

Analysis on Ecological Vulnerability to Climate Change of Grasslands in Sichuan Northwestern Plateau

Jiao Cuicui*, Yi Xiaobo, Wen Ting, Wei Ling

College of Economics, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong, China

Email address:

jiaocuicui1987@sina.cn (Jiao Cuicui), abobobi@163.com (Yi Xiaobo), 342954071@qq.com (Wen Ting), 940613192@qq.com (Wei Ling)

*Corresponding author

To cite this article:

Jiao Cuicui, Yi Xiaobo, Wen Ting, Wei Ling. Analysis on Ecological Vulnerability to Climate Change of Grasslands in Sichuan Northwestern Plateau. *Asia-Pacific Journal of Earth Sciences*. Vol. 3, No. 1, 2021, pp. 1-8.

Received: December 22, 2020; Accepted: January 8, 2021; Published: January 22, 2021

Abstract: Grasslands in Sichuan Northwestern Plateau (G SNP), located in the south-eastern Tibetan plateau, is fragile and sensitive to climate change. G SNP, situated in the upper reaches of the Yangtze River and the Yellow River, is one of China's five major pastoral areas. It plays a vital role in social and ecological fields. Therefore, it is pretty important to explore the ecological vulnerability to climate change in G SNP. In this study, based on long-term remote sensing data and meteorological data, we assessed ecological vulnerability of G SNP to climate change using indicators in the exposure-sensitivity-resilience framework. Our analysis indicated that (1) The vulnerability index was highest in the northwestern area, followed by that in the southeastern area, and was lowest in the middle area in G SNP. The spatial pattern of the exposure index determined that of vulnerability index in G SNP. (2) For various vegetation types in G SNP, the vulnerability index was highest in typical steppes and lowest in meadows and wetlands. The vulnerability index in alpine meadows was between the two. Differences of the vulnerability index among various vegetation types were determined by differences of the exposure index. (3) The spatial patterns of the vulnerability index in the subtropical climate zone were various from them in the alpine climate zone. In the subtropical climate zone, the vulnerability index was lowest in the middle subtropical climate region-dianbei. The vulnerability index in the middle subtropical climate region-sichuan and that in the northern subtropical climate region-qinba were at a comparable level. Differences of the vulnerability index among various climate zones were determined by differences of the resilience index in the subtropical climate region. In the alpine climate zone, the vulnerability index was highest in the alpine climate region-changdu, followed by the alpine climate region-bomi and chuanxi, and was lowest in the alpine climate region - qingnan. The spatial patterns of the vulnerability index were determined by the exposure index in the alpine climate zone. This study will be significant for ecological and environmental protection and the livestock husbandry development.

Keywords: Ecological Vulnerability, Climate Change, Grasslands in Sichuan Northwestern Plateau

川西北高原草地生态系统对气候变化的脆弱性研究

焦翠翠*, 易小波, 文婷, 韦领

四川轻化工大学经济学院, 自贡, 中国

邮箱

jiaocuicui1987@sina.cn (焦翠翠), abobobi@163.com (易小波), 342954071@qq.com (文婷), 940613192@qq.com (韦领)

摘要: 川西北高原草地生态系统位于青藏高原东南缘, 对气候变化敏感, 生态环境脆弱, 位于长江黄河源头, 是我国5大牧区之一, 具有重要的生态和社会作用。因此, 研究G SNP对气候变化的脆弱性具有重要意义。本研究借助长时间序列(1982-2015年)的遥感和气象数据, 在暴露性-敏感性-恢复力框架下运用综合指数方法对G SNP的脆弱性进行评价, 并且综合草地植被类型和气候区划对脆弱性及其3个构成要素的变化规律进行了探讨, 得到如下主要结论: (1)

GSNP的脆弱性指数呈现西北地区最高，东南区域次之，中部地区最低的空间格局；暴露性指数的空间格局决定了脆弱性指数在GSNP的空间分布规律。（2）对于不同草地植被类型之间的脆弱性指数，温性草原的水平最高，高寒草甸次之，温性山地草甸和沼泽的水平最低。不同草地植被类型之间暴露性指数的差异决定了脆弱性指数的差异。（3）对于不同气候区划之间的脆弱性情况，亚热带气候和高原气候之间有所不同。在亚热带气候区域，中亚热带-滇北区的脆弱性指数最低，中亚热带-四川区和北亚热带-秦巴区的脆弱性水平相当，脆弱性的水平由恢复力水平决定；在高原气候区域，高原气候-昌都区的脆弱性指数最高，高原气候-波密-川西区的次之，高原气候-青南区的最低，脆弱性的水平由暴露性指数的水平决定。本研究对GSNP生态环境的保护和畜牧业的发展具有重要的意义。

关键词：生态脆弱性，气候变化，川西北高原草地

1. 引言

生态脆弱性是生态系统的自然属性，可以看作生态系统自我调节功能的一个重要指标[1]。探讨生态系统对气候变化的响应，识别出生态系统对气候变化的脆弱性区域有助于决策者更好地制定政策，合理地分配资源，监测管理制度的实施效果，也可以更好地将风险和政策与公众交流[2]。脆弱性一词最早出现于20世纪60年代末，进入21世纪以来，脆弱性作为描述生态环境、社会环境以及人地耦合系统等发展程度和状况的基本工具，其研究也越来越受到重视[3]，但是脆弱性的概念框架并不统一[4]。概念框架决定了脆弱性研究时评价指标的选择依据，学者们建立的有“压力-状态-响应”，“成因-结果”[5]，“暴露性-敏感性-适应性”[6]以及“生态系统结构-功能-生境”[7]等多种概念框架。目前国内外比较权威的是政府间气候变化委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）第三次评估报告中在“暴露性-敏感性-适应性”框架下给出的定义：脆弱性是指系统易受或没有能力应对气候变化的扰动，包括变率和极端事件而产生不利影响的程度，是气候变异特征、变化幅度和速率以及系统敏感性和适应能力的函数[6]。根据该定义，脆弱性由3个维度的要素构成：暴露性、敏感性和适应能力。

目前，在全球尺度、国家尺度、区域尺度以及局地小区域尺度已经开展了一系列的生态脆弱性评价研究工作[1, 8-11]。Iwamura等、Williams等和Loarie等的研究通过考虑生态系统对气候变化的暴露性表明，非洲、南美洲的北部地区、澳洲北部地区是世界上对气候变化最脆弱的地区[12-14]。Watson等通过采用包络分析法来表征未来气候和当前气候之间的相似程度，对全球陆地生态系统脆弱性的评价结果则表明，南亚和东南亚地区、西欧和中欧，南美洲的东部地区以及澳洲的南部地区是世界上对气候变化最脆弱的区域。该研究在计算脆弱性时首次同时考虑了暴露性和恢复力两个因素，但是没有考虑生态系统对气候变化的敏感性[15]。Li等采用遥感技术和大气环流模型（Global Circulation Models, GCMs），同时考虑了暴露性、敏感性和恢复力这3个脆弱性的构成要素，对全球陆地生态系统当前和未来脆弱性的评价结果表明，脆弱性的区域主要分布在平原地区，气候变化影响下脆弱性最高的群落是荒漠和灌丛，未来的脆弱性地区很可能出现在北半球的高纬度地区[8]。

我国陆地生态系统对气候变化脆弱性的研究主要有，Gao等运用Lund-Potsdam-Jena dynamic global vegetation model (LPJ-DGVM)模型对中国陆地生态系统1981-2050年期间的脆弱性进行了评价，同时考虑了生态系统自身对气候变化的敏感性和恢复力，评价结果表明未来中国陆地生态系统30%的区域为脆弱性区域，草地和荒漠生态系统的脆弱性比较高，主要分布在天山山脉和内蒙古高原地区[10]。Zhao和Wu运用LPJ模型对中国陆地生态系统在3种温室气体排放情境下的脆弱性进行了评估，研究结果表明我国陆地生态系统脆弱性在空间上呈东南向西北地区逐渐增加的空间格局，并且这种格局不会随着气候的变化而变化。在时间上，未来生态系统脆弱性增加的区域主要集中在温带和暖温带的湿润和半湿润地区，降低的区域主要集中在西北干旱区域和青海省-青藏高原地区[16]。Zhao等采用综合指数评价方法对中国陆地生态系统在1901-2013期间对温度变异的脆弱性进行了分析，分析结果表明除了西北半干旱-干旱生态系统和红树林生态系统的脆弱性比较高以外，其他地区植被的脆弱性都在中到低等的水平[11]。

川西北高原草地生态系统（Grasslands in Sichuan Northwestern Plateau, GSNP）位于青藏高原东南缘，地处青藏高原与四川盆地之间，包括甘孜藏族自治州和阿坝藏族羌族自治州，具有典型的过渡带特征，受到西南季风和西风的共同影响，对气候变化敏感，生态环境脆弱[17]。GSNP是中国5大牧区之一，是四川省重要的草食畜牧业基地，这里不仅是广大牧民赖以生存的牧场，也是藏区稳定和发展的基础[18]。因此，开展GSNP对气候变化的脆弱性研究对生态环境的保护、草地资源的可持续利用以及社会经济的稳定发展具有重要的意义。本研究拟以长时间序列的遥感数据和气象数据为基础，在暴露性-敏感性-恢复力框架下运用综合指数方法对GSNP的脆弱性进行评价，主要回答以下3个科学问题：（1）过去30年GSNP的脆弱性及其3个维度构成要素的空间分布格局；（2）GSNP不同草地植被类型的脆弱性水平；（3）GSNP不同气候区划区的脆弱性水平。

2. 材料和方法

2.1. 研究区域

GSNP是青藏高原的一部分，位于四川省西北部甘孜藏族自治州和阿坝藏族羌族自治州境内，地理位置为31°52'-34°20'N, 97°21'-104°27'E，地处长江、黄河源头地

区，是长江、黄河上游地区的重要生态屏障。区域内地形地貌复杂，地势高差悬殊，绝大部分区域海拔在3000 m 以上（图1a）。大部分地区属于高原气候，少部分地区属于中亚热带气候（图1b），冬季漫长而寒冷，基本无夏而清凉（图1c），日照充足，辐射强，降水量在600 – 800 mm

之间，并且多集中在 7-9月份（图1d）。草地植被类型主要有高寒草甸、温带山地草甸、温带草原和沼泽等4大类（图1b），物种主要有高山嵩草、矮生嵩草、大花嵩草、线叶嵩草、木里苔草、丝颖针茅等。

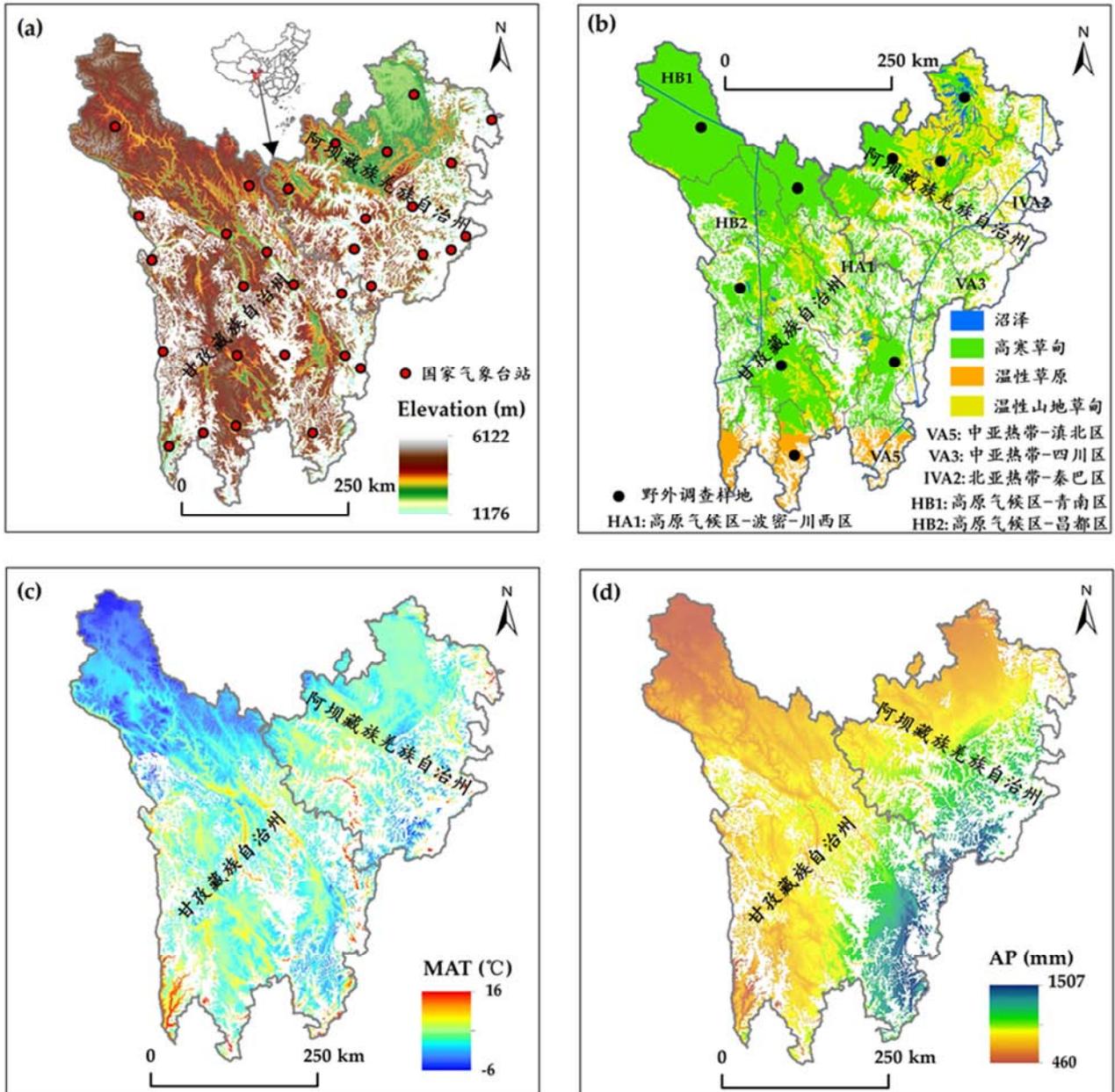


图1 GSNP的基本信息。

(a) 海拔高度的空间格局；(b) 草地类型的空间分布范围；(c) 年平均温度的空间格局；(d) 年总降水量的空间格局
Elevation – 海拔高度，MAT – 年均温度，AP – 年总降水量

2.2. 数据来源

2.2.1. 归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)

1982-2015年期间的NDVI数据来源于GIMMS发布的第三代NDVI产品GIMMS NDVI3g。GIMMS NDVI3g

(<http://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/3g.v1/>)是运用+搭载在National Oceanic and Atmospheric Administration 卫星上的Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) 传感器获取的卫星数据制作得到的时间分辨率为15天的最大值合成(Maximum Value Composite, MVC) NDVI产品，空间分辨率为 $0.083^{\circ} \times 0.083^{\circ}$ (~ 8 km × 8km)。

2.2.2. 气象数据

本研究中使用的气象数据包括温度和降水，这些数据来源于英国东英吉利大学（University of East Anglia）气候研究中心（Climate Research Unit, CRU）发布的气象数据集 CRU TS 4.01（https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.01/cruts.1709081022.v4.01/），时间分辨率为1个月[19]。

2.3. 研究方法

本研究在“暴露性-敏感性-适应能力”框架下，采用综合指数评价方法对GSNP对气候变化的脆弱性进行评价。由于本研究主要考虑气候变化的影响，因此“适应能力”在此主要是指GSNP在气候变化扰动下自身的恢复力，没有包括非气候因素方面的作用。脆弱性与它的3个构成要素暴露性、敏感性和恢复力之间的关系如下（公式1）[8]：

$$VI = \sqrt{\frac{EI \times SI}{1 + RI}} \quad (1)$$

公式(1)中, VI 为 GSNP 的脆弱性指数(vulnerability index), EI 为对气候变化的暴露性指数(exposure index), SI 为对气候变化的敏感性指数(sensitivity index), RI 为 GSNP受到气候扰动之后的恢复力指数(resilience index)。生态系统对气候变化的瞬时响应是由气候变化的暴露性和生态系统对气候变化的敏感性二者共同决定的。因此, 在此假设GSNP的脆弱性随着暴露性和敏感性的变化而呈线性变化。暴露性指数为零或者敏感性指数为零, 表示 GSNP不存在脆弱性。恢复力可以缓解气候变化对GSNP的有害影响, 但是这种调节作用只有在较长的时间尺度才会起作用, 当恢复力为零时, GSNP的脆弱性最大。

2.3.1. 恢复力指数的计算

本研究假设NDVI与温度和降水之间为线性响应关系, NDVI当前时刻的值与温度、降水以及前一刻NDVI之间的值应该符合如下的多元回归模型（公式2）：

$$NDVI_t = \alpha \times T_t + \beta \times P_t + \delta \times NDVI_{t-1} + \varepsilon \quad (2)$$

公式(2)中, $NDVI_t$ 表示 t 时刻NDVI的值, T_t 和 P_t 分别表示 t 时刻温度和和水的值, $NDVI_{t-1}$ 表示 $t-1$ 时刻NDVI的值; α 、 β 和 δ 分别表示回归模型中 T_t 、 P_t 和 $NDVI_{t-1}$ 的回归系数, ε 为模型残差。在模型估算之前, 所有时间序列数据采用z-score 方法进行标准化处理, 为了使得模型系数具有可对比性, 回归系数 α 、 β 和 δ 都最大最小值方法进行标准化处理, 使其范围在0-1之间。

恢复力是指生态系统在受到外界干扰时恢复到原来状态的能力, 公式(2)中多元回归模型中的系数 δ 是一个自回归系数, 表示在两个相邻时刻NDVI的相似程度, 能够间接指示生态系统的恢复力。如果 δ 的绝对值大, 代表生态系统在当前时刻的NDVI更多地依赖于前一刻的NDVI, 生态系统受到扰动后恢复的速率比较小, 生态系统的恢复力低, GSNP对气候变化的自身恢复力指数为 $RI = 1 - \delta$ 。

2.3.2. 暴露性指数的计算

暴露性只考虑外部的气候条件, 可以通过计算变化率来得到, 在此运用气候因素的时间变化率和空间变化率之间的比值来表示（公式3），各个气候因素在1982-2015年期间的空间变化率由最小二乘法计算得到, 空间变化率是基于1982-2015年期间的平均气候因素, 通过计算各个像元周围3×3邻域范围的平均最大值得到。

$$\frac{\text{temporal anomalies}}{\text{spatial gradient}} = \frac{km}{yr} = \frac{^{\circ}C \times yr^{-1}}{^{\circ}C \times km^{-1}} \text{ or } \frac{mm \times yr^{-1}}{mm \times yr^{-1}} \quad (3)$$

公式3中, $\text{temporal anomalies}$ 表示气候因素的时间变化率, spatial gradient 表示气候因素的空间变化率。

在得到温度 (T) 和降水 (P) 的变化率之后, 将这3者的值标准化到0-1之间, 然后结合公式(2)中计算得到的各气候因素的权重, 最后计算得到GSNP对气候变化的暴露性指数（公式4）。

$$EI = \alpha \times E_T + \beta \times E_P \quad (4)$$

公式4中, EI 为暴露性指数, E_T 、和 E_P 分别为温度和降水的变化率, α 和 β 分别为由公式(2)中求得的温度和降水对GSNP影响作用的相对权重。

2.3.3. 敏感性指数的计算

NDVI对各个气候因素变化的敏感性为NDVI变异程度与各气候因素变异程度之间的比值。NDVI与气候因素的变异程度分别采用变量时间序列的平均值与方差之间的比值来表征。NDVI对气候变化总体的敏感性为NDVI对单个气候因素敏感性与其相应的权重相乘然后求和得到。GSNP对气候变化的敏感性可以通过公式5-8计算得到。

$$NDVI_{cv} = \frac{NDVI_{mean}}{NDVI_{var}} \quad (5)$$

$$C_{cv} = \frac{C_{mean}}{C_{var}} \quad (6)$$

$$C_{sens.} = \frac{NDVI_{cv}}{C_{cv}} \quad (7)$$

$$SI = \alpha \times T_{sens.} + \beta \times P_{sens.} \quad (8)$$

公式(5-8)中, $NDVI_{cv}$ 和 C_{cv} 分别表示NDVI和气候变量(T_{cv} 和 P_{cv})的变异程度, $NDVI_{var}$ 和 C_{var} 分别表示NDVI和气候因素 (T_{var} 和 P_{var}) 时间序列的方差, $NDVI_{mean}$ 和 C_{mean} 分别表示NDVI和气候变量 (T_{mean} 和 P_{mean}) 时间序列的平均值, $C_{sens.}$ 表示生态属性对各个气候因素 ($T_{sens.}$ 和 $P_{sens.}$) 变化的敏感性, α 和 β 分别为温度和降水对GSNP影响作用的相对权重, SI 为生态属性对气候变化的敏感性。

3. 结果与讨论

3.1. GSNP 脆弱性以及暴露性、敏感性和恢复力的空间格局

在NDVI与温度和降水之间为线性响应关系这个假设前提下, 本研究分析了在温度和降水的共同影响下, GSNP

的脆弱性以及脆弱性3个构成要素的情况（图2）。GSNP的气候暴露性指数在区域内的西北地区最高，东南区域次之，在中部地区最低（图2a）；敏感性指数在整个区域都比较高，没有明显的空间分异（图2b）；恢复力指数在整个区域也都比较高，也没有明显的空间分异（图2c）；脆弱性指数的空间格局与暴露性指数的空间格局类似（图2a, d）。

个区域也都比较高，也没有明显的空间分异（图2c）；脆弱性指数的空间格局与暴露性指数的空间格局类似（图2a, d）。

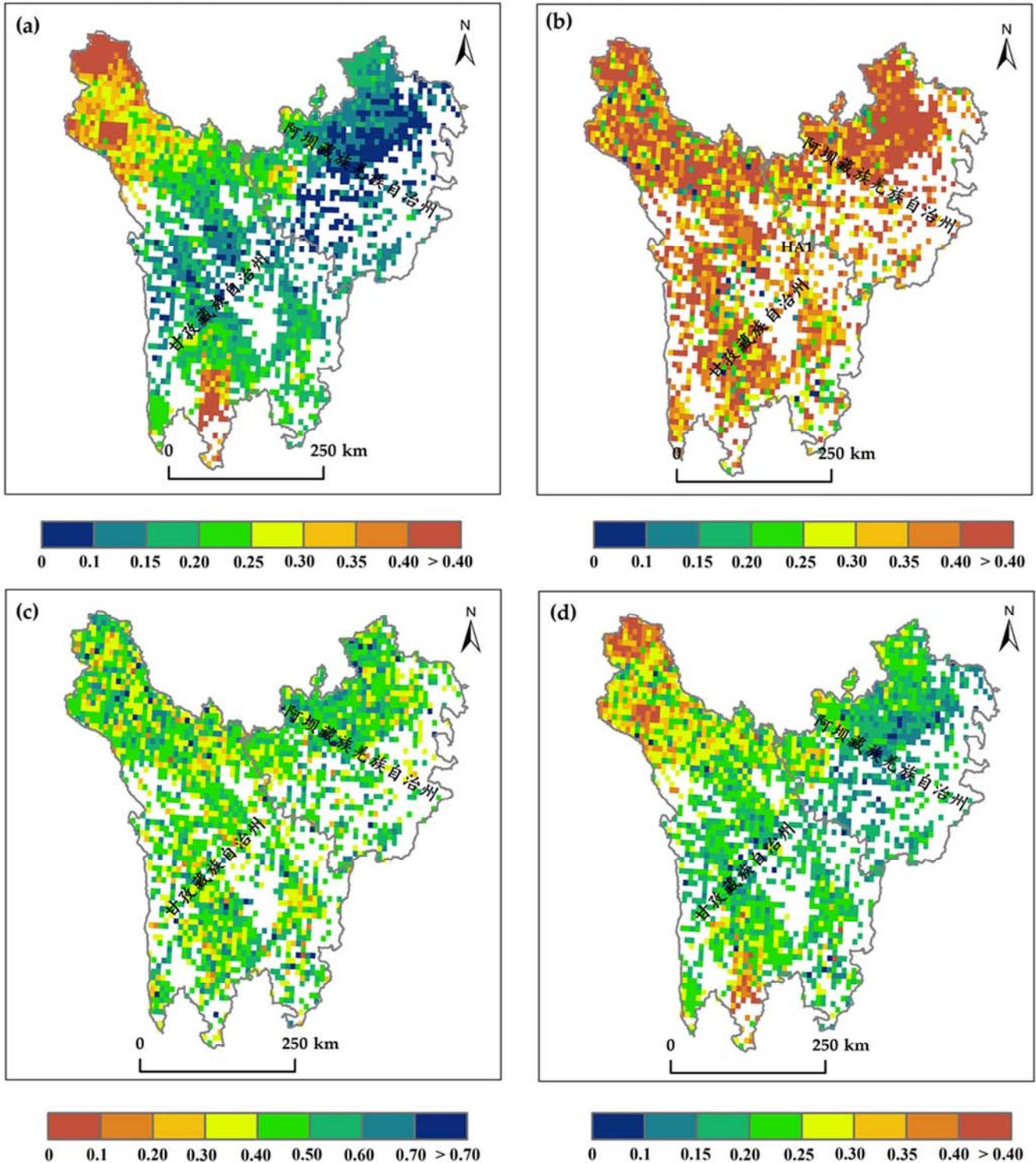


图2 GSNP的暴露性指数 (a)、敏感性指数 (b)、恢复力指数 (c) 和脆弱性指数 (d) 的空间格局。

3.2. 不同植被类型的脆弱性以及暴露性、敏感性和恢复力

不同草地植被类型之间暴露性指数、敏感性指数、恢复力指数和脆弱性指数的对比分析表明（图3），对于暴露性指数，温性草原的暴露性指数水平最高，高寒草甸次之，温性山地草甸和沼泽的水平相当，低于前二者（图3a）；

对于敏感性指数，不同植被类型敏感性指数水平由高到低的顺序分别是沼泽、温性山地草甸、高寒草甸和温性草原（图3b）；4种植被类型的恢复力指数水平相当（图3c）；对于脆弱性指数，温性草原的水平最高，高寒草甸次之，温性山地草甸和沼泽的水平最低。（图3d）。

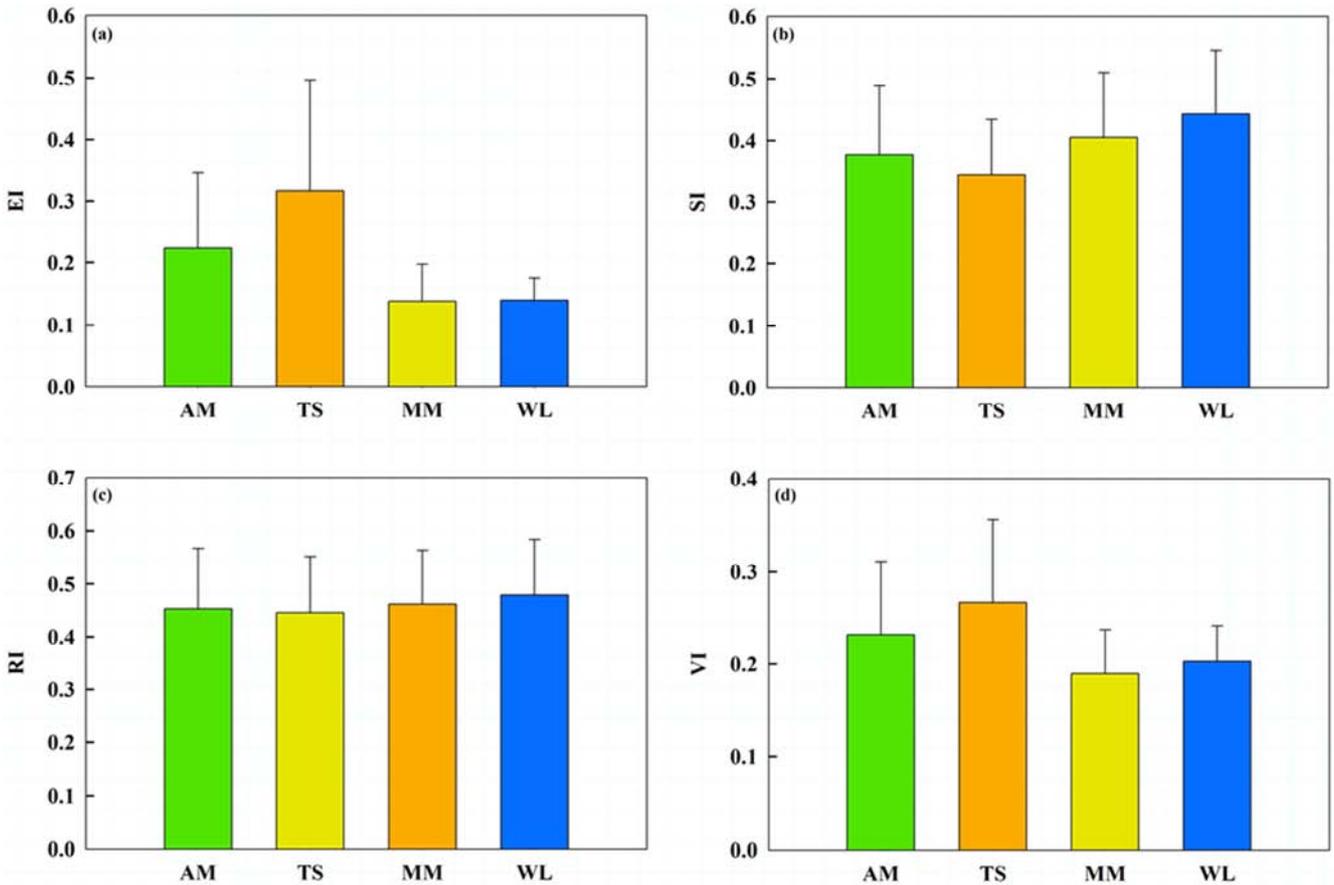


图3 不同草地植被类型的暴露性指数 (a)、敏感性指数 (b)、恢复力指数 (c) 和脆弱性指数 (d)。

EI-暴露性指数、SI-敏感性指数、RI-恢复力指数、VI-脆弱性指数
AM-高寒草甸、TS-温性草原、MM-温性山地草甸、WL-沼泽

3.3. 不同气候区划的脆弱性以及暴露性、敏感性和恢复力

不同气候区划之间脆弱性指数以及暴露性指数、敏感性指数和恢复力指数的对比分析表明（图4），在亚热带区域，中亚热带-滇北区的暴露性指数最高，中亚热带-四川区的次之，北亚热带-秦巴区的最低（图4a）；敏感性指数的变化规律则与暴露性指数的相反，北亚热带-秦巴区的敏感性指数最高、中亚热带-滇北区的最低，中亚热带-四川区的居中（图4b）；中亚热带-滇北区的恢复力最低，中亚热带-四川区和北亚热带-秦巴区的恢复力水平相当（图4c）。中亚热带-滇北区的脆弱性指数最低，中亚热带-四川区和北亚热带-秦巴区的脆弱性水平相当（图4d）。

脆弱性指数在亚热带不同气候区划之间的变化规律与恢复力水平的一致（图4c, d）。

在高原气候区，暴露性指数的变化规律与敏感性指数的变化规律一致（图4a,b），都是高原气候-昌都区的指数最高，高原气候-青南区的最低，高原气候-波密-川西区的居中；高原气候-青南区的恢复力水平最高，高原气候-波密-川西区和高原气候-昌都区的恢复力水平相当（图4c）；高原气候-昌都区的脆弱性指数最高，高原气候-波密-川西区的次之，高原气候-青南区的最低（图4d）。脆弱性指数在高原气候不同区划之间的变化规律与暴露性指数的一致（图4a, d）。

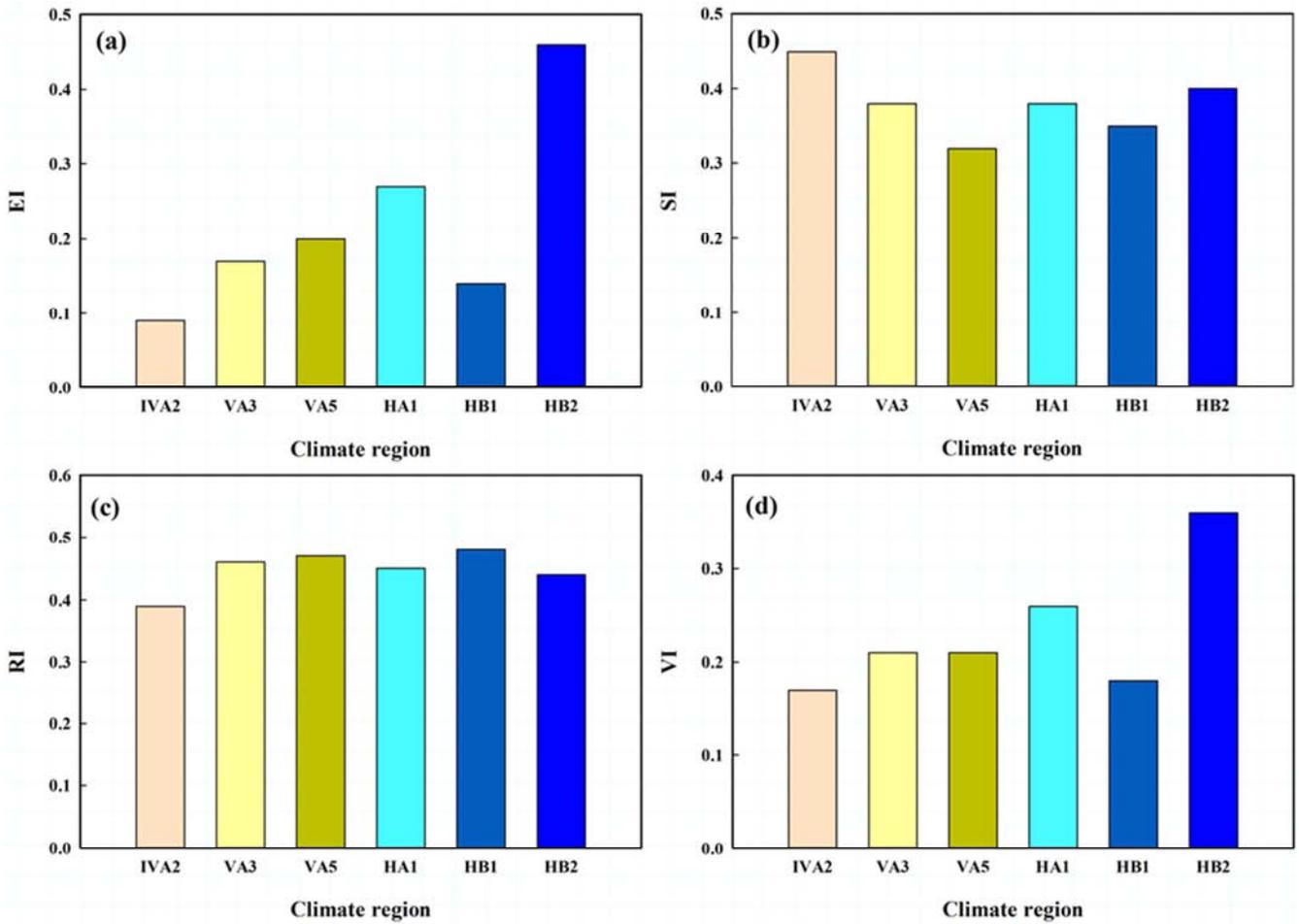


图4 不同气候区划的暴露性指数 (a)、敏感性指数 (b)、恢复力指数 (c) 和脆弱性指数 (d)。

EI-暴露性指数、SI-敏感性指数、RI-恢复力指数、VI-脆弱性指数

IV2-北亚热带-秦巴区、VA3-中亚热带-四川区、VA5-中亚热带-滇北区、HA1-高原气候-波密-川西区、HB1-高原气候-青南区、HB2-高原气候-昌都区

4. 结论

本研究采用IPCC对脆弱性的定义，在暴露性-敏感性-恢复力框架下，采用综合指数评价方法，借助长时间序列的遥感和气象数据对川西北高原草地生态系统 (GSNP) 在过去30多年的脆弱性水平进行了评价。研究表明，

(1) 暴露性指数决定了GSNP脆弱性的空间格局，呈现了中部地区最低，东南区域次之，西北地区最高的空间分布规律；

(2) 不同草地植被类型之间脆弱性指数的差异也由暴露性指数水平决定。温性山地草甸和沼泽的脆弱性水平最低，高寒草甸次之，温性草原的水平最高。

(3) 对于不同气候区划之间的脆弱性情况，亚热带气候和高原气候之间有所不同。在亚热带气候区域，脆弱性的水平由恢复力水平决定，中亚热带-滇北区的脆弱性指数最低，中亚热带-四川区和北亚热带-秦巴区的脆弱性水平相当；在高原气候区域，脆弱性的水平由暴露性指数的水平决定，高原气候-青南区的最低，高原气候-波密-川西区的次之，高原气候-昌都区的脆弱性指数最高。

致谢

本研究受到四川轻化工大学校内人才引进项目 (2017RCSK19, 2017RCSK20)，四川省旅游局旅游科研重点基地智慧旅游研究基地重点项目 (ZHZR18-01, ZHYR19-01)，四川省高校人文社会科学重点研究基地-四川省农村社区治理研究中心项目 (SQZL2019C03)，四川省高校人文社会科学重点研究基地-四川旅游发展研究中心项目 (LY19-40) 和自贡市社科联产业转型与创新研究中心项目 (CZ19B01) 的支持。

参考文献

[1] Jiang L, Huang XX, Wang FT, Liu YC, An PL. Method for evaluating ecological vulnerability under climate change based on remote sensing: A case study. *Ecological Indicators* 2018, 85: 479-486.

- [2] de Sherbinin A, Bukvic A, Rohat G, Gall M, McCusker B, Preston B, Apotsos A, Fish C, Kienberger S, Muhonda P, Wilhelmi O, Macharia D, Shubert W, Sliuzas R, Tomaszewski B, Zhang SA. Climate vulnerability mapping: A systematic review and future prospects. *Wiley Interdisciplinary Reviews-Climate Change* 2019, 10(5): e600.
- [3] 陈萍, 陈晓玲. 全球环境变化下人-环境耦合系统的脆弱性研究综述. *地理科学进展* 2010, 29(04): 454-462.
- [4] Tonmoy FN, El-Zein A, Hinkel J. Assessment of vulnerability to climate change using indicators: a meta-analysis of the literature. *Wiley Interdisciplinary Reviews-Climate Change* 2014, 5(6): 775-792.
- [5] Turner BL, Kasperson RE, Matson PA, McCarthy JJ, Corell RW, Christensen L, Eckley N, Kasperson JX, Luers A, Martello ML, Polsky C, Pulsipher A, Schiller A. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 2003, 100(14): 8074-8079.
- [6] McCarthy JJ, Canziani OF, Leary NA, Dokken DJ, White KS. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press: Cambridge, 2001.
- [7] 杨飞, 马超, 方华军. 脆弱性研究进展: 从理论研究到综合实践. *生态学报* 2019(02): 441-453.
- [8] Li DL, Wu SY, Liu LB, Zhang YT, Li SC. Vulnerability of the global terrestrial ecosystems to climate change. *Global Change Biology* 2018, 24(9): 4095-4106.
- [9] Eigenbrod F, Gonzalez P, Dash J, Steyl I. Vulnerability of ecosystems to climate change moderated by habitat intactness. *Global Change Biology* 2015, 21(1): 275-286.
- [10] Gao JB, Jiao KW, Wu SH. Quantitative assessment of ecosystem vulnerability to climate change: methodology and application in China. *Environmental Research Letters* 2018, 13(9): 094016.s
- [11] Xu Y, Shen ZH, Ying LX, Ciais P, Liu HY, Piao SL, Wen C, Jiang YX. The exposure, sensitivity and vulnerability of natural vegetation in China to climate thermal variability (1901-2013): An indicator-based approach. *Ecological Indicators* 2016, 63: 258-272.
- [12] Iwamura T, Wilson KA, Venter O, Possingham HP. A Climatic Stability Approach to Prioritizing Global Conservation Investments. *Plos One* 2010, 5(11): e15103.
- [13] Loarie SR, Duffy PB, Hamilton H, Asner GP, Field CB, Ackerly DD. The velocity of climate change. *Nature* 2009, 462(7276): 1052-U1111.
- [14] Williams JW, Jackson ST, Kutzbach JE. Projected distributions of novel and disappearing climates by 2100 AD. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 2007, 104(14): 5738-5742.
- [15] Watson JEM, Iwamura T, Butt N. Mapping vulnerability and conservation adaptation strategies under climate change. *Nature Climate Change* 2013, 3: 989.
- [16] Zhao DS, Wu SH. Vulnerability of natural ecosystem in China under regional climate scenarios: An analysis based on eco-geographical regions. *Journal of Geographical Sciences* 2014, 24(2): 237-248.
- [17] 张虹娇. 川西北高原气候变化特征研究. *西南大学学报(自然科学版)* 2014, 36(12): 148-156.
- [18] 张广裕, 张丽霞. 川西北高原生态环境调查研究——以阿坝州为例. *草业与畜牧* 2013(05): 54-57.
- [19] Harris I, Jones PD, Osborn TJ, Lister DH. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology* 2014, 34(3): 623-642.