

基于植被生产力的西南地区生态系统脆弱性特征

何 敏 王鹤松* 孙建新

(北京林业大学林学院, 北京 100083)

摘 要 中国西南地区是全球生物多样性保护的重要地区之一.在全球气候变化背景下,该地区生态系统呈现出脆弱性增加的趋势.本研究基于生态系统总初级生产力(GPP),根据IPCC有关脆弱性的概念,计算西南地区生态系统的脆弱性,并分析了该区脆弱等级的空间分布格局,以及生态系统脆弱性与降水、温度、海拔、坡度和植被类型等因子间的相关性.结果表明:西南地区生态系统脆弱性呈现由东南向西北逐渐增强的趋势,区域内多数地区为轻度、中度脆弱区(二者共占69%).脆弱等级随着区域内年平均降水量、多年平均温度的增加而减少,随着区域内海拔、坡度的增加而增加.西南喀斯特山区和西北山地农牧交错区呈现较高的脆弱性,更容易受气候变化或其他外界扰动的影响.针叶林、灌丛和草地的脆弱性相对较高,未来可能更容易受到气候变化的影响.

关键词 生态系统脆弱性; 植被类型; 总初级生产力; 西南地区

Characters of ecosystem vulnerability in southwestern China based on vegetation productivity. HE Min, WANG He-song*, SUN Jian-xin (College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China).

Abstract: Southwestern China is one of the most important areas for global biodiversity conservation. Under the background of global climate change, the vulnerability of this area has showed an increasing trend. According to the IPCC concept of vulnerability, we calculated the spatial distribution of ecosystem's vulnerability in southwestern China based on gross primary productivity (GPP) and then analyzed the spatial variation of different levels of vulnerability. Besides, we analyzed the relationship between environmental factors and ecosystem vulnerability, including precipitation, temperature, altitude, slope and vegetation type. The results showed that ecosystem vulnerability in the southwestern China gradually increased from southeast to northwest, with most area within the region being slight and mild vulnerable area (together occupied 69% of the total). The vulnerability level decreased with the increasing of mean annual precipitation and temperature but increased with increasing elevation and slope. Karst area in southwest and borders between farming and ranging regions in northwest Mountain ecotone of the study area had higher vulnerability, being more easily affected by climate change or other disturbances. The vulnerabilities of needle-leaved forest, grassland, and shrubland were relatively higher than other vegetation types, with the potential to be more easily affected by climate change.

Key words: ecosystem vulnerability; vegetation type; gross primary productivity (GPP); southwestern China.

生态系统脆弱性的定量评估可为维护生态系统的可持续发展、减少外部胁迫对生态系统的不良影响、退化生态系统的综合整治提供相应的决策依

据^[1].IPCC第五次评估报告指出,脆弱性是系统容易受到不利影响的倾向或者习性.它包括两个方面,一是系统对气候变化影响的敏感性或敏感能力,它容易受气候变化或其他外界扰动的影响;二是系统对新的气候条件的适应性或适应能力,它受系统自身调节和恢复能力的制约^[2-3].气候变化不仅指气候的波动、变化的趋势,还包括极端气候事件发生的频

本文由国家重点研发计划项目(2016YFC0502104)资助 This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFC0502104).

2018-03-31 Received, 2018-12-07 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wanghs119@126.com

率和强度。通常,脆弱系统指对气候变化的影响敏感且不稳定的系统,该定义被气候变化研究领域广泛接受和采用^[4-5]。开展生态系统的脆弱性研究对理解生态系统的功能和过程至关重要^[6-7]。

生产力是生态系统功能的重要指标,也是衡量生态系统脆弱性的主要依据之一。目前,国内外学者基于生产力对不同地区不同类型的生态系统已经开展了大量研究。如 Iglesias 等^[8]使用作物动态生长模型和气候模式数据来反映小麦生产力响应气候变化的脆弱性,脆弱性的影响因素包括许多因子在不同气候变化情景下的损失量,比如作物产量、农民收入等。Ciais 等^[9]研究了干旱对欧洲大陆各种生态系统的影响,通过涡度相关观测与模式模拟结合的方法,对比分析了 1 个草地站和 14 个森林站的碳平衡,结果发现几乎全部站点的植被总初级生产力(GPP)表现出明显降低,而且全欧洲大陆的 GPP 下降了 30%。AIR-CLIM 项目评价气候变化对欧洲自然生态系统脆弱性的影响时^[10],选取生态系统响应气候变化的指标是净初级生产力(NPP),以多年平均 NPP 的 10% 的变化量为基准,按照是否超过这一基准对系统脆弱性进行划分。吴绍洪等^[11]将全球不同植被类型 NPP 长期平均值确定为生态基准进行建模,通过划分不同的生态系统脆弱性水平的状态阈值,开展中国自然生态系统的气候变化脆弱性研究,将 NPP 减少 40%、60%、80%、100% 分别作为生态系统轻度、中度、重度、系统崩溃的临界值,结果表明,中国自然生态系统基本处于轻度和中度适应(脆弱)状态。

中国西南地区是亚洲主要河流的发源地,地处长江、珠江、雅鲁藏布江、澜沧江的上游,是我国重要的生态屏障和生态脆弱地区,是对气候变化最敏感的区域之一,包括多种脆弱生态系统类型,如岩溶石漠化脆弱生态系统、干热河谷地带脆弱生态系统等^[12]。在全球气候变化背景下,西南地区呈现出极端气象灾害频发的趋势,干旱和由重大降水过程引发的山地灾害交替发生,生态系统脆弱性有所增加,地区自然生态环境和区域经济社会可持续发展面临多重挑战。目前,许多学者已经在西南地区,根据生态环境特征采用不同的评价方法开展了大量研究。如郭兵等^[13]利用极端气候指数和大尺度景观格局指数,构建了西南喀斯特山区的生态系统脆弱性遥感评价体系,对该区域多年的生态系统脆弱性时空变化格局和驱动机制进行分析和探讨。乔青^[14]进行生态环境脆弱性评价的基本判定指标是生态弹性

度、生态压力度和生态敏感度,它们共同构成了多层次、多目标的生态脆弱性评价指标体系框架。李平星等^[15]采用脆弱性评估(vulnerability scoping diagram, VSD)模型,通过暴露度、敏感度和适应性分解脆弱性的方法,构建广西西江经济带包含自然和人为因素在内的评价体系(共 25 个指标),进而开展了脆弱性评价和分区。但是,不同学者选用的指标、建立的脆弱性评价体系大多不一致,对不同空间尺度和研究方法所建立的脆弱性评价体系差别较大,当前西南地区还缺乏一个系统、客观的评价体系。

本研究从生态系统最基本的 GPP 出发,根据 IPCC 有关脆弱性的概念,采用自下而上的方法,以 GPP 偏离多年平均状况的程度来计算生态系统的敏感性,以 GPP 偏离多年平均状况的变化趋势来计算生态系统适应性^[6-7,16],进而在生态系统的尺度上评估其对气候变化和其他外界扰动的脆弱性。本研究通过认识西南地区生态系统脆弱等级时空分布特点,分析气候、地形、植被类型对生态系统的影响及其变化趋势,以期为区域有针对性地开展应对措施、提高生态系统对气候变化或其他扰动的适应能力提供科学参考和决策依据,旨在为区域可持续发展和规划提供理论支持。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

本研究所指“西南地区”(20°53′—36°29′ N, 83°52′—112°03′ E)包括我国四川、云南、广西、贵州和重庆。该区地貌较复杂,包括青藏高原东南部、横断山脉、四川盆地、云贵高原、广西丘陵^[17],主要植被类型是针叶林、阔叶林、灌丛、草原和农田。气候类型复杂多样,包括亚热带季风气候、热带季雨林气候等。西南地区的水资源时空分布不均,年降水量在 600~2300 mm,分布特点为南多北少、东多西少。地区之间气温差异大,西北低、东南高,年均气温在 0~24 ℃,海拔是北高南低^[18]。

1.2 数据来源

本研究选取中国西南地区 2000—2015 年 MODIS 最新一代陆地产品数据集(第六版)中的 MOD17A2H 产品,数据来源于美国国家航空航天局(NASA, <https://lpdaac.usgs.gov>)。数据内容是植被 GPP,为陆地四级标准产品,空间分辨率为 500 m,时间分辨率为 8 d。本研究所用的数字高程模型(digital elevation model, DEM)空间分布数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc>。

cn), 空间分辨率为 90 m. 土地覆盖综合数据集 (LUCC 数据集) 集成了 Terra 和 Aqua 两个卫星的数据, 空间分辨率为 500 m (MCD12Q1, <https://modis-land.gsfc.nasa.gov/landcover.html>).

1.3 遥感数据处理

首先,剔除 MOD17A2H 数据中的异常值^[17],再裁剪出西南地区.其次,对 DEM、LUCC 数据集进行坐标系统的转换、重采样和裁剪,使它们的空间分辨率和区域范围与西南地区 MOD17A2H 年数据集保持一致.最后,为了便于比较不同类型生态系统之间对脆弱性响应的差异,本研究将植被类型简化为 7 大类,分别为针叶林、阔叶林、灌丛、疏林草原、草地、农田和其他.其中,针叶林包括落叶针叶林、常绿针叶林和混交林,阔叶林包括落叶阔叶林和常绿阔叶林,灌丛包括郁闭灌丛和稀疏灌丛,疏林草原包括多树草原和稀树草原,草地指典型草原和草甸草原,农田包括耕地、农田/植被,其他包括永久湿地、城市 and 建筑、冰雪、裸地或低植被覆盖地、水体.

1.4 敏感性的计算

敏感性是系统在正常运转时,由于气候变化或其他扰动作用而导致系统失灵的难易程度.对于特定的生态系统区域,敏感性被定义为生态系统对气候变化或其他扰动的响应程度^[16,19-22].本研究以 GPP 作为生态系统功能特征量,因此,生态系统的适应性由 2000—2015 年 GPP 的年际波动情况来表示,以反映 GPP 对于平均值的离散程度.计算公式如下:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n |F_i - \bar{F}|}{\bar{F}}$$

(1)

式中: i 表示第 i 年 ($n=16$); F_i 表示第 i 年的 GPP 值; \bar{F} 表示 GPP 平均值; S 表示 GPP 的变率,即生态系统敏感性指数,反映了 GPP 相对特定时间内平均值的离散程度.

1.5 适应性的计算

适应性是生态系统在面对气候变化或其他扰动时保持和恢复其结构的能力.生态系统适应能力也就是生态系统的自我调节机制,可被看作是在相对稳定状态下维持系统的一种措施.在一定时期内,一个生态系统的变率趋势被用来衡量其偏离稳态,可被称为生态系统适应.如果可变性的变化趋势减少或不变,则系统趋于相对稳定;增加的可变性表明不稳定的系统适应环境变化,并可能表明脆弱性在增加.在一定时期内,生态系统适应性,即系统的自我

调节能力,可以用 GPP 年际变率的线性拟合趋势线斜率来表示^[16,19-22].本研究的生态系统适应性由 2000—2015 年 GPP 年际变率的线性拟合趋势线的斜率来表示:

$$y = Ax + B$$

(2)

$$A = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

(3)

式中: x 为生态系统时间序列,对应 2000—2015 年的年份; y 为 GPP 的年际变率,即每年 GPP 的绝对变化量,是由每年 GPP 的值减去 2000—2015 年 GPP 的平均值; A 为 GPP 变率的变化趋势,是数据组 y 和 x 的回归斜率,为生态系统适应性指数; B 为截距.

1.6 脆弱性的计算

脆弱性是由系统对气候变化的敏感性和适应性共同作用的,它是生态系统内气候变化速率特征、幅度大小和变化速率范围及其敏感性和适应能力的函数^[19].脆弱性与敏感性呈正相关,与适应性呈负相关.各个地区适应性、敏感性和脆弱性的高低都是相对的,根据前面公式计算的敏感性和适应性未必在同一量纲,为分析脆弱性的地区差异,需分别对敏感性和适应性的计算结果标准化后,再进行脆弱性的计算^[20].脆弱性公式如下:

$$V = S - A$$

(4)

式中: V 为生态系统脆弱度; S 为生态系统敏感性指数; A 为生态系统适应性指数.

1.7 脆弱性指标分级

自然断点分类方法是根据数据中固有的自然分组,利用统计学的 Jenk 最优化法推导出最适合的分界点,从而对相似值进行分组,使得各个类之间差异最大化,以使各级的内部方差之和最小^[23].该方法是一种系统聚类分析法,其出发点是研究对象之间可能存在的相似性和亲疏关系,根据研究对象之间各种特征标志的相似程度或相关程度的大小进行分类归组.本研究采用自然断点分类方法将脆弱性划分为 5 级,从轻到重依次为不脆弱、轻度脆弱、中度脆弱、重度脆弱和极度脆弱.

1.8 数据处理

利用了 GIS 和 ENVI 对遥感图像进行图像预处理和叠加计算,利用 Microsoft Excel 2013 软件对文本数据进行处理,利用 OriginPro 2016 软件对数据进行图形绘制,利用 SPSS 19.0 软件对数据进行统计分析.

2 结果与分析

2.1 西南地区生态系统的脆弱性格局

西南地区生态系统脆弱性总体上表现出明显的空间分化格局,西北部脆弱性最高,中部次之,其他地区脆弱性大多较低(图1)。脆弱度的平均值为-0.24,最小值为-0.91,最大值为0.67,其中,不脆弱、轻度、中度、重度和极度脆弱地区的脆弱度值分别为-0.91~-0.32、-0.32~-0.25、-0.25~-0.16、-0.16~-0.03和-0.03~0.68。

研究区内多数地区为轻度、中度脆弱区,二者共占区域总面积的69%。不脆弱区域的分布较为集中,主要分布在云南中南部、云南和广西交界处等地,约占区域面积的16%。轻度脆弱区域的分布较多且较为集中,主要分布在云南、广西西部、贵州东部等地,约占区域面积的35%。中度脆弱区域的分布较多,主要分布在四川东部、重庆、贵州西部,约占区域面积的32%。重度脆弱区域的分布较为集中,主要分布在川西高原、云贵高原等地,约占区域面积的14%。极度脆弱区域的分布较少,但较为集中,主要分布在青藏高原、横断山脉,约占区域面积的3%。

2.2 西南地区生态系统的脆弱性对气象因子的响应

气温和降水对生态系统结构和功能的形成起着至关重要的作用。由图2可以看出,西南地区生态系

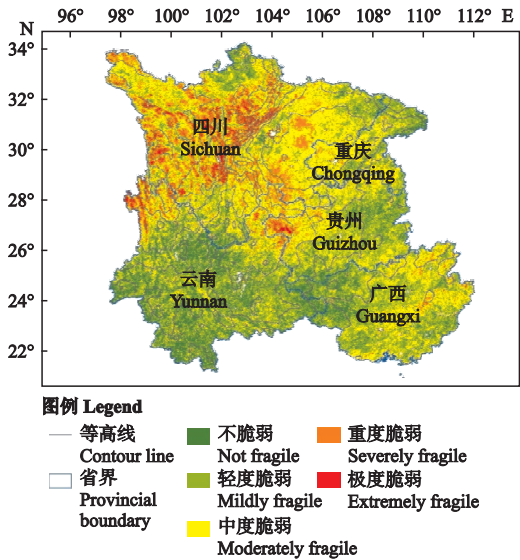


图1 西南地区生态系统不同脆弱等级的空间分布
Fig.1 Spatial distribution of different vulnerable levels in ecosystem of southwestern China.

统脆弱等级随着区域多年平均温度的升高而减少,即多年平均温度越高的区域,生态系统越趋于稳定。尤其在多年平均温度较低的地区表现显著(图3),如西南山地农牧交错区主要是重、极度脆弱区,该区域多年平均温度低,热量条件的垂直变化明显。西南生态系统脆弱等级随着区域年平均降水量的增加而减少,即在年平均降水量越高的区域,生态系统越趋于稳定,尤其在年平均降水量较少的地区,表现

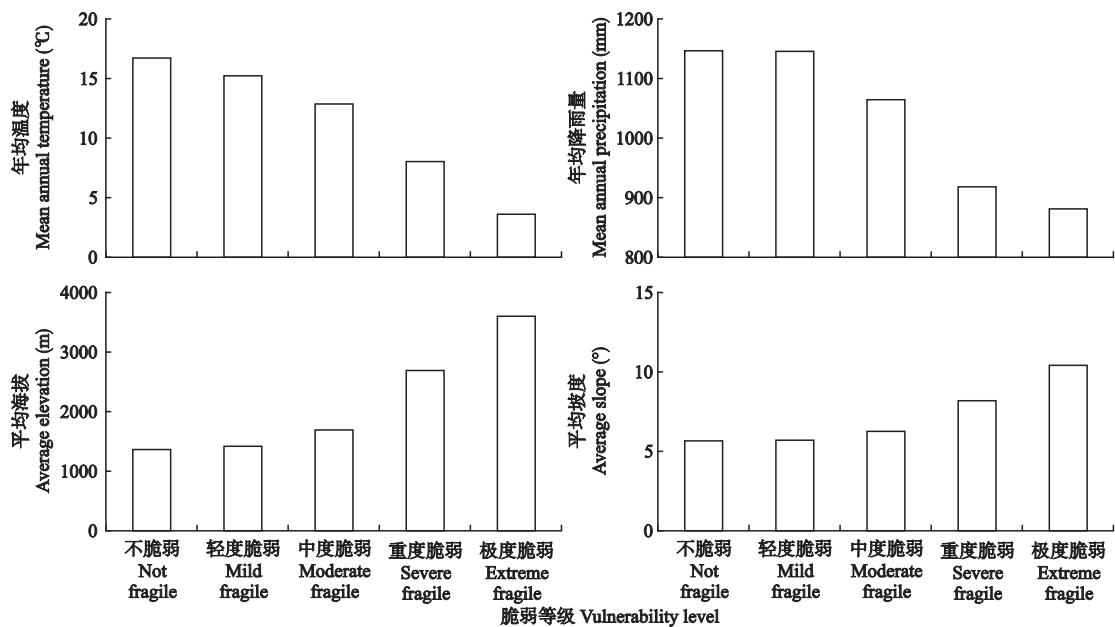


图2 研究区生态系统脆弱等级与年均温度、年均降水量、平均海拔、平均坡度的关系
Fig.2 Level of ecosystem vulnerability relating to mean annual temperature, mean annual precipitation, average elevation and average slope in the study area.

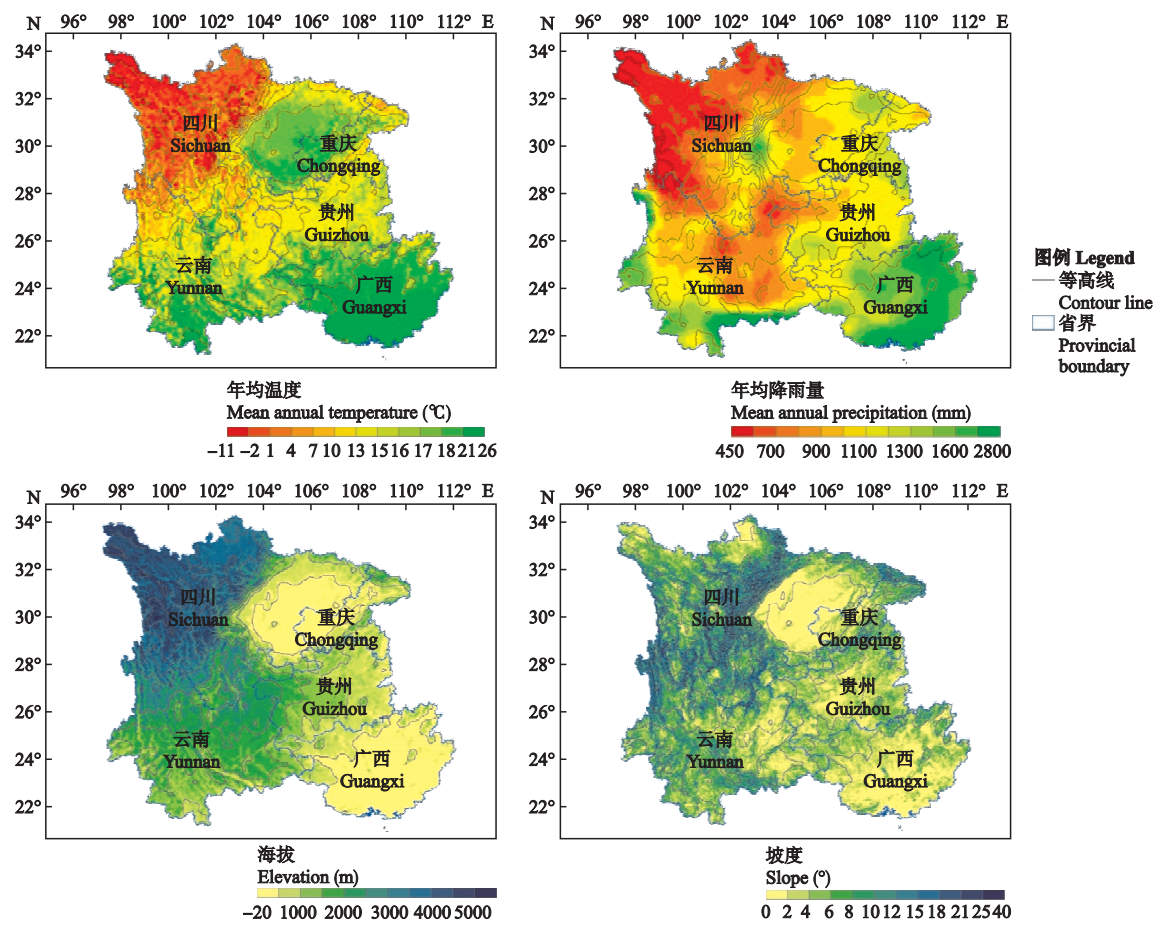


图 3 研究区年均温度、年均降水量、海拔和坡度的空间分布
Fig.3 Spatial distribution of mean annual temperature, mean annual precipitation, average elevation and average slope in the study area.

显著.例如西南山地农牧交错区,多年平均温度低,热量条件的垂直变化明显,降雨量少,生态系统对温度、降水的敏感性较高,且适应性低,因而生态系统的脆弱性较高;西南石灰岩岩溶山地区域,虽然降雨充沛,但是成土速率慢,石漠化效应明显,水分无法得到有效利用,系统对降水的适应性低,因而生态系统的脆弱性较高.

为了更深入地分析气象因子对生态系统脆弱性变化的影响,将温度(T)和降水(P)作为自变量,以脆弱度(V)为因变量,进行多元线性回归分析.由表 1 可以看出, $V=-0.228P-0.169$ 、 $V=-0.44T-0.159$ 、

表 1 各气象因子的线性回归分析结果
Table 1 Results of the linear regression analysis of meteorological factors ($n=584168$)

因子 Factor	标准化方程表达式 Standardization equation expression	决定系数 Coefficient of determination (R^2)	P 值 P value
P	$V=-0.228P-0.169$	0.052	<0.001
T	$V=-0.44T-0.159$	0.194	<0.001
P,T	$V=0.12P-0.52T-0.181$	0.202	<0.001

V : 脆弱度 Vulnerability; P : 年平均降雨量 Mean annual precipitation;
 T : 多年平均温度 Mean annual temperature.下同 The same below.

$V=0.12P-0.52T-0.181$,这 3 个标准化方程均达到显著水平($P<0.001$). P 、 T 均作为自变量时的 R^2 与以 T 作为自变量时的 R^2 相差较小,说明温度是研究区生态系统脆弱性的主导因子.

2.3 西南地区生态系统的脆弱性对地形因子的响应

海拔和坡度在很大程度上决定了植被类型的空间分布.西南地区生态系统脆弱等级随着区域内平均海拔的升高有着明显的增加趋势.高脆弱地区主要分布在川西高原、横断山脉、云贵高原,该区域地形高差大;云南西南部和广西北部的脆弱性最低,该区域地形起伏较小.此外,西南地区生态系统脆弱等级随着区域内平均坡度的增加而增加,在坡度越缓的区域,生态系统越趋于稳定.西南山地农牧交错区海拔较高、谷坡陡峭、坡度较大、岩层破碎,生态系统对地形的敏感性高且适应性差,系统受地形制约较为明显,因而生态系统的脆弱性较高.

为了更深入地分析地形因子对生态系统脆弱性变化的影响,将海拔、坡度作为自变量,以脆弱度为因变量,进行多元线性回归分析.由表2可以看出,

表 2 各地形因子的线性回归分析结果
Table 2 Results of the linear regression analysis of terrain factors

因子 Factor	标准化方程表达式 Standardization equation expression	决定系数 Coefficient of determination (R^2)	P 值 P value
E	$V=0.378E-0.284$	0.143	<0.001
S	$V=0.218S-0.265$	0.048	<0.001
E,S	$V=0.35E+0.063S-0.288$	0.146	<0.001

E : 海拔 Elevation; S : 坡度 Slope.

$V=0.378E-0.284$ 、 $V=0.218S-0.265$ 、 $V=0.35E+0.063S-0.288$,这3个标准化方程的模拟结果均达到了显著性水平($P<0.001$). E 、 S 均作为自变量时的 R^2 与以 E 作为自变量时的 R^2 相差较小,说明海拔是研究区生态系统脆弱性的主导因子.

2.4 西南地区生态系统的脆弱性对植被类型的响应

研究区主要植被类型为针叶林、阔叶林、灌丛、疏林草原、草地和农田(图4).从研究区的西南向西北推移,湿润半湿润地区向半干旱、干旱区过渡,植被从常绿阔叶林变为草甸和草原等,脆弱性等级逐渐升高.

结合图1和图4可以看出,在针叶林的分布上,脆弱等级低的针叶林区以云南为主,多数分布在地势平坦的地区;脆弱等级高的针叶林区主要分布在地形起伏大、地势陡峭的横断山脉,其中,极度脆弱针叶林区主要分布于青藏高原东南缘和长江上游的川西亚高山林区;随着针叶林区逐渐向北、向高海拔地区移动,脆弱等级逐渐升高.在疏林草原的分布

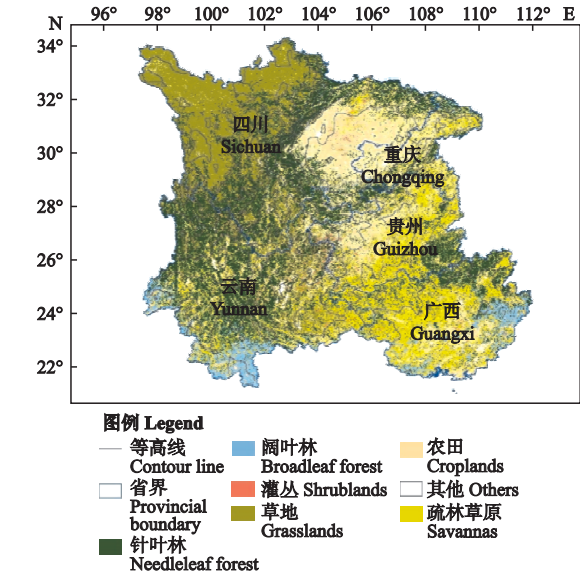


图 4 西南地区植被类型的空间分布
Fig.4 Spatial distribution of vegetation types in Southwest China.

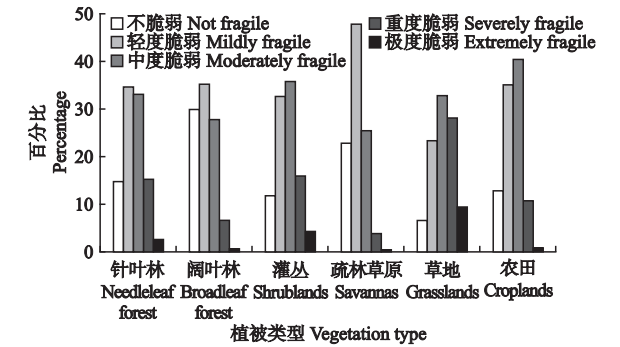


图 5 研究区各植被类型在不同脆弱等级地区的百分比
Fig.5 Percentage of vegetation types in different vulnerability levels in the study area.

上,不脆弱和轻度脆弱的疏林草原区主要分布于西南地区的东南部,区域降水充沛,植被覆盖度高,水土流失和石漠化程度较低,加上人类的保护措施(退耕还林等),生态环境较好;疏林草原区的脆弱等级较低,平均为轻度脆弱.在农田的分布上,脆弱等级低的农田主要分布于西南地区的南部和东部,主要是耕地,基本分布在地势较为平坦的地区;其中,不脆弱农田一般周围是城市 and 建筑、林木,说明人为管护良好且自身周围自然环境好;脆弱等级高的农田主要分布于绵阳、遂宁、毕节、昭通、六盘水,一般与建筑的距离远,人为管护较少,从地表起伏来看,可能是梯田.

由图5可以看出,研究区各植被类型在生态系统轻、中度脆弱地区的占比都较大,在极度脆弱地区的占比都较小,这主要是与各脆弱等级地区的面积占比有关,轻度脆弱地区约占总面积的35%,中度脆弱地区约占总面积的32%,极度脆弱地区约占总面积的3%.其中,草地、灌丛和针叶林中重度和极度脆弱地区的占比都较大,是研究区内脆弱性高的植被类型;疏林草原中不脆弱和轻度脆弱地区所占比重之和最大,是研究区内脆弱性最低的植被类型.

从各脆弱等级的植被类型构成来看,针叶林和草地(这里主要是高寒草甸)对重度和极度脆弱区有较大贡献(表3).针叶林所占比例在重度脆弱时最高,阔叶林所占比例随脆弱等级的升高而减少,灌丛所占比例随脆弱等级的升高而增多,疏林草原所占比例随脆弱等级的升高而减少,草地所占比例随脆弱等级的升高而增多,农田所占比例在中度脆弱时最高.

3 讨 论

3.1 西南地区生态系统脆弱关键区

本文中的重度脆弱和极度脆弱地区的空间布局

表 3 研究区各脆弱等级的不同植被类型面积
Table 3 Areas of different vegetation types in various vulnerability levels in the study area

植被类型 Vegetation type	脆弱等级 Level of vulnerability									
	不脆弱 Not fragile		轻度脆弱 Mildly fragile		中度脆弱 Moderately fragile		重度脆弱 Severely fragile		极度脆弱 Extremely fragile	
	面积 Area (km ²)	百分比 Percentage	面积 Area (km ²)	百分比 Percentage	面积 Area (km ²)	百分比 Percentage	面积 Area (km ²)	百分比 Percentage	面积 Area (km ²)	百分比 Percentage
针叶林 Needleleaf forest	58039	30.1	135547	31.2	129932	32.3	59330	35.2	10557	28.2
阔叶林 Broadleaf forest	18547	9.6	21777	5.0	17038	4.2	4104	2.4	328	0.9
灌丛 Shrubland	3719	1.9	10320	2.4	11330	2.8	5050	3.0	1333	3.6
疏林草原 Savannas	58224	30.2	122484	28.2	65016	16.1	9557	5.7	1042	2.8
草地 Grassland	14561	7.6	51496	11.9	72367	18.0	61992	36.8	20996	56.2
农田 Cropland	33463	17.4	90434	20.8	104551	26.0	27613	16.4	2562	6.9
其他 Others	6178	3.2	2157	0.5	2670	0.7	881	0.5	564	1.5
总计 Sum	192731	100	434216	100	402904	100	168528	100	37382	100

基本符合《关于划分国家级水土流失重点防治区的公告》^[24]发布的国家级水土流失重点防治区以及《全国主体功能区规划》^[25]、《全国生态脆弱区保护规划纲要》^[26]中关于生态脆弱区的分布范围,西南区域的生态脆弱关键区是西南岩溶山地石漠化生态脆弱区和西南山地农牧交错生态脆弱区。

赵跃龙等^[27]采用指标评价法,基于成因和结果表现指标,建立了脆弱生态环境评价指标体系,对我国 26 个省区的生态环境脆弱度进行分析和定量评价.刘军会等^[28]采用指标评价法和图层叠置法,利用遥感和 GIS 技术,建立评价指标体系及评价模型,识别出全国生态脆弱区分布范围.上述研究均深入探讨了中国生态系统的脆弱性,从研究结果来看,西南山地农牧交错区和西南喀斯特山区是西南地区的生态脆弱关键区,它们更容易受气候变化或其他外界扰动的影响,呈现较高的脆弱性,这与本研究结果一致.郭兵等^[13]研究结果表明,西南喀斯特山区生态系统脆弱性的分布格局以川滇黔为核心向周边减小.这与本研究结果中喀斯特山区脆弱等级分布趋势基本一致.本研究结果表明,大部分西南喀斯特山区的敏感性强、适应性较弱、脆弱等级高,该类地区主要包括昭通、毕节、泸州、宜宾、乐山等市,温度和降水对该区域生态系统的脆弱性影响较大,区域原有的植被群落被破坏,再加上喀斯特土层浅薄和水分下渗限制了植物生长,导致被破坏后的植被群落难以恢复,进而导致生态系统功能紊乱.乔青^[14]的研究结果指出了川滇农牧交错地区生态环境脆弱性的现状,明确了导致脆弱性发生的主要因素,高山的脆弱度较高,山脉与高原的交错地区是中等脆弱区,区域生态脆弱度的空间分布与研究区地形地貌分布规律具有较强的相关性;地形地貌因素是形成区域

内部生态系统脆弱性空间分异的主导因素,这与本研究结果一致.

从总体评价结果来看,西南山地农牧交错区和西南喀斯特山区虽然都是生态脆弱关键区,但是山地农牧交错区的平均脆弱程度更高.海拔和坡度对生态系统的脆弱性影响更大,因此在西南地区实施生态系统管理措施时应优先保护山地农牧交错区,重点保护青藏高原东南缘和长江上游的川西亚高山林区,进行全面退耕还林还草、禁止无序开矿等破坏植被行为,以降低生态系统的敏感性;积极推广封山育林育草技术,以增强生态系统的适应性,最终降低该区域生态系统对地形因子的脆弱性.

3.2 西南地区典型植被类型的脆弱格局

在西南地区植被类型中,阔叶林和草地的脆弱分布格局最典型.在阔叶林的分布上,不脆弱和轻度脆弱的区域以云南为主,主要是热带雨林,分布在海拔低的平坦区域;中度脆弱和重度脆弱的区域以广西为主,主要是桉树(图 6).张建平^[29]研究指出,进入 21 世纪以来,广西桉树每年以约 133333 hm²的速度快速发展,广西已成为我国速生桉树的重要生产基地,分布范围从 20 世纪 70 年代桂南地区延伸到 21 世纪广西 14 个市 102 个县(市、区),目前种植面积已占广西森林总面积的 1/7.广西的桉树 5~7 年采伐 1 次,采伐方式以皆伐为主,广西北部湾经济区(主要包括南宁市、北海市、钦州市、防城港市所辖区域范围)最早将桉树大面积造林,桉树分布面积广.本研究结果表明,广西阔叶树的重度脆弱以北部湾经济区为核心向外扩展,脆弱性逐渐降低.虽然都是阔叶林,但是桉树与热带雨林的经营方式不同,它们之间脆弱等级的差异,侧面证明了本方法的合理性.

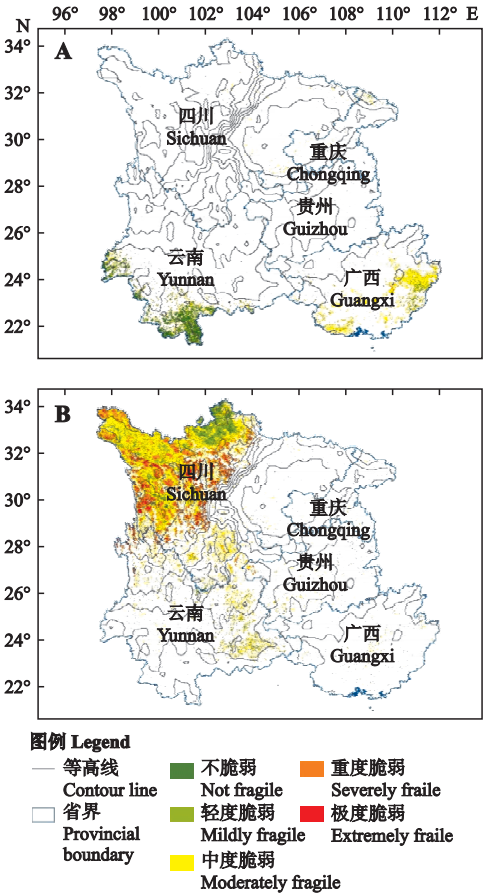


图 6 西南典型植被类型不同脆弱等级的空间分布
Fig.6 Spatial distribution of different vulnerable levels in typical vegetation types of southwest China.
A: 阔叶林 Broadleaf forest; B: 草地 Grasslands.

在草地的分布上,不脆弱和轻度脆弱的区域较少,主要位于四川阿坝州北部地势平坦的地区;中度脆弱和重度脆弱的区域,主要分布于川西高原的西南农牧交错带和横断山脉(图 6).随着地形起伏的增加,草地脆弱等级升高,极度脆弱草地的坡度变化大,气象条件变异显著.川西北草地处于四川省西北部,主要是高寒草甸,属长江、黄河上游重要的水源涵养区,区域生态地位极其重要,同时也是四川省沙化最严重的区域^[30].邱成^[31]的研究结果表明,高寒草甸生态系统退化是自然原因和人为原因共同作用的结果,当前人类活动的强烈干扰加重了生态系统的脆弱性,这是导致石渠县草地生态系统退化的主要原因.

3.3 基于 GPP 的脆弱性评价方法

基于 GPP 动态变化的生态系统脆弱性评价方法可以在一定程度上解决以往脆弱性评价体系中指标数量多、各个指标因子之间重叠以及评价体系不够客观等问题.就西南地区而言,基于该方法得到的

脆弱性较高的地区与前人研究结果一致,借助于遥感卫星空间分辨率高的优势,本研究方法还可以进一步对影响脆弱性的气象因子、地形因子和植被类型因素开展详细讨论.本研究对脆弱性进行更为细致的划分,将川滇农牧交错地区和西南喀斯特山区两个脆弱区进行横向比较,发现川滇农牧交错地区的脆弱性更高.然而,该方法也有一定局限性,即 GPP 的变化在受到气候变化影响的同时,也不可避免地受到人类活动的干扰.以农田为例,植被 GPP 的变化除了会受到自然环境的影响外,种植品种、种植方式、管理水平等的变化都有可能引起 GPP 的波动,进而影响脆弱性评价.从总体结果而言,基于 GPP 动态变化的方法是一个较为实用的脆弱性评估方法,可以为脆弱生态系统监测、修复及适应性研究提供支持.

4 结 论

本研究从生态系统总初级生产力(GPP)出发,采用自下而上的方法,以 GPP 偏离多年平均状况的程度来计算生态系统的敏感性,以 GPP 偏离多年平均状况的变化趋势来计算生态系统适应性,评估了西南地区生态系统的脆弱性,并建立了脆弱等级空间分布格局.整体来看,西南地区生态系统脆弱等级有较为清晰的地区差异,呈现由东南向西北逐渐增强的趋势;区域内多数地区为轻度、中度脆弱区;脆弱等级随着区域内的年平均降水量、多年平均温度的升高而减少,随区域内的平均海拔、平均坡度的增加而增加;西南山地农牧交错区和西南喀斯特山区是生态脆弱关键区,呈现较高的脆弱性;从植被类型看,针叶林、灌丛和草地的脆弱性相对较高,未来可能更容易受到气候变化的影响.

参考文献

[1] Li H (李 鹤), Zhang P-Y (张平宇), Cheng Y-Q (程叶青). Concepts and assessment methods of vulnerability. *Progress in Geography* (地理科学进展), 2008, 27(2): 18-23 (in Chinese)

[2] IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2014

[3] Liu M (刘 敏), Mao Z-J (毛子军), Li Y (厉悦), et al. Response of radial growth to climate change in *Pinus koraiensis* with different diameter classes. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报),

- 2018, **29**(11): 3530–3540 (in Chinese)
- [4] Yu L (於 琨). Assessment on ecosystem vulnerability to drought: The case study of the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin* (长江流域资源与环境), 2014, **23**(7): 1063–1070 (in Chinese)
- [5] Xiao T (肖 桐), Wang J-B (王军邦), Chen Z-Q (陈卓奇). Vulnerability of grassland ecosystems in the Sanjiangyuan region based on NPP 2010. *Resources Science* (资源科学), 2010, **32**(2): 323–330 (in Chinese)
- [6] Yao X (姚 雄), Yu K-Y (余坤勇), Liu J (刘 健), *et al.* Spatial and temporal changes of the ecological vulnerability in a serious soil erosion area, South China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2016, **27**(3): 735–745 (in Chinese)
- [7] Xu Y (徐 燕), Sun X-Y (孙小银), Zhang D-Z (张大智), *et al.* Landscape pattern and its vulnerability in Nansihu Lake Basin during 1980–2015. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2018, **29**(2): 635–642 (in Chinese)
- [8] Iglesias A, Rosenzweig C, Pereira D. Agricultural impacts of climate change in Spain: Developing tools for a spatial analysis. *Global Environmental Change*, 2000, **10**: 69–80
- [9] Ciais P, Reichstein M, Viovy N, *et al.* Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 2005, **437**: 529–533
- [10] Minnen JGV, Onigkeij J, Alcamo J. Critical climate change as an approach to assess climate change impacts in Europe: Development and application. *Environmental Science & Policy*, 2002, **5**: 335–347
- [11] Wu S-H (吴绍洪), Yin Y-H (尹云鹤), Zhao H-X (赵慧霞), *et al.* Recognition of ecosystem response to climate change impact. *Advances in Climate Change Research* (气候变化研究进展), 2005, **1**(3): 115–118 (in Chinese)
- [12] Wang W (王 维), Wang W-J (王文杰), Li J-S (李俊生), *et al.* Remote sensing analysis of influence of extreme drought meteorology on southwest China based on normalized difference vegetation index. *Research of Environmental Sciences* (环境科学研究), 2010, **23**(12): 1447–1455 (in Chinese)
- [13] Guo B (郭 兵), Jiang L (姜 琳), Luo W (罗 巍), *et al.* Study of an evaluation method of ecosystem vulnerability based on remote sensing in a southwestern karst mountain area under extreme climatic conditions. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2017, **37**(21): 7219–7231 (in Chinese)
- [14] Qiao Q (乔 青). Research on Landscape Pattern and Ecological Frangibility Assessment of Chuan-Dian Farming-pastoral Zone. PhD Thesis. Beijing Forestry University, 2007 (in Chinese)
- [15] Li P-X (李平星), Fan J (樊 杰). Regional ecological vulnerability assessment based on VSD model: A case study of Xijiang River economic belt in Guangxi. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2014, **29**(5): 779–788 (in Chinese)
- [16] Zhang J, Sun J, Ma B, *et al.* Assessing the ecological vulnerability of the upper reaches of the Minjiang River. *PLoS One*, 2017, **12**(7): e181825
- [17] Zheng C-J (郑朝菊), Zeng Y (曾 源), Zhao Y-J (赵玉金), *et al.* Monitoring and dynamic analysis of fractional vegetation cover in southwestern China over the past 15 years based on MODIS data. *Remote Sensing for Land and Resources* (国土资源遥感), 2017, **29**(3): 128–136 (in Chinese)
- [18] Han L-Y (韩兰英), Zhang Q (张 强), Yao Y-B (姚玉璧), *et al.* Characteristics and origins of drought disasters in Southwest China in nearly 60 years. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 2014, **69**(5): 632–639 (in Chinese)
- [19] Yu L (於 琨), Cao M-K (曹明奎), Tao B (陶波), *et al.* Quantitative assessment of the vulnerability of terrestrial ecosystems of china to climate change based on potential vegetation. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2008, **32**(3): 521–530 (in Chinese)
- [20] Duan S-Z (段士中). Climate Change Analysis of the Vulnerability of Natural Ecosystems in Sichuan Province. Master Thesis. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013 (in Chinese)
- [21] You N-S (尤南山), Meng J-J (蒙吉军). Ecological functions regionalization and ecosystem management based on the ecological sensitivity and ecosystem service in the middle reaches of the Heihe River. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2017, **37**(1): 186–197 (in Chinese)
- [22] Yu L (於 琨), Li K-R (李克让), Tao B (陶波). Assessment on ecosystem vulnerability to extreme precipitation in the upper and middle Yangtze valley. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2012, **27**(1): 82–89 (in Chinese)
- [23] Xiao R-B (肖荣波), Ouyang Z-Y (欧阳志云), Wang X-K (王效科), *et al.* Assessment of rocky desertification sensitivity and its spatial analysis in southwest China. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2005, **24**(5): 551–554 (in Chinese)
- [24] The Central People's Government of the People's Republic of China (中华人民共和国中央人民政府). Announcement on the Division of Key National Soil Erosion Control Areas [EB/OL]. (2006-04-29) [2006-05-11]. http://www.gov.cn/zwggk/2006-05/11/content_277920.htm (in Chinese)
- [25] The Central People's Government of the People's Republic of China (中华人民共和国中央人民政府). Notice of the State Council on Printing and Distributing Plans for the Main Functional Areas of the Whole Country [EB/OL]. (2011-06-08) [2018-03-11]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2011-06/08/content_1441.htm (in Chinese)
- [26] Environmental Protection Department of People's Republic of China (中华人民共和国环境保护部). The outline of the plan for the protection of national ecologi-

cal fragile region. *Forestry Work Reference* (林业工作参考), 2009(2): 95-105 (in Chinese)

[27] Zhao Y-L (赵跃龙), Liu Y-H (刘燕华). Classification of China's fragile ecological environment and its scope determination. *Yunnan Geographic Environment Research* (云南地理环境研究), 1994(2): 34-44 (in Chinese)

[28] Liu J-H (刘军会), Zou C-X (邹长新), Gao J-X (高吉喜). Location determination of ecologically vulnerable regions in China. *Biodiversity Science* (生物多样性), 2015, **23**(6): 725-732 (in Chinese)

[29] Zhang J-P (张建平). Management and sustainable development of eucalyptus plantations in Guangxi. *Journal of Green Science and Technology* (绿色科技), 2017 (5): 97-98 (in Chinese)

[30] Liu S (刘 朔), Cai F-L (蔡凡隆), Yang J-Y (杨建勇), *et al.* Desertification control status and control division in Northwest Sichuan. *Forest Inventory and Planning* (林业调查规划), 2011, **36**(3): 122-126 (in Chinese)

[31] Qiu C (邱 成). Restoration and Reconstruction of Alpine Meadow Ecosystem in Northwest Sichuan. Master Thesis. Chengdu: Sichuan University, 2006 (in Chinese)

作者简介 何 敏,女,1993 年生,硕士研究生,主要从事生态系统功能脆弱性研究. E-mail: hemin099@ 163.com

责任编辑 杨 弘