, 35(1): 93-99.  
CHEN Yanli, HUANG Mintang, MO Weihua. Vegetation variation in typical ecological sections of southwest Guangxi based on MODIS NDVI data[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2015, 35(1): 93-99.
- [12] 童晓伟, 王克林, 岳跃民. 桂西北喀斯特区域植被变化趋势及其对气候和地形的响应[J]. *生态学报*, 2014, 34(12): 3425-3434.  
TONG Xiaowei, WANG Kelin, YUE Yuemin. Trends in vegetation and their responses to climate and topography in northwest Guangxi[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(12): 3425-3434.
- [13] 叶骏菲, 陈燕丽, 莫伟华, 莫建飞, 樊俏丽. 典型喀斯特区植被变化及其与气象因子的关系: 以广西百色市为例[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2019, 13(5): 106-113.  
YE Junfei, CHEN Yanli, MO Weihua, MO Jianfei, FAN Qiaoli. Vegetation variation and its relationship with meteorological factors in typical karst area: A case study in Baise City of Guangxi[J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2019, 13(5): 106-113.
- [14] 董丹, 倪健. 利用CASA模型模拟西南喀斯特植被净第一性生产力[J]. *生态学报*, 2011, 31(7): 1855-1866.  
DONG Dan, NI Jian. Modeling changes of net primary productivity of karst vegetation in Southwestern China using the CASA model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(7): 1855-1866.
- [15] 莫建飞, 莫伟华, 陈燕丽. 基于净初级生产力的广西喀斯特区生物多样性维护功能评价[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(29): 371-377.  
MO Jianfei, MO Weihua, CHEN Yanli. Evaluation of biodiversity maintenance function in karst area of Guangxi based on NPP[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(29): 371-377.
- [16] 马炳鑫, 靖娟利, 徐勇, 何宏昌, 刘兵. 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]. *环境学报*, 2021, 30(12): 2285-2293.  
MA Bingxin, JING Juanli, XU Yong, HE Hongchang, LIU Bing. 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.
- [17] 苏宗明, 李先琨. 广西岩溶植被类型及其分类系统[J]. *广西植物*, 2003, 23(4): 289-293.  
SU Zongming, LI Xiankun. The types of natural vegetation in karst region of Guangxi and its classified system[J]. *Guihaia*, 2003, 23(4): 289-293.
- [18] 林辉. 林业遥感[M]. 北京: 中国林业出版社, 2011.  
LIN Hui. Remote sensing of forestry[M]. Beijing: China Forestry Press, 2011.
- [19] Yan H, Wang S Q, Billesbach D, Oechel W, Bohrer G, Meyers T, Martin T A, Matamala R, Phillips RP, Rahman F. Improved global simulations of gross primary product based on a new definition of water stress factor and a separate treatment of C3 and C4 plants[J]. *Ecological Modelling*, 2015, 297: 42-59.
- [20] 郭妮. 植被指数及其研究进展[J]. *干旱气象*, 2003, 21(4): 71-75.  
GUO Ni. Vegetation index and its advances[J]. *Arid Meteorology*, 2003, 21(4): 71-75.
- [21] 张学玲, 张莹, 牛德奎, 张文元, 李志, 李真真, 郭晓敏. 基于TM NDVI的武功山山地草甸植被覆盖度时空变化研究[J]. *生态学报*, 2018, 38(7): 2414-2424.  
ZHANG Xueling, ZHANG Ying, NIU Dekui, ZHANG Wenyuan, LI Zhi, LI Zhenzhen, GUO Xiaomin. Spatial-tempo-

- ral dynamics of upland meadow coverage on Wugong mountain based on TM NDVI[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(7): 2414-2424.
- [22] Laughlin D C. Applying trait-based models to achieve functional targets for theory-driven ecological restoration[J]. *Ecology Letters*, 2014, 17(7): 771-784.
- [23] 王红岩. 基于NPP和植被降水利用效率土地退化遥感评价与监测技术研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.  
WANG Hongyan. Assessment and monitoring of land degradation using NPP and vegetation rain efficiency[D]. Beijing: China Academy of Forestry, 2013.
- [24] Thornthwaite C W. An approach toward a rational classification of climate[J]. *Geographical Review*, 1948, 38(1): 55-94.
- [25] 张月丛, 赵志强, 李双成. 基于SPOT NDVI的华北北部地表植被覆盖变化趋势[J]. *地理研究*, 2008, 27(4): 745-754, 973.  
ZHANG Yuecong, ZHAO Zhiqiang, LI Shuangcheng. Indicating variation of surface vegetation cover using SPOT NDVI in the northern part of North China[J]. *Geographical Research*, 2008, 27(4): 745-754, 973.
- [26] 全国农业气象标准化技术委员会. 陆地植被气象与生态质量监测评价等级: QX/T 494-2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.  
National Technical Committee of Agricultural Meteorology Standardization. Grade of monitoring and evaluating for terrestrial vegetation meteorology and ecological quality: QX/T 494-2019[S]. Beijing: Standard Press of China, 2019.
- [27] 王冰, 杨胜天. 基于NOAA/AVHRR的贵州喀斯特地区植被覆盖变化研究[J]. *中国岩溶*, 2006, 25(2): 157-162.  
WANG Bing, YANG Shengtian. Change in vegetation cover in Guizhou karst regions based on NOAA/AVHRR[J]. *Carsologica Sinica*, 2006, 25(2): 157-162.
- [28] 熊康宁, 黎平, 周忠发. 喀斯特石漠化的遥感—GIS典型研究: 以贵州省为例[M]. 北京: 地质出版社, 2002.  
XIONG Kangning, LI Ping, ZHOU Zhongfa. Remote sensing—GIS model of rocky desertification in karst: A case study of Guizhou[M]. Beijing: Geology Press, 2002.
- [29] 王剑波, 吴柏海, 曾以禹. 林业与极端天气灾害: 走基于生态系统的综合风险管理之路[J]. *林业经济*, 2012, 11(11): 24-29.  
WANG Jianbo, WU Baihai, ZENG Yiyu. Forestry and natural disaster: Toward the ecosystem-based approaches for integrate risk management[J]. *Forestry Economics*, 2012, 11(11): 24-29.
- [30] 陈燕丽, 蒙良莉, 黄肖寒. 基于SPEI的广西喀斯特地区1971—2017年干旱时空演变[J]. *干旱气象*, 2019, 37(3): 353-362.  
CHEN Yanli, MENG Liangli, HUANG Xiaohan. Temporal and spatial distributions of drought in Guangxi karst area during 1971—2017 based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2019, 37(3): 353-362.
- [31] 王祝雄, 闫宏伟, 莫沫. 做好灾后调查评估科学组织灾后重建: 广西壮族自治区灾后林业恢复重建调研报告[J]. *林业经济*, 2008, 4(4): 21-24.  
WANG Zhuxiong, YAN Hongwei, MO Mo. Do a good job in post-disaster assessment survey scientific organizations reconstruction: Research report on forestry restoration after Guangxi Zhuang nature reserve disaster[J]. *Forestry Economy*, 2008, 4(4): 21-24.
- [32] 马华, 王云琦, 王力. 近20 a广西石漠化区植被覆盖度与气候变化和农村经济发展的耦合关系[J]. *山地学报*, 2014, 32(1): 38-45.  
MA Hua, WANG Yunqi, WANG Li. Vegetation cover and climate change and rural economic development in relations during last 20 years in karst region of Guangxi[J]. *Mountain Research*, 2014, 32(1): 38-45.
- [33] 黄文华, 刘家开. 2012年广西林业10件大事及最具影响力的10项工作[J]. *广西林业*, 2013(4): 7.  
HUANG Wenhua, LIU Jiakai. 10 major events and 10 most influential tasks of Guangxi forestry in 2012[J]. *Forestry of Guangxi*, 2013(4): 7.
- [34] 陈燕丽, 莫建飞, 莫伟华. 近30年广西喀斯特地区石漠化时空演变[J]. *广西科学*, 2018, 25(5): 625-631.  
CHEN Yanli, MO Jianfei, MO Weihua. Temporal and spatial distributions of rocky desertification in Guangxi karst area in the past 30 years[J]. *Guangxi Sciences*, 2018, 25(5): 625-631.
- [35] Tong X W, Brandt M, Yue Y M. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering[J]. *Nature Sustainability*, 2018, 11(1): 44-50.
- [36] Chen Yanli, Mo Weihua, Huang Yonglin, MO Jianfei, Huang Xiaohan, Wen Xiumei. Changes in vegetation and assessment of meteorological conditions in ecologically fragile karst areas[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2021, 35(1): 172-183.
- [37] 冯国艳, 马明国. 西南地区2001—2014年植被变化时空格局[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(6): 866-874.  
FENG Guoyan, MA Mingguo. Spatial-temporal pattern of vegetation changes in Southwest China during 2001—2014[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(6): 866-874.
- [38] 盛叶子, 曾蒙秀, 林德根, 彭海军, 朱丽东, 李凤全, 余奕泓, 王能静. 2000—2014年人类活动对贵州省植被净初级生产力的影响[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(1): 62-70.  
SHENG Yezi, ZENG Mengxiu, LIN Degen, PENG Haijun, ZHU Lidong, LI Fengquan, YU Yihong, WANG Nengjing. Impacts of human activities on net primary productivity of vegetation in Guizhou Province from 2000 to 2014[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(1): 62-70.
- [39] 吴跃, 周忠发, 赵馨, 但雨生, 黄登红. 基于遥感计算云平台高原山区植被覆盖时空演变研究: 以贵州省为例[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(2): 196-205.  
WU Yue, ZHOU Zhongfa, ZHAO Xin, DAN Yusheng, HUANG Denghong. Spatiotemporal variation of vegetation coverage in plateau mountainous areas based on remote sensing cloud computing platform: A case study of Guizhou Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(2): 196-205.

## Multi-scaled analysis of spatial-temporal evolution of vegetation ecological quality in the karst area of Guangxi

MO Jianfei<sup>1,2</sup>, CHEN Yanli<sup>1,2</sup>, MO Weihua<sup>1,2</sup>

( 1. Guangxi Institute of Meteorological Sciences, Nanning, Guangxi 530022, China; 2. Guangxi Ecological Meteorology and Satellite Remote Sensing Center, Nanning, Guangxi 530022, China )

**Abstract** The karst area in Guangxi is characterized by its extensive and typical landform development, covering a total area of 8.334 million hectares, 18.9% of the total karst area in Southwest China and 35.1% of the total land area in Guangxi. This area is marked by poor and shallow soil, dominated by shrubs, shrub-grass, and grasslands as its vegetation. Therefore, it is subject to climate changes and meteorological disasters with a weak disaster-bearing capacity. The area is a typical ecologically vulnerable region in the southwest of China, and it is also the focus area for the Guangxi government to carry out ecological protection and restoration and rural revitalization. The scientific and rational assessment of vegetation ecological quality and its spatial-temporal evolution in the karst area is crucial for ecological restoration and governance, and the achievement of the "dual-carbon" goal.

In order to monitor and assess the status of vegetation ecological quality in karst areas more objectively, and to clarify the spatial-temporal heterogeneity of vegetation ecological quality at different time scales, this study took the vegetation in the karst area of Guangxi as object. Based on the principle of "similar habitat" for vegetation ecological restoration, the "3S" technology was used to monitor and assess the vegetation ecological quality in the study area at different spatial and temporal scales. Firstly, the climate data was used to calculate the multi-year moisture index (MI) of the study area and delineate the climate gradient. Secondly, the maximum net primary productivity ( $NPP_m$ ) of the vegetation in the corresponding period was calculated. The correlation between MI and  $NPP_m$  of the vegetation was analyzed, and the  $NPP_m$  edge function of different vegetation types was constructed to determine the natural "baseline" of the potential productivity of vegetation within the climate gradient. Then a comprehensive vegetation quality model (MQI) for the karst area of Guangxi was built. Finally, the ecological quality index of vegetation was respectively calculated at monthly, quarterly, annual, and interannual scales to conduct a multi-scaled analyze of spatial-temporal evolution of vegetation ecological quality in the study area from 2000 to 2019.

The results showed that: (1) There were obvious differences in the potential of vegetation ecological restoration under different climatic conditions in the karst area of Guangxi. The  $NPP_m$  was a dynamic value that changes with climatic conditions, and different vegetation types responded differently to climatic conditions. Among these types, farmland vegetation was the most sensitive, followed by shrub-grass, and forest was the least affected. (2) There were significant temporal and spatial differences in the vegetation ecological quality at monthly, quarterly, annual, and interannual scales in the karst area of Guangxi. Temporally, the ecological quality indexes of vegetation at monthly and quarterly scales followed a parabolic pattern, and the annual index showed an increasing trend with fluctuation. The interannual evolution of vegetation ecological quality experienced four stages: slow growth, gradual growth, rapid growth, and significant growth. Spatially, vegetation ecological quality gradually increased from the northeastern to the southwestern part and from the northern to the southern part of the study area, with an overall high ecological quality. (3) There was a significant improvement in vegetation ecological quality in the karst area of Guangxi. From 2000 to 2019, the index of vegetation ecological improvement was 0.71/20a in the study area, with 98.83% of the regional vegetation ecological quality showing an upward trend over the 20-year period. Most of the improvement of regional vegetation ecology was favorable, primarily attributed to the national policies of returning farmland to forests, projects of rocky desertification control, and the favorable climate conditions in Guangxi. (4) The model for vegetation ecological quality of the study area exhibits high regional suitability and is able to finely and accurately reflect the spatial-temporal evolution characteristics of vegetation ecological quality in the study area.

**Key words** vegetation ecological quality, net primary productivity, spatial-temporal evolution, humidity index, the karst area of Guangxi

( 编辑 黄晨晖 )