DOI: 10.20103/j.stxb.202307171526
沈文婕,康宇杰,张晓凡,刘延国,周晓慧,李景吉.大熊猫国家公园四川片区植被时空变化及其地形分异.生态学报,2024,44(20):9081-9093.
Shen W J, Kang Y J, Zhang X F, Liu Y G, Zhou X H, Li J J.Spatio-temporal variation of vegetation and its topographic differentiation in the Sichuan area of Giant Panda National Park.Acta Ecologica Sinica,2024,44(20):9081-9093.

大熊猫国家公园四川片区植被时空变化及其地形分异

沈文婕[1,2],康宇杰[2],张晓凡[2],刘延国[3],周晓慧[2],李景吉[1,2,*]
1 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,成都　610059
2 成都理工大学生态环境学院,成都　610059
3 西南科技大学环境与资源学院,绵阳　621010

摘要:大熊猫国家公园四川片区地处青藏高原东缘和国家重要生态功能区,区域地形复杂多变、植被类型多样,探究植被时空动态特征及其与地形因子的关系,对科学指导大熊猫栖息地保护与修复具有重要意义。基于 MODIS 增强型植被指数(EVI)数据,运用 Theil Sen 斜率、Mann-Kendall 趋势分析以及地形差异修正方法,研究了 2000—2020 年间大熊猫国家公园四川片区植被时空变化特征及其与海拔、坡度、坡向等地形因子的关系。结果表明:(1)2000—2020 年,大熊猫国家公园四川片区植被 EVI 整体呈波动增加趋势(0.0019/a),空间上呈东高西低、北高南低的分布特点。(2)植被整体呈改善趋势,植被 EVI 改善区面积占比(73.99%)远大于植被退化区(12.72%),其中,阔叶林改善区面积占比最大(83.35%),草甸退化区面积占比最大(17.83%)。(3)植被 EVI 与海拔、坡度呈显著负相关($P<0.01$),与坡向的负相关性不显著。其中,草甸与海拔($P<0.01$)、坡度($P<0.05$)呈显著负相关,与坡向呈显著正相关($P<0.05$);针叶林与海拔、坡度呈显著负相关($P<0.01$);阔叶林、灌丛仅与海拔呈显著负相关($P<0.01$)。(4)植被明显改善区主要分布在 2500m 以下、坡度为 15°—25°的阴坡山区,植被严重退化区主要分布在 3000—3500m 之间、坡度小于 15°的东南坡山区。研究揭示了大熊猫国家公园四川片区植被变化的地形分异特征,为复杂地形下大熊猫栖息地植被保护提供了科学依据。

关键词:增强型植被指数;时空变化;地形因子;大熊猫国家公园四川片区

Spatio-temporal variation of vegetation and its topographic differentiation in the Sichuan area of Giant Panda National Park

SHEN Wenjie[1,2], KANG Yujie[2], ZHANG Xiaofan[2], LIU Yanguo[3], ZHOU Xiaohui[2], LI Jingji[1,2,*]
1 *State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu* 610059, *China*
2 *College of Ecology and Environment, Chengdu University of Technology, Chengdu* 610059, *China*
3 *School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang* 621010, *China*

Abstract: Sichuan area of Giant Panda National Park is located on the eastern Qinghai-Tibet Plateau and the national key ecological function area.The terrain in the area is complex and varied, with diverse vegetation. It is significant to explore the spatio-temporal characteristics of the vegetation and its relationship with topographic factors in order to scientifically guide the management and ecological construction of giant panda habitat. In this study, we used the Theil-Sen Median trend analysis and the Mann-Kendall test, based on MODIS enhanced vegetation index (EVI) data to investigate the spatial and temporal variation characteristics of vegetation in the Sichuan area of Giant Panda National Park from 2000 to 2020. Additionally, the relationship between EVI and topographic factors such as elevation, slope and aspect were explored by using a topographic difference correction method. The results were as follows: (1) From 2000 to 2020, the averaged EVI

基金项目:第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0307)
收稿日期:2023-07-17;　　**网络出版日期**:2024-07-26
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: lijingji2014@cdut.edu.cn

appeared to have an overall trend of fluctuation and increase with an average annual variation rate of 0.0019/a, and showed a distribution pattern of high in the east and north but low in the west and south. (2) Vegetation showed an overall improving trend. The vegetation improvement area accounted for 73.99%, which was much larger than the proportion of 12.72% in the vegetation degradation area. Among them, the broadleaf forest improvement area had the largest area proportion of 83.35%, and the meadow degradation area had the largest area proportion of 17.83%. (3) The EVI was significantly negatively correlated with elevation and slope ($P<0.01$), and the negative correlation with aspect was not significant. Among them, the meadow was significantly negatively correlated with elevation ($P<0.01$) and slope ($P<0.05$), and significantly positively correlated with aspect ($P<0.05$). The coniferous forest was significantly negatively correlated with elevation and slope ($P<0.01$). However, the broadleaf forest and scrub were only significantly negatively correlated with elevation ($P<0.01$). (4) The vegetation significant improvement type was the mainly dominant distribution in the area with the elevation below 2500m, slope of 15°—25°, and slope aspect of the north, northeast and northwest slopes. The vegetation significant degradation type was the mainly dominant distribution in the area with the elevation of 3000—3500 m, slope below 15°, and slope aspect of the southeast slope. Therefore, the study reveals the topographic differentiation characteristics of vegetation variation in the Sichuan area of Giant Panda National Park, and provides a scientific basis for the vegetation protection of giant panda habitats under complex terrain.

Key Words: enhanced vegetation index (EVI); the spatial and temporal variation; topographic factor; Sichuan area of Giant Panda National Park

植被是连接大气、土壤和水体等环境条件的“纽带”[1],对物质循环、能量流动起着重要连接作用[2],植被动态变化能够直接反映区域生态环境状况[3],全球气候变化下植被动态变化机制是生态学研究的热点问题之一[4—6]。卫星遥感技术具有覆盖范围广、重访周期短等优点[7],是目前监测全球植被变化的最有效手段之一。在植被遥感指数中,归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、增强型植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)是目前反映植被生长状况最常用的两种植被指数[8]。EVI 通过改进算法和合成方法[9],克服了 NDVI 高植被覆盖易饱和、大气干扰校正有限、易受树冠背景影响和最大合成法处理不能得到最佳像元等问题[10—11],相同空间分辨率下较 NDVI 具有更强的植被差异识别能力[12],能更好地反映高植被覆盖区植被的空间异质性[13]。

地形是影响植被分布的重要环境因子[14]。其中,海拔通过影响土壤分布和水热条件,主导着山地植被垂直分布格局的形成[15];坡度、坡向通过影响地表径流、土壤性质、太阳辐射等,调控了山地植被的差异性分布[16—17],不同地形因子综合作用影响了植被的生长与分布过程[18]。以往研究发现,不同区域植被分布对地形因子的响应特征不同[19—20]。如,腾格里沙漠[21]、陕西省[22]植被主要分布在低海拔地带;青藏高原西南部[16]、西北砒砂岩区[17]、色林错地区[19]、鄂西山区[23]、青藏高原冻土区[24]、黄土高原万辉沟流域[25]等地植被分布主要受海拔和坡度影响;秦岭山地[26]、卧龙自然保护区[27]植被分布明显受坡向制约;而三江源地区[18]、重庆市[28]植被分布在平地区域差异显著,在其余坡向上差异不明显。因此,研究植被时空格局与地形因子的关系有助于揭示植被分布的地域规律。

大熊猫国家公园四川片区位于青藏高原东缘,是全球地形地貌最为复杂、气候垂直分布最为明显的地区之一,也是国际高度关注的生物多样性研究热点地区之一[29]。区内高差悬殊、地势地表崎岖,植被受地形分布影响尤为显著[30—31]。目前,大熊猫国家公园的研究主要集中在生态安全[29,32]、生态系统服务价值[33]、植被时空变化特征[34—36]等方面,该区植被变化在不同地形因子上的分布特征尚不清楚。鉴于此,本文基于 MODIS EVI 数据,运用 Theil Sen 斜率、Mann-Kendall 趋势分析方法以及地形差异修正方法,研究 2000—2020 年生长季(4—10 月)大熊猫国家公园四川片区植被时空变化特征及其与地形因子的关系,揭示大熊猫国家公园四川片区植被变化的地形分异特征,以期为大熊猫国家公园四川片区生态保护和可持续发展提供科学依据。

1　研究区概况

大熊猫国家公园跨四川、陕西和甘肃三省,包括岷山片区、邛崃山-大相岭片区、秦岭片区、白水江片区,总面积为 27134km^2[36]。其中,四川片区面积 20177km^2,涉及 7 市(州)20 县(市、区),地理坐标为 102°27′—105°57′E、29°42′—33°34′N 之间,海拔 589—5473m(图 1)。区域地质结构复杂,有龙门山-岷山等多条断裂带,地震、滑坡、泥石流等地质灾害频发[37]。研究区地处大陆性北亚热带向暖温带过渡的季风气候区,年均温约 10—17℃,年降雨量约 500—1200mm。区内植被垂直分布明显,由低到高海拔依次分布有山地常绿和落叶阔叶混交林、亚高山针叶林、高山草甸和灌丛等植被类型[38]。

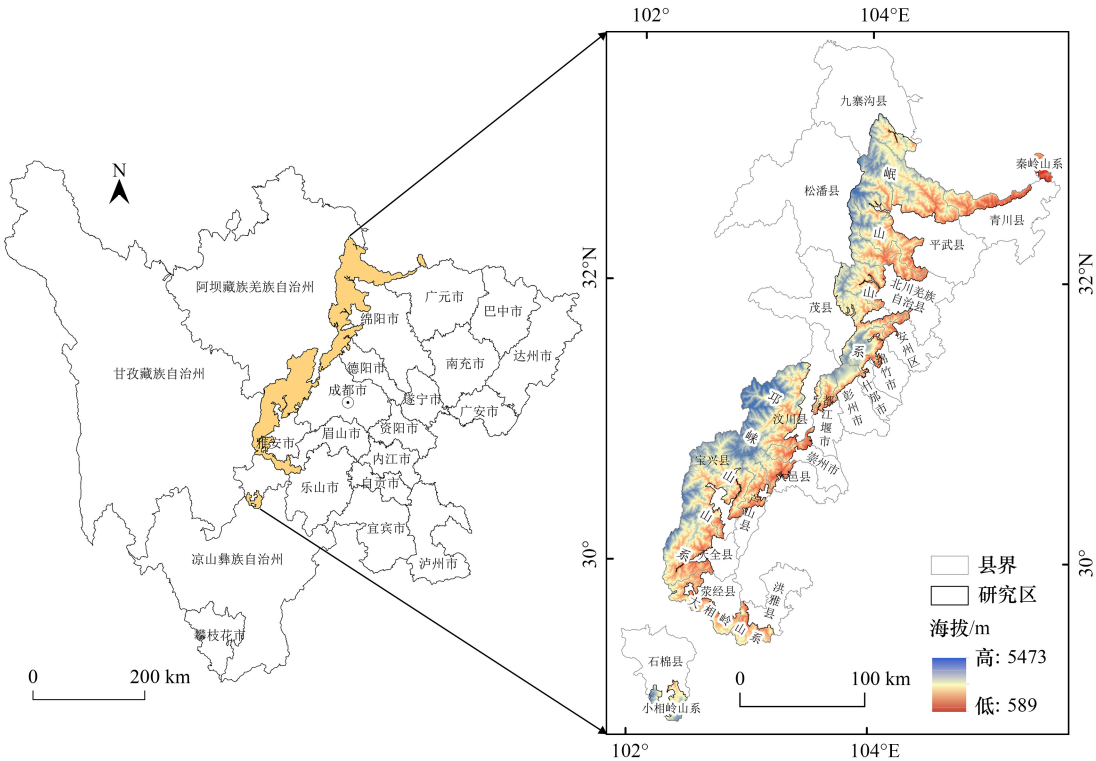

图 1　研究区位置

Fig.1　Location of the study area

2　数据来源与研究方法

2.1　数据来源与处理

EVI 数据来源于美国国家航空航天局(https://lpdaac.usgs.gov/)MODIS 数据 MOD13Q1 产品,空间分辨率 250m,时间分辨率 16d,条带号 h26v05、h26v06 和 h27v05,时间跨度为 2000—2020 年,选取植被长势较好的 4—10 月作为其生长季[5],使用 MRT(MODIS Reprojection Tools)工具对其进行格式转换、投影、重采样处理。为消除大气、云雾、太阳高度角等导致的数据误差,采用最大值合成法(Maximum Value Composite, MVC)得到逐月 EVI,再用平均值法计算逐年平均 EVI。

DEM 数据来源于地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn)的 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)数据,空间分辨率 90m,经镶嵌、投影、裁剪、重采样等处理后,得到空间分辨率 250m 的高程数据,坡度、坡向数据由该数据提取获得。根据大熊猫国家公园四川片区海拔分布特点,以 500m 为一个统计单元,将研究区划分为 8 个海拔带(<1500m、1500—2000m、2000—2500m、2500—3000m、3000—3500m、3500—4000m、

4000—4500m、>4500m,图 2)。根据《水土保持综合治理规划通则(GB/T 15772—2008)》,将研究区划分为 5 个坡度带(<5°、5°—15°、15°—25°、25°—35°、>35°,图 2)。根据研究区实际情况和相关研究[37,39],将坡向划分为北坡(0—22.5° 和 337.5°—360°)、东北坡(22.5°—67.5°)、东坡(67.5°—112.5°)、东南坡(112.5°—157.5°)、南坡(157.5°—202.5°)、西南坡(202.5°—247.5°)、西坡(247.5°—292.5°)和西北坡(292.5°—337.5°)等 8 个坡向带(图 2)。

植被类型数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/)的中国 100 万植被类型空间分布数据,其植被类型分为 11 类。大熊猫国家公园四川片区共分布灌丛(30.82%)、针叶林(27.96%)、阔叶林(24.8%)、草甸(12.09%)、高山植被(1.82%)、针阔叶混交林(1.48%)和栽培植被(1.04%)等 7 种植被类型,本文选取灌丛、针叶林、阔叶林和草甸这 4 种面积占比较大的植被类型作为主要研究对象(图 2)。

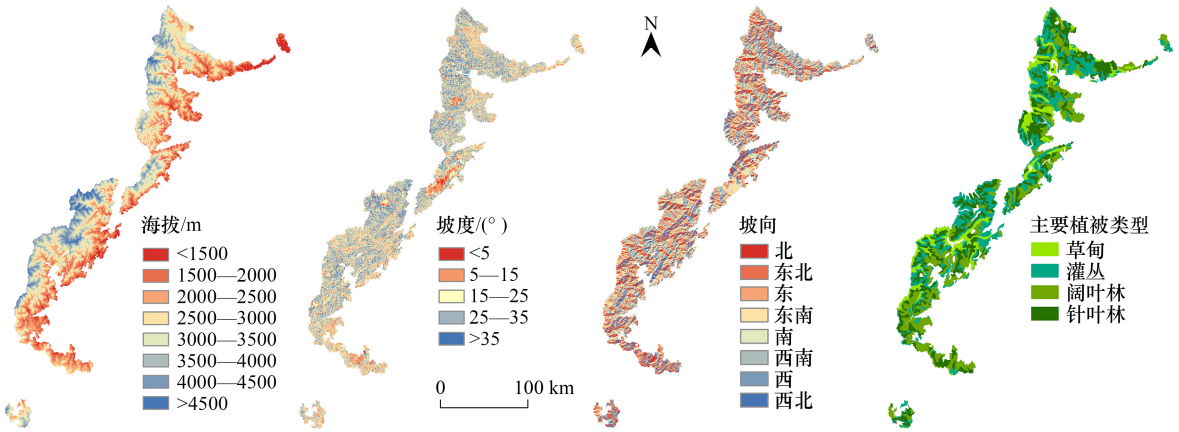

图 2 大熊猫国家公园四川片区海拔、坡度、坡向与主要植被类型分布

Fig.2 Spatial distribution of elevation, slope, aspect and the main vegetation types in the Sichuan area of Giant Panda National Park

2.2 研究方法

2.2.1 Sen+M-K 趋势分析

Theil Sen 斜率是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法,可有效避免时间序列数据缺失和数据分布形态的影响,并且可以消除异常值对时间序列的干扰[18]。计算公式如下:

$$\beta = \text{median}\,\frac{\text{EVI}_j - \text{EVI}_i}{j - i} \tag{1}$$

式中,$1<i<j<n$,i、j 为时间序列数;EVI_i、EVI_j分别为 i、j 时间序列的 EVI 数值。当斜率 β 大于 0 时则表示存在上升趋势,小于 0 表示存在下降趋势。

Mann-Kendall(M-K)检验是用于分析数据序列随时间的变化趋势的一种非参数统计检验方法,可以减少数据异常值[29]。计算公式如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}\text{sgn}(\text{EVI}_j - \text{EVI}_i) \tag{2}$$

$$\text{sgn}(\text{EVI}_j - \text{EVI}_i) = \begin{cases} 1 & \text{EVI}_j - \text{EVI}_i > 0 \\ 0 & \text{EVI}_j - \text{EVI}_i = 0 \\ -1 & \text{EVI}_j - \text{EVI}_i < 0 \end{cases} \tag{3}$$

由此构建趋势检验的统计量:

$$Z=\begin{cases}\dfrac{S-1}{\sqrt{\mathrm{Var}(S)}} & S>0\\ 0 & S=0\\ \dfrac{S+1}{\sqrt{\mathrm{Var}(S)}} & S<0\end{cases} \tag{4}$$

$$\mathrm{Var}(S)=\frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \tag{5}$$

式中:n 为时间序列的长度;sgn 为函数符号。在给定的显著性水平 α 下,当 $|Z|>Z_{1-\alpha/2}$ 时,表示研究序列在 α 水平下存在显著变化。本文取置信度 α 为 0.05,查表得 $Z_{1-\alpha/2}$ 为 1.96。根据变化趋势、显著性水平以及前人研究[29,40],将 EVI 的变化趋势划分为 5 个等级:明显改善($\beta\geqslant0.0005$,$Z\geqslant1.96$)、轻微改善($\beta\geqslant0.0005$,$|Z|<1.96$)、稳定不变($-0.0005<\beta<0.0005$)、轻微退化($\beta<-0.0005$,$|Z|<1.96$)和严重退化($\beta<-0.0005$,$Z\leqslant-1.96$)。

2.2.2　地形差异修正

植被分布往往受地形差异影响而表现出不同的变化特征[16]。然而,在评价植被变化特征时,往往会出现某一植被变化趋势类型在某特定地形条件下的分布面积虽小,但是与该植被变化趋势类型在研究区所占的面积比例相比,此地形条件下该植被变化趋势类型分布面积却较大,从而影响评价的合理性[17,28]。因此,为明确不同地形条件对植被变化类型分布的影响,引入地形差异修正指数 K,用于消除地形因子绝对面积差异造成的影响,其计算公式为:

$$K=\frac{S_{ie}}{S_e}\Big/\frac{S_i}{S} \tag{6}$$

式中,S_{ie} 为植被变化趋势类型 i 在 e 地形条件下的面积;S_i 为植被变化趋势类型 i 的总面积;S_e 为 e 地形总面积;S 为研究区总面积;S_{ie}/S_e 为 e 地形下植被变化趋势类型 i 的面积比;S_i/S 为研究区植被变化趋势类型 i 面积比。$K>1$,表示植被变化趋势类型 i 在 e 地形为优势分布;$K=1$,表示植被变化趋势类型 i 在 e 地形分布平稳;$K<1$,表示植被变化趋势类型 i 在 e 地形呈非优势分布。

3　结果与分析

3.1　植被 EVI 时空变化特征

3.1.1　植被 EVI 时空分布特征

大熊猫国家公园四川片区生长季多年 EVI 均值总体呈东高西低、北高南低的分布特点(图 3)。EVI 高值区(EVI>0.4)主要分布在岷山山系东北部及秦岭山系,零星分布在邛崃山—大小相岭山系,植被类型以阔叶林为主;EVI 中值区(0.2<EVI<0.4)主要分布在岷山山系南部的龙门山地带,零星分布在邛崃山山系,植被类型以针叶林和灌丛为主;EVI 低值区(EVI<0.2)主要分布在岷山山系东部及邛崃山山系东部,植被类型以草甸为主。

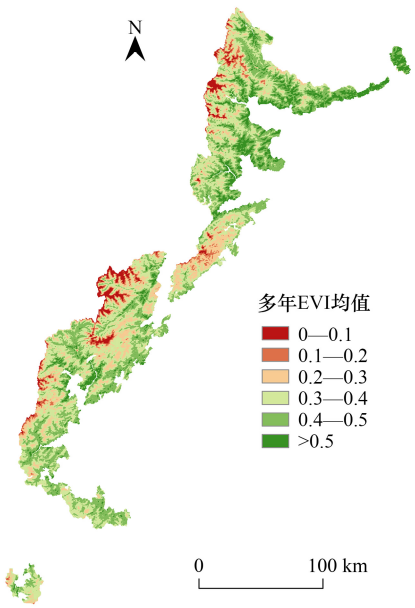

图 3　大熊猫国家公园四川片区生长季多年平均 EVI 空间分布

Fig.3　Spatial distribution of multi-year average EVI during growing season in the Sichuan area of Giant Panda National Park

EVI:增强型植被指数

2000—2020 年,大熊猫国家公园四川片区生长季植被 EVI 整体呈波动增加趋势,增速为 0.0019/a($P<0.01$),均值为 0.37(图 4)。植被 EVI 最小值(0.33)出现在 2012 年,最大值(0.41)出现在 2016 年。2008 年汶

川地震后,植被 EVI 持续降低至 2010 年,2012 年受极端气候影响,植被 EVI 呈明显降低趋势。研究区各植被类型 EVI 年际变化趋势较为一致,均表现为增加趋势,均值和增速从大到小依次为:阔叶林(0.42、0.0026/a)>灌丛(0.37、0.0019/a)>针叶林(0.36、0.0015/a)>草甸(0.32、0.001/a),其中,草甸没有通过显著性检验(图 4)。

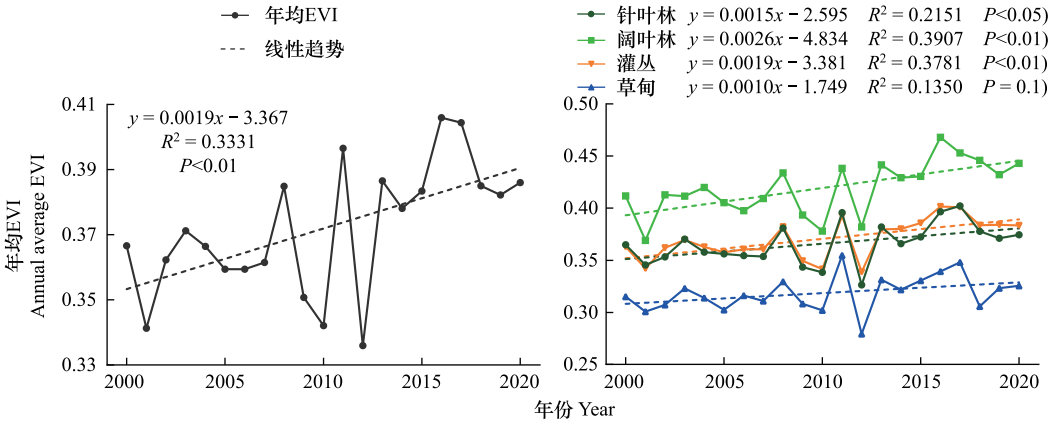

图 4 2000—2020 年大熊猫国家公园四川片区生长季整体及各植被类型 EVI 年际变化

Fig.4 Inter-annual changes of EVI and for each vegetation type during the growing season in the Sichuan area of Giant Panda National Park from 2000 to 2020

3.1.2 植被 EVI 空间变化趋势

大熊猫国家公园四川片区植被 EVI 整体呈改善趋势,植被改善区面积远大于植被退化区(表 1、图 5)。植被改善区面积占比达到 73.99%,主要分布在岷山山系东北部、秦岭山系和大相岭山系;植被稳定不变区面积占比为 13.29%,在研究区广泛分布;植被退化区面积占比仅 12.72%,主要分布在什邡市九顶山和彭州市白水河自然保护区,零星分布在邛崃山山系、岷山山系西北部和小相岭山系。研究区各植被类型 EVI 空间变化趋势大致相同,植被变化以改善为主;其中,阔叶林改善区面积占比最大(83.35%),草甸退化区面积占比最大(17.83%)。

表 1 大熊猫国家公园四川片区植被 EVI 变化趋势统计

Table 1 Statistics of EVI trend in the Sichuan area of Giant Panda National Park

β	Z	EVI 趋势变化 Trend of EVI	面积占比 Area propotion/%				
			针叶林 Coniferous forest	阔叶林 Broadleaf forest	灌丛 Shrub	草甸 Meadow	整体 Whole
≥0.0005	≥1.96	明显改善	24.90	42.90	35.31	18.07	32.62
≥0.0005	-1.96—1.96	轻微改善	46.42	40.45	37.53	43.54	41.37
-0.0005-0.0005	-1.96—1.96	稳定不变	14.80	7.84	13.36	20.57	13.29
<-0.0005	-1.96—1.96	轻微退化	12.59	7.99	12.35	17.02	11.60
<-0.0005	<-1.96	严重退化	1.29	0.82	1.46	0.81	1.12

β 表示斜率,Z 表示检验统计量;EVI:增强型植被指数 Enhanced vegetation index

3.2 植被 EVI 的地形分异特征

3.2.1 植被 EVI 对高程的响应特征

大熊猫国家公园四川片区不同海拔的植被 EVI 变化明显(图 6)。各植被类型 EVI 均随海拔升高而降低,<1500m 区域植被 EVI 最高,植被类型以阔叶林、灌丛为主;超过 4000m 后,植被 EVI 呈阶梯式减小,>4500m 区域植被 EVI 最低,植被类型以灌丛和草甸为主。基于 Pearson 相关系数表示植被 EVI 与各地形因子的相关性(表 2),植被 EVI 与海拔呈显著负相关(P<0.01),各植被类型 EVI 与海拔均表现出明显的负相关关系(P<0.01),相关系数依次为:灌丛>草甸>针叶林>阔叶林,表明海拔增加会抑制植被生长。

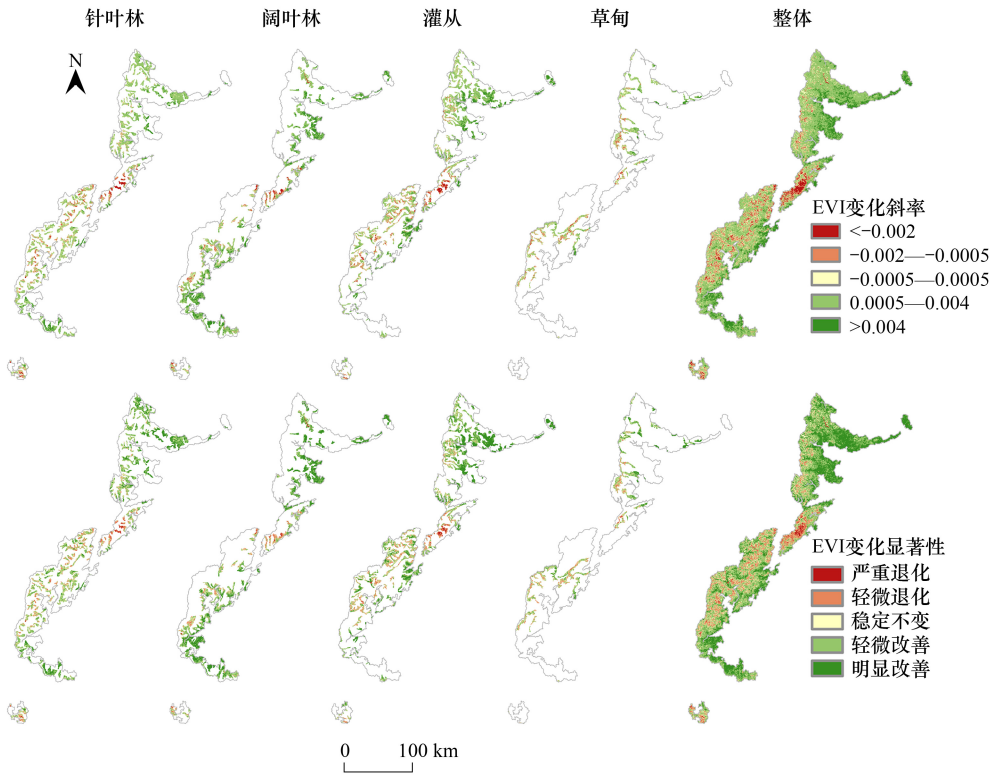

图 5　2000—2020 年大熊猫国家公园四川片区针叶林、阔叶林、灌丛、草甸及整体 EVI 变化趋势及显著性检验

Fig.5　Variation trend and significance test of EVI in coniferous forest, broadleaf forest, scrub, meadow and the whole in the study area from 2000 to 2020

表 2　大熊猫国家公园四川片区植被 EVI 与地形因子的相关系数

Table 2　Correlation coefficients between EVI and topographic factors in the Sichuan area of Giant Panda National Park

地形因子 Topographic factors	针叶林 Coniferous forest	阔叶林 Broadleaf forest	灌丛 Shrub	草甸 Meadow	EVI
海拔 Elevation	-0.67**	-0.566**	-0.793**	-0.767**	-0.78**
坡度 Slope	-0.122**	-0.077	-0.04	-0.136*	-0.088**
坡向 Aspect	-0.022	-0.078	-0.049	0.131	-0.014

“*”和“**”分别表示通过了 95%和 99%的置信度检验

大熊猫国家公园四川片区不同海拔范围的植被变化趋势类型分布差异明显(图 7)。植被明显改善型在海拔 2500m 以下区域为主导优势分布($1.23<K<2.38$),4500m 以上区域为优势分布;植被轻微改善型仅在 2500—3000m 为主导优势分布($K=1.22$),在 2000—2500m、4000—4500m 为优势分布;植被稳定不变型在海拔 2500m 以上区域为优势分布,4000m 以上区域为主导优势分布($1.63<K<1.83$);植被轻微退化型和严重退化型在 3000—4000m 为优势分布,分别在 3500—4000m($K=2.37$)、3000—3500m($K=2.50$)为主导优势分布。植被明显改善型面积占比随海拔升高呈先降后增趋势,在 3500—4000m 最小(8.67%);植被轻微改善型在 1500m 以上区域面积占比均高于 25%,在 2500—3000m 最大(50.34%);植被稳定不变型和轻微退化型面积占比随海拔升高呈先增后降趋势,在 3500—4000m 达到峰值(分别为 24.73%和 27.46%);植被严重退化型除在 3000—4000m 面积占比大于 2.5%外,其余区域占比均小于 1%。

3.2.2　植被 EVI 对坡度的响应特征

大熊猫国家公园四川片区不同坡度的植被 EVI 差异较小(图 8)。各植被类型 EVI 随坡度增加呈先增加后下降趋势,均在 15°—25°区域最高;在坡度小于 25°区域,各植被类型组成基本稳定,在大于 25°区域,阔叶

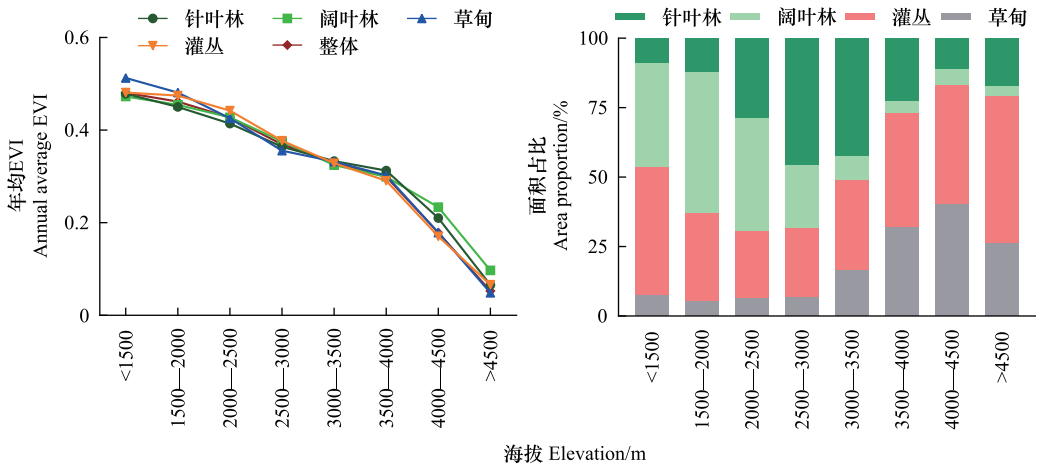

图 6 大熊猫国家公园四川片区多年平均 EVI 的海拔分异和不同海拔范围的各植被类型占比

Fig.6 Elevation differences in the multi-year average EVI and percentage of vegetation types in area of different elevation zones in the Sichuan area of Giant Panda National Park

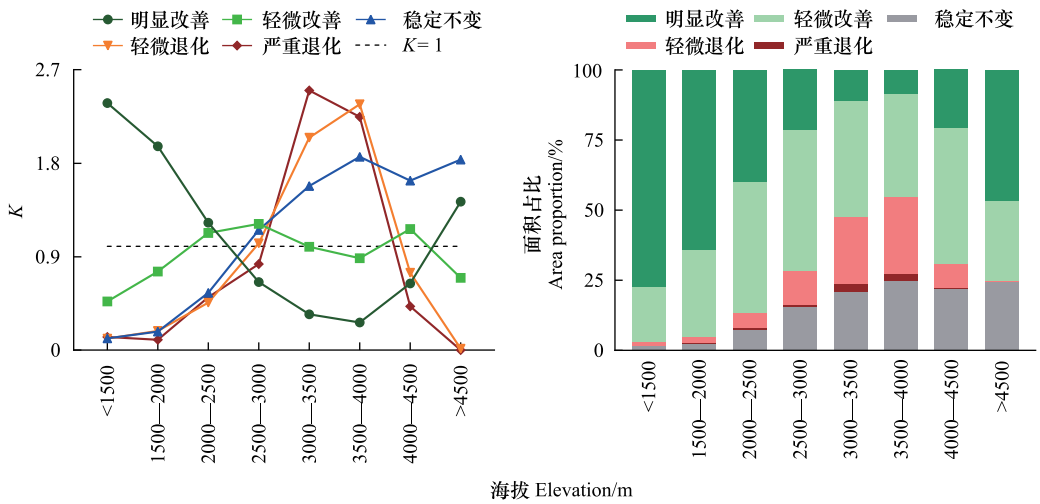

图 7 大熊猫国家公园四川片区各植被变化趋势类型在不同海拔范围的分布指数和占比

Fig.7 Distribution index and percentage of vegetation change trend types in area of different elevation zones in the Sichuan area of Giant Panda National Park

K 为分布指数

林面积占比减少,灌丛面积占比增加。由表 2 可知,植被 EVI 与坡度呈显著负相关($P<0.01$),各植被类型 EVI 与坡度均表现出负相关关系,其中坡度与草甸($P<0.05$)和针叶林($P<0.01$)的相关系数较高,与阔叶林($P>0.05$)和灌丛($P>0.05$)的相关系数较低,表明坡度增加会抑制植被生长。

由图 9 可知,随着坡度增加,除植被严重退化型外,其余植被变化趋势类型的分布指数 *K* 都较为稳定。植被明显改善型在坡度小于 25°区域均达优势分布,在 15°—25°为主导优势分布($K=1.03$);植被轻微改善型在坡度大于 15°区域均达优势分布;植被稳定不变型在坡度大于 25°区域为优势分布,在 25°—35°为主导优势分布($K=1.08$);植被轻微退化型在坡度大于 35°区域为主导分布优势($K=1.19$),仅在 15°—25°未达优势分布;植被严重退化型在坡度小于 15°区域为主导分布优势($2.03<K<5.96$)。随着坡度增加,植被变化趋势类型组成无明显差异(图 9)。植被变化以明显改善型和轻微改善型为主,二者合计面积占比在各坡度带均大于 65%;植被稳定不变型面积占比随坡度增加从 10.9%增加至 15.31%;植被轻微退化型面积占比在 10.61%—13.8%之间波动变化;植被严重退化型面积占比随坡度增加从 6.7%降至 0.59%。

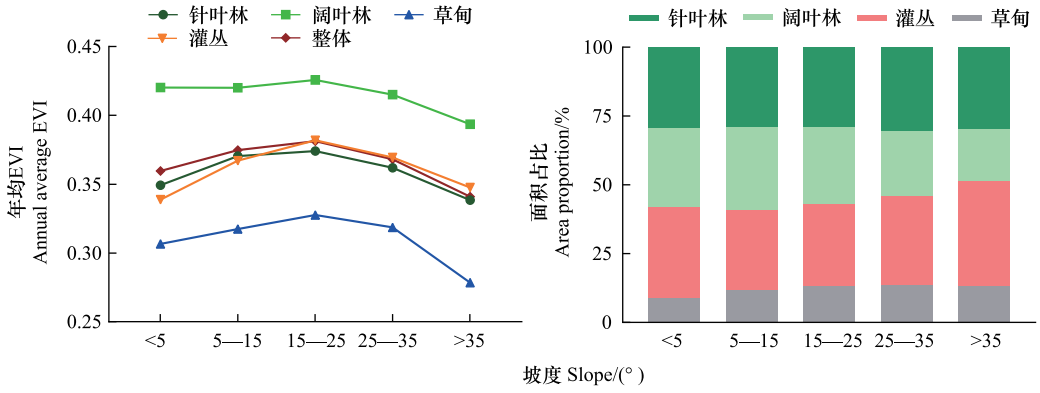

图 8　大熊猫国家公园四川片区多年平均 EVI 的坡度分异和不同坡度上的各植被类型占比

Fig.8　Slope differences in the multi-year average EVI and percentage of vegetation types in area of different slope zones in the Sichuan area of Giant Panda National Park

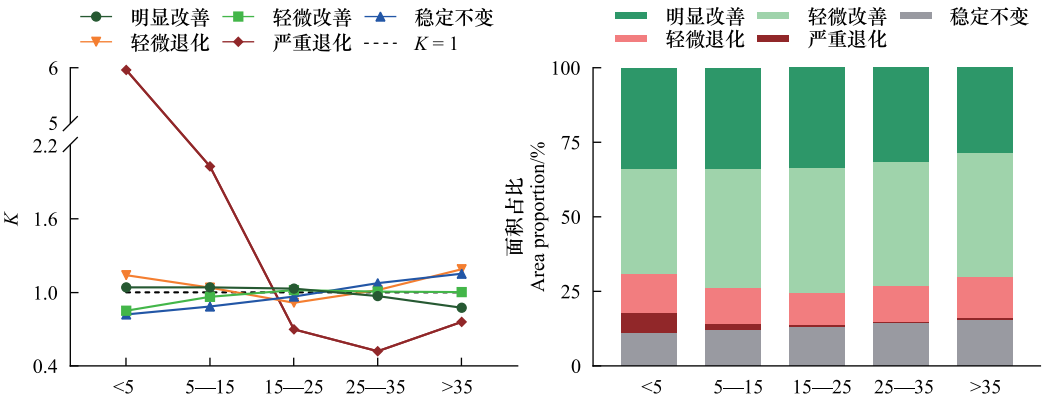

图 9　大熊猫国家公园四川片区各植被变化趋势类型在不同坡度上的分布指数和占比

Fig.9　Distribution index and percentage of vegetation change trend types in area of different slope zones in the Sichuan area of Giant Panda National Park

3.2.3　植被 EVI 对坡向的响应特征

大熊猫国家公园四川片区不同坡向上植被 EVI 差异较小(图 10)。阳坡(东坡、东南坡、南坡)上的各植被类型 EVI 比阴坡(北坡、西坡、西北坡)上的高;不同坡向上各植被类型组成基本稳定,以灌丛和针叶林面积为主。由表 2 可知,植被 EVI 与坡向的相关性不显著($P>0.05$),仅草甸与坡向呈显著正相关($P<0.05$),阔叶林、灌丛和针叶林与坡向均表现出微弱的负相关关系($P>0.05$),表明坡向对植被生长的影响较小。

由图 11 可知,除植被轻微退化型和植被严重退化型外,其余植被变化趋势类型在不同坡向上的分布指数 K 都较为稳定。植被明显改善型在北坡、东北坡和西北坡为主导优势分布($1.02<K<1.07$),在西坡为优势分布;植被轻微改善型在西坡为主导优势分布($K=1.02$),在北坡、东北坡、西南坡和西北坡为优势分布;植被稳定不变型在东坡、南坡、西南坡和西坡为优势分布;植被轻微退化型在东坡和南坡为主导优势分布($1.08<K<1.11$),在东南坡为优势分布;植被严重退化型在东南坡为主导优势分布($K=1.30$),在东坡、南坡和西南坡为优势分布。而植被变化趋势类型组成在各坡向上无明显差异(图 11)。植被明显改善型和轻微改善型在各坡向上面积占比均大于 30%;植被稳定不变型和轻微退化型面积占比分别在 12.52%—13.82%、9.51%—13.74%之间微弱变化;植被严重退化型面积占比均小于 1.5%。

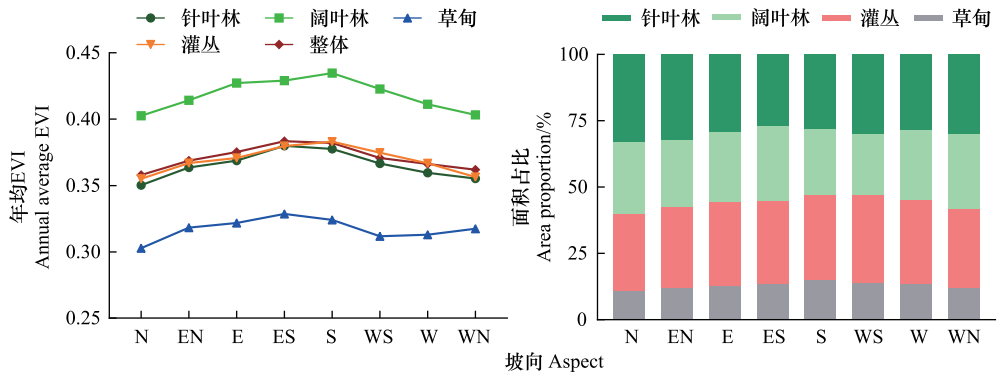

图 10 大熊猫国家公园四川片区多年平均 EVI 的坡向分异和不同坡向上的各植被类型占比

Fig.10 Aspect differences in the multi-year average EVI and percentage of vegetation types in area of different aspect zones in the Sichuan area of Giant Panda National Park

N:北坡;EN:东北坡;E:东坡;ES:东南坡;S:南坡;WS:西南坡;W:西坡;WN:西北坡

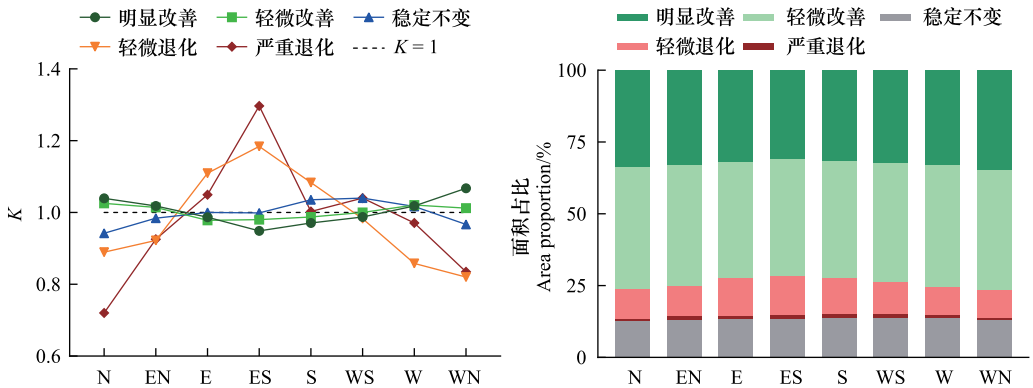

图 11 大熊猫国家公园四川片区各植被变化趋势类型在不同坡向上的分布指数和占比

Fig.11 Distribution index and percentage of vegetation change trend types in area of different aspect zones in the Sichuan area of Giant Panda National Park

4 讨论与结论

4.1 讨论

本文基于 EVI 分析大熊猫国家公园四川片区植被时空变化情况,发现 2000—2020 年大熊猫国家公园四川片区植被 EVI 整体呈波动增加趋势,与四川省植被变化趋势基本一致[8,41]。近年来四川省实施了天然林保护、长江防护林体系建设、退耕还林和大熊猫及其栖息地保护等生态工程,生态保护可能是植被改善的主要原因[32,42]。另一方面,大熊猫国家公园成立之前,研究区内陆续建立了卧龙、王朗等多个自然保护区,保护区的建立对提升生态服务功能、加强生物多样性保护发挥了积极作用[34];保护区外部存在部分放牧、采矿、旅游等人类活动,对植被生长造成一定威胁[29];2017 年成立大熊猫国家公园体制试点区后,研究区实施了自然教育、生态移民、工矿企业退出、传统产业转型等多项针对性保护策略[38],有效减少了人类活动对生态环境的干扰与破坏[43],植被 EVI 高于多年平均水平,国家公园的成立对植被改善起到了积极作用[44]。受地质活动影响,部分地区植被退化明显。白水河自然保护区和九顶山地处龙门山脉中部,地壳运动活跃,且存在矿山遗留问题,边坡不稳定,常伴随着滑坡、泥石流、崩塌等次生灾害[39],2008 年汶川地震、2012 年彭州泥石流导致该区域生态环境受到极严重的破坏[37,45],物种丰富度显著降低,树根遭到破坏,植被严重退化[34,37],这与张晓莹

等[35]、Wang 等[46]的研究结果基本一致。此外,极端气候的发生也会影响植被生长,2012 年园区气温低、降水大,发生的洪涝灾害使得当年植被 EVI 较低[47]。

大熊猫国家公园四川片区植被 EVI 变化趋势类型在不同地形因子条件下差异显著,表现出明显的垂直地带性。结果表明,在 2500m 以下、坡度为 15°—25°的阴坡(北坡、东北坡和西北坡)山区,植被明显改善型为主导优势分布,侧面说明这些区域是生态工程建设的重点区域,且实施成效显著,植被长势较好;在 3000—3500m 之间、坡度小于 15°的东南坡山区,植被严重退化型为主导优势分布,这些区域的生态保护需要引起重视;而在海拔 4000m 以上、坡度大于 25°、坡向由阴坡转向阳坡(北坡→东坡、西坡→南坡)的过渡区域,植被变化趋势类型开始出现优势和非优势的转折,这些区域植被比较脆弱,是生态保护建设需要着重注意和加强的区域,这与魏建瑛等[27]、向珈瑶等[39]的研究结果基本一致。以往研究表明,大熊猫国家公园四川片区在海拔 2500m 以下区域具有良好的水热条件,植被长势较好[34],植被改善型分布明显;海拔 3000m 以上区域气温低、降水少,植被生长受到限制[48],植被改善型分布减弱,植被退化型分布明显;坡度小于 15°区域是人类活动的主要区域[31],农业耕作集中在此区域,植被退化型分布明显;15°—25°区域是退耕还林、封山造林等生态工程实施的重点区域[28],植被改善型分布明显;而随着坡度逐渐增大,地势陡峭,易发生滑坡、泥石流等次生灾害[20],植被改善型分布减弱。北坡、东北坡、西北坡这些阴坡坡向太阳辐射较小,蒸发量少,土壤湿润,植被长势更旺盛[37],植被改善型分布明显;东坡、东南坡、南坡这些阳坡坡向光照强,水分蒸发快,土壤干燥,不利于植被生长[31],植被退化型分布明显。

综上,大熊猫国家公园四川片区的生态保护建设需充分考虑地形因子的影响,尤其需要关注海拔高、坡度小等区域的生态保护与修复。植被 EVI 时空变化的影响因素众多,其关系错综复杂,本文仅分析了地形因子与植被 EVI 的关系,未来研究还需考虑植被 EVI 与气候因子、土地利用、人类活动等因素的关系。

4.2　结论

(1)大熊猫国家公园四川片区生长季多年 EVI 均值整体呈波动性增加趋势,线性增加率为 0.0019/a($P<0.01$),均值为 0.37;各植被类型 EVI 均值和增速从大到小依次为阔叶林>灌丛>针叶林>草甸。空间上呈东高西低、北高南低的分布特点,EVI 高值区主要分布在岷山山系东北部及秦岭山系,植被类型以阔叶林为主;EVI 低值区主要分布在岷山山系东部及邛崃山山系东部,植被类型以草甸为主。

(2)大熊猫国家公园四川片区植被 EVI 整体呈改善趋势,植被改善区面积远大于植被退化区。植被改善区面积占比达到 73.99%,植被稳定不变区面积占比为 13.29%,而植被退化区面积占比仅12.72%;植被明显改善区主要位于岷山山系东北部和大相岭山系,植被严重退化区主要分布在白水河自然保护区和九顶山。各植被类型 EVI 变化以改善为主,其中,阔叶林改善区面积占比最大(83.35%),草甸退化区面积占比最大(17.83%)。

(3)不同地形因子对大熊猫国家公园四川片区植被 EVI 影响不同。植被 EVI 与海拔、坡度呈显著负相关($P<0.01$),与坡向的相关性不显著($P>0.05$)。其中,草甸与海拔($P<0.01$)、坡度($P<0.05$)均表现出负相关关系,与坡向呈显著正相关($P<0.05$);针叶林与海拔、坡度均表现出明显的负相关关系($P<0.01$),与坡向无明显相关性($P>0.05$);灌丛、阔叶林仅与海拔表现出明显的负相关关系($P<0.01$),与坡度、坡向均表现出微弱的负相关关系($P>0.05$)。

(4)大熊猫国家公园四川片区植被 EVI 变化趋势在不同地形条件下差异显著。植被明显改善区主要分布在 2500m 以下、坡度为 15°—25°的阴坡(北坡、东北坡和西北坡)山区,植被严重退化区主要分布在 3000—3500m 之间、坡度小于 15°的东南坡山区;而在海拔 4000m 以上、坡度大于 25°、坡向由阴坡转向阳坡(北坡→东坡、西坡→南坡)的过渡区域,植被变化趋势类型开始出现优势和非优势的转折,这些区域植被比较脆弱,是生态保护建设需要着重注意和加强的区域。

参考文献(References):

[1] Cui L L, Shi J. Temporal and spatial response of vegetation NDVI to temperature and precipitation in Eastern China. Journal of Geographical

Sciences, 2010, 20(2): 163-176.

[2] Anderson R G, Canadell J G, Randerson J T, Jackson R B, Hungate B A, Baldocchi D D, Ban-Weiss G A, Bonan G B, Caldeira K, Cao L, Diffenbaugh N S, Gurney K R, Kueppers L M, Law B E, Luyssaert S, O'Halloran T L. Biophysical considerations in forestry for climate protection. Frontiers in Ecology and the Environment, 2011, 9(3): 174-182.

[3] Jiang L L, Jiapaer G, Bao A M, Guo H, Ndayisaba F. Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia. Science of the Total Environment, 2017, 599-600, 967-980.

[4] 方精云, 朴世龙, 贺金生, 马文红. 近20年来中国植被活动在增强. 中国科学: C辑: 生命科学, 2003, 33(6): 554-565, 578-579.

[5] Piao S L, Wang X H, Ciais P, Zhu B, Wang T, Liu J. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006. Global Change Biology, 2011, 17(10): 3228-3239.

[6] Heimann M, Reichstein M. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. Nature, 2008, 451(7176): 289-292.

[7] Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, Guo Q H, Henderson M, Ji W, Li Y, Tao S. Interannual variations of monthly and seasonal normalized difference vegetation index (NDVI) in China from 1982 to 1999. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2003, 108(D14): 4401.

[8] 伍宜丹, 马悦, 吴浩然, 肖逸, 李豪. 基于MODIS-EVI指数的四川省植被指数时空演变特征及驱动力. 水土保持研究, 2020, 27(5): 230-236, 243-243.

[9] 王正兴, 刘闯, Huete A. 植被指数研究进展: 从AVHRR-NDVI到MODIS-EVI. 生态学报, 2003, 23(5): 979-987.

[10] 王正兴, 刘闯, 陈文波, 林昕. MODIS增强型植被指数EVI与NDVI初步比较. 武汉大学学报: 信息科学版, 2006, 31(5): 407-410, 427-427.

[11] 李文梅, 覃志豪, 李文娟, 杨强. MODIS NDVI与MODIS EVI的比较分析. 遥感信息, 2010, 25(6): 73-78.

[12] 李红军, 郑力, 雷玉平, 李春强, 周戡. 基于EOS/MODIS数据的NDVI与EVI比较研究. 地理科学进展, 2007, 26(1): 26-32.

[13] Wang J, Fang W, Xu P P, Li H, Chen D H, Wang Z, You Y H, Rafaniello C. Satellite evidence for divergent forest responses within close vicinity to climate fluctuations in a complex terrain. Remote Sensing, 2023, 15(11): 2749.

[14] 方精云, 沈泽昊, 崔海亭. 试论山地的生态特征及山地生态学的研究内容. 生物多样性, 2004, 12(1): 10-19.

[15] 沈泽昊, 张新时, 金义兴. 地形对亚热带山地景观尺度植被格局影响的梯度分析. 植物生态学报, 2000, 24(4): 430-435.

[16] Li Y, Gong J, Zhang Y X. Investigating the relationship between topographic factors and vegetation spatial patterns in the alpine plateau: a case study in the southwestern Tibetan Plateau. Remote Sensing, 2023, 15(22): 5356.

[17] Wang R J, Yan F, Wang Y J. Vegetation growth status and topographic effects in the Pisha sandstone area of China. Remote Sensing, 2020, 12(17): 2759.

[18] Wang C Y, Wang J N, Naudiyal N, Wu N, Cui X, Wei Y Q, Chen Q T. Multiple effects of topographic factors on spatio-temporal variations of vegetation patterns in the three parallel rivers region, southeast Qinghai-Tibet Plateau. Remote Sensing, 2021, 14(1): 151.

[19] Huang H X, Xi G L, Ji F K, Liu Y Y, Wang H R, Xie Y W. Spatial and temporal variation in vegetation cover and its response to topography in the selinco region of the Qinghai-Tibet Plateau. Remote Sensing, 2023, 15(16): 4101.

[20] Xiong Y L, Wang H L. Spatial relationships between NDVI and topographic factors at multiple scales in a watershed of the Minjiang River, China. Ecological Informatics, 2022, 69: 101617.

[21] Wang L, Qiu Y N, Han Z Y, Xu C, Wu S Y, Wang Y, Holmgren M, Xu Z W. Climate, topography and anthropogenic effects on desert greening: a 40-year satellite monitoring in the Tengger Desert, Northern China. Catena, 2022, 209: 105851.

[22] Wang Q, Yao Y, Zhao L, Yang C H, Zhao Y C, Zhang Q P. Enhancing resilience against geological hazards and soil erosion through sustainable vegetation management: a case study in Shaanxi Province. Journal of Cleaner Production, 2023, 423: 138687.

[23] 陈亮, 王学雷, 杨超, 刘昔, 吕晓蓉, 范韦莹. 2000—2018年鄂西山区植被EVI时空变化特征及其地形效应. 长江流域资源与环境, 2021, 30(2): 419-426.

[24] Wang R J, Wang Y J, Yan F. Vegetation growth status and topographic effects in frozen soil regions on the Qinghai-Tibet Plateau. Remote Sensing, 2022, 14(19): 4830.

[25] Li Q, Shi X Y, Wu Q Q. Exploring suitable topographical factor conditions for vegetation growth in Wanhuigou catchment on the Loess Plateau, China: a new perspective for ecological protection and restoration. Ecological Engineering, 2020, 158: 106053.

[26] 赵婷, 白红英, 邓晨晖, 孟清, 郭少壮, 齐贵增. 2000—2016年秦岭山地植被覆盖变化地形分异效应. 生态学报, 2019, 39(12): 4499-4509.

[27] 魏建瑛, 徐建英, 樊斐斐. 卧龙自然保护区植被覆盖度变化及其对地形因子的响应. 长江流域资源与环境, 2019, 28(2): 440-449.

[28] 朱林富, 谢世友, 杨华, 马明国. 基于MODIS EVI的重庆植被覆盖变化的地形效应. 自然资源学报, 2017, 32(12): 2023-2033.

[29] Luo C, Yang H, Luo P, Liu S L, Wang J, Wang X, Li H L, Mou C X, Mo L, Jia H H, Wu S J, Cheng Y, Huang Y, Xie W W. Spatial-temporal change for ecological intactness of giant panda national park and its adjacent areas in Sichuan province, China. Diversity, 2022,

14(6): 485.

[30] 熊巧利, 何云玲, 李同艳, 余岚. 西南地区生长季植被覆盖时空变化特征及其对气候与地形因子的响应. 水土保持研究, 2019, 26(6): 259-266.

[31] 白玛曲西, 普布多吉, 卓永, 次珍, 边琼, 黄鹏, 西绕卓玛, 玉洛. 基于 MODIS 的横断山区植被时空演变特征及地形效应分析. 生态与农村环境学报, 2023, 39(9): 1158-1169.

[32] 秦青, 刘晶茹, 于强, 马奔, 谭宏利, 解林红, 温亚利. 四川省大熊猫保护地生态安全及其时空演变. 生态学报, 2020, 40(20): 7255-7266.

[33] Zhang J J, Pimm S L., Xu W H, Shi X W, Xiao Y, Kong L Q, Fan X Y, Ouyang Z Y. Relationship between giant panda populations and selected ecosystem services. Ecosystem Services, 2020, 44: 101130.

[34] Pu M X, Zhao Y B, Ni Z Y, Huang Z L, Peng W L, Zhou Y, Liu J J, Gong Y R. Spatial-temporal evolution and driving forces of NDVI in China's giant panda national park. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(11): 6722.

[35] 张晓莹, 何毅, 赵蕾. 2000—2020 年我国五大国家公园植被覆盖时空变化特征. 自然保护地, 2023, 3(3): 11-27.

[36] 董鑫, 陈效锐, 李艳忠, 古晓东, 杨存建. 基于地理探测器的四川省大熊猫国家公园生态环境时空变化及其归因分析. 生态学杂志, 2023, 42(4): 946-955.

[37] 彭文甫, 王广杰, 周介铭, 徐新良, 罗怀良, 赵景峰, 杨存建. 基于多时相 Landsat5/8 影像的岷江汶川-都江堰段植被覆盖动态监测. 生态学报, 2016, 36(7): 1975-1988.

[38] 李天满, 张旭晨, 郑重, 向可文. 稳步推进大熊猫国家公园高质量发展. 国家公园(中英文), 2023, 1(2): 126-134.

[39] 向珈瑶, 彭文甫, 陶帅. 2000—2020 年岷江上游植被 NDVI 时空变化及其地形响应. 长江流域资源与环境, 2022, 31(7): 1534-1547.

[40] Liu Z Z, Wang H, Li N, Zhu J, Pan Z W, Qin F. Spatial and temporal characteristics and driving forces of vegetation changes in the Huaihe River basin from 2003 to 2018. Sustainability, 2020, 12(6): 2198.

[41] 李美丽, 尹礼昌, 张园, 苏旭坤, 刘国华, 王晓峰, 奥勇, 伍星. 基于 MODIS-EVI 的西南地区植被覆盖时空变化及驱动因素研究. 生态学报, 2021, 41(3): 1138-1147.

[42] 黄麟, 曹巍, 祝萍. 退耕还林还草工程生态效应的地域分异特征. 生态学报, 2020, 40(12): 4041-4052.

[43] 李新婷, 魏钰, 张丛林, 黄宝荣. 国家公园如何平衡生态保护与社区发展: 国际经验与中国探索. 国家公园(中英文), 2023, 1(1): 44-52.

[44] 臧振华, 张多, 王楠, 杜傲, 孔令桥, 徐卫华, 欧阳志云. 中国首批国家公园体制试点的经验与成效、问题与建议. 生态学报, 2020, 40(24): 8839-8850.

[45] 黄勋, 唐川, 乐茂华, 唐得胜, 蒋志林. 汶川震区银厂沟区域 8·18 暴雨泥石流灾害成灾机理与特征. 工程地质学报, 2013, 21(5): 761-769.

[46] Wang J, Zhao D, Liu X A, Shao Q F, Yang D L, Zeng F R, Feng Y, Zhang S Q, Peng P H, Liu J P. Spatio-temporal evolution of forest landscape in China's giant panda national park: a case study of Jiudingshan nature reserve. Forests, 2023, 14(8): 1606.

[47] 杜华明, 延军平. 四川省气候变化特征与旱涝区域响应. 资源科学, 2013, 35(12): 2491-2500.

[48] 荣欣, 易桂花, 张廷斌, 李景吉, 别小娟, 覃艺, 夏杰. 2000—2015 年川西高原植被 EVI 海拔梯度变化及其对气候变化的响应. 长江流域资源与环境, 2019, 28(12): 3014-3028.