

DOI: 10.5846/stxb202112103506

赵婷, 白红英, 李九全, 马琪, 王鹏涛. 气候变暖背景下秦岭陕西段植被潜在分布区格局变化. 生态学报, 2023, 43(5): 1843-1852.

Zhao T, Bai H Y, Li J Q, Ma Q, Wang P T. Changes of vegetation potential distribution pattern in the Qinling Mountains in Shaanxi Province in the context of climate warming. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(5): 1843-1852.

气候变暖背景下秦岭陕西段植被潜在分布区格局变化

赵 婷^{1,*}, 白红英², 李九全¹, 马 琪¹, 王鹏涛¹

1 西安外国语大学, 西安 710128

2 西北大学, 西安 710127

摘要: 植被分布在一定程度上受控于气候因子, 在气候变化背景下, 利用生物气候指标研究地带性植被的潜在分布区格局变化对于区域生态系统应对气候变化具有有益的参考价值。从生态气候学角度出发, 利用植被热量指标——有效温暖指数(EWI), 研究 1959—2020 年以及未来气候模式下秦岭山地陕西段植被潜在分布格局的变化。结果表明: (1) 气候变暖导致植被热量指标发生变化, 近 62 年来, 秦岭山地陕西段 EWI 总体呈上升趋势, 并于 2001 年发生上升突变。(2) 基于 EWI 对秦岭陕西段植被类型的潜在分布区划分发现, 2001 年以前秦岭北坡无暖温带落叶阔叶林常绿混交林的分布区, 2001 年后秦岭北坡渭河东部出现了该植被类型的潜在分布区。(3) 随着气候变暖, 秦岭陕西段暖温带植被潜在分布区不断扩张, 而温带、寒温带以及高寒植被分布区持续缩减, 同时各植被类型分布区的平均海拔高度均呈上移趋势。从面积及海拔变化幅度来看, 秦岭南坡较北坡植被对气候变化更为敏感, 高海拔区较低海拔区植被对气候变化更为敏感。(4) 在代表性浓度路径 4.5 及 8.5(RCP4.5 及 RCP8.5) 情景下, 未来 50 年, 秦岭南北坡均将出现亚热带常绿阔叶林潜在分布区, 亚热带常绿阔叶林以及暖温带落叶阔叶林常绿混交林将可能代替暖温带落叶阔叶林发展为秦岭山地分布区面积最大的植被类型。

关键词: 植被格局; 潜在分布区; 有效温暖指数; 秦岭

Changes of vegetation potential distribution pattern in the Qinling Mountains in Shaanxi Province in the context of climate warming

ZHAO Ting^{1,*}, BAI Hongying², LI Jiuquan¹, MA Qi¹, WANG Pengtao¹

1 Xi'an International Studies University, Xi'an 710128, China

2 Northwest University, Xi'an 710127, China

Abstract: Vegetation patterns are controlled by climate factors to some extent. In the context of climate change, the study of the change of vegetation potential distribution pattern by using bioclimatic index is of useful reference value for regional ecosystem response to climate change. From the perspective of eco-climatology, this paper studied the changes of vegetation potential distribution pattern in the Qinling Mountains in Shaanxi Province from 1959 to 2020 and future climate model by using vegetation heat index which named effective warming index (EWI). The results showed that: (1) Climate warming led to the change of vegetation heat index, and the EWI of Qinling Mountain showed an increasing trend in the past 62 years, and increased abruptly in 2001. (2) Based on the EWI classification of the potential distribution of vegetation types in the Qinling Mountains, there was no warm-temperate evergreen broadleaved mixed forest on the northern slope of the Qinling Mountains before 2001, and the potential distribution of this type of vegetation appeared in the eastern Weihe River after the 21 century. (3) With the warming of the climate, the potential distribution areas of warm temperate vegetation

基金项目: 陕西省哲学社会科学重大理论与现实问题研究项目(2022ND0284); 陕西省科技厅自然科学基金基础研究计划青年项目(2021JQ-768)

收稿日期: 2021-12-10; 网络出版日期: 2022-10-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaotingxpc@163.com

continued to expand in the Qinling Mountains, while the suitable areas of temperate, cold temperate and alpine vegetation continued to shrink, and the elevation of the potential distribution areas of each vegetation type showed an upward trend. In terms of area and altitude variation, the vegetation on the southern slope was more sensitive to climate change than that on the northern slope, and the vegetation on the high altitude was more sensitive to climate change than that on the low altitude. (4) Under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, the subtropical evergreen broadleaved forest and warm temperate mixed evergreen broadleaved forest may replace warm temperate deciduous broadleaved forest and develop into the largest vegetation type in the mountainous area of the Qinling Mountains in the next 50 years.

Key Words: vegetation pattern; potential distribution area; effective warmth index; Qinling Mountains

霍普金斯生物气候定律认为,植物的阶段发育受当地气候的影响^[1],气候因子的任何变化都会对生态系统以及植被分布产生影响^[2]。全球气候变暖已经成为不争的事实^[3],在此背景下,植被作为生态系统中最重要要素之一,必然会对气候变化产生响应。因此,开展区域植被变化研究、开发区域植被动态模型、剖析气候植被关系,对于认识气候变化与陆地生态系统的相互作用具有重要意义。

气候-植被分类模型对于识别气候变化下生态系统可能发生的变化是一种较为有效的方法^[4-6]。虽然目前基于过程的动态模型被认为是气候变化研究中比较前卫的方法^[7],但基于生物气候指标的传统静态模型,仍是最基本的植被分类方法,亦是在自然资源管理中最可行的植被预测方法^[8,9]。目前学术界所采用的生物气候指标多为热量指标,如温暖指数、寒冷指数、年生物温度等,其中温暖指数更受学者们的青睐,在其基础上又陆续提出了生物温暖指数、有效温暖指数等^[10-16]。有效温暖指数(EWI)结合了温暖指数与气温年较差,既反映了植被生长有效能量的总和,又反映了最低及最高气温对植被分布的限制,被认为是适合四季分明的大陆性气候的较适宜生物气候指标,Chiu 等利用该指数对台湾植被进行分类,并分析其分类精度,得到了较好的结果^[16]。

秦岭山地是全球生物多样性关键地区之一,是中国气候南北分界线,亦是中国重要的生态安全屏障,其南北坡具有典型的气候差异以及植被分布差异^[17]。同时,秦岭是我国气候变化的过渡区及敏感区,研究表明秦岭山地气温在不同时空尺度发生了不同程度的变化^[18-20]。在此背景下,秦岭山地的主要的生物气候指标会发生怎样的变化?它们对植被分布格局是否产生影响?影响程度如何?未来气候模式下,秦岭山地植被潜在分布格局又将可能产生怎样的变化?这些问题的研究可为深入认识秦岭作为特殊地理单元的作用和意义提供借鉴,为区域自然资源合理利用及区域可持续发展战略的制定提供理论参考。

目前利用生物指标研究气候变化对植被的影响多集中于东北地区^[21-23],南北过渡带秦岭在此方面的研究成果较少。张月悦等分析了 1975—2017 年秦巴山区温暖指数、寒冷指数的演变特征,发现其呈增大趋势,且变化率均与海拔呈正相关^[24],但未将生物气候指标与植被变化相关联起来。因此,本文从生态气候学的角度,通过 EWI 的时空变动分析,探讨 1959—2020 年秦岭陕西段植被地理分布格局的变化,并对未来气候模式下秦岭山地植被潜在分布格局的可能趋势进行预估,揭示气候变化背景下过渡带的稳定性与变异性。

1 研究区概况与数据方法

1.1 研究区概况

秦岭为东西走向的大山岭,本文的研究区为狭义的秦岭山地,即位于陕西省境内的秦岭腹地区域,其位于 105°30′—110°05′E, 32°40′—34°35′N 之间,西起嘉陵江,东与伏牛山相接,北以渭河为界,南以汉江为边,包括陕西的六市 32 县区。海拔高度范围为 195—3771.2 m。研究区地理位置及海拔高度分布见图 1。

受地形的影响,秦岭山地形成了复杂的气候环境与丰富多样的气候资源。秦岭四季分明,雨热同期。气候要素随着海拔高度的增加而明显不同,海拔 1800 m 以下的地带,年均温 10—16℃,最冷月平均气温 1—5℃,最热月平均气温 20—28℃,年降水量 600—900 mm;海拔 1800—2800 m 的地带,年均温 2—10℃,最冷月

势。UF 为顺序时间序列的秩序列,UB 为逆序时间序列的秩序列,UF 为负值时为下降趋势,UF 为正值时为上升趋势。当 UF 等于 UB 时,即 UF 与 UB 曲线出现交点且交点在 1.96 置信水平区间之内,则交叉点对应的时刻便是突变开始的时间。

表 1 基于有效温暖指数的气候植被分类方案

Table 1 Climatic vegetation classification scheme based on EWI

植被类型 Vegetation forms	有效温暖指数范围/°C The scope of the EWI
高寒灌丛 Alpine scrub	0—12
寒温带针叶林 Cold-temperate coniferous forest	12—32
温带针阔混交林 Temperate mixed coniferous-broadleaved forest	32—68
暖温带落叶阔叶林 Warm-temperate deciduous broadleaved forest	68—108
暖温带落叶常绿混交林 Warm-temperate mixed deciduous-evergreen forest	108—146
亚热带常绿阔叶林 Subtropical evergreen broadleaved forest	146—214
热带雨林 Tropical rain forest	214

2 结果与分析

2.1 秦岭山地 EWI 变时空变化规律

2.1.1 近 62 年秦岭山地 EWI 空间分布及变化

图 2 为 1959—2020 年秦岭山地 EWI 平均值及变化趋势空间分布图。由图 2 知,近 62 年来,秦岭山地陕西段平均 EWI 为 74.7°C,最高达 121.6°C,高值区位于秦岭南麓的紫阳、汉阴、安康等地。EWI 最低值仅 7.1°C,低值区主要位于太白、佛坪、柞水、华山等沿山脊线的高海拔区。可见,秦岭山地 EWI 范围具有很大的跨度,巨大的热量差异形成了秦岭山地植被分布的多样性、复杂性以及典型的垂直地带性。

从变化趋势的空间分布来看,近 62 年来,秦岭山地陕西段 EWI 整体呈上升趋势,平均倾向率为 4.7°C/10 a,且全区域的上升趋势通过了 $P < 0.05$ 的显著性检验。秦岭南坡 EWI 上升趋势略强于北坡,南北坡分别为 0.48°C/10 a 与 0.46°C/10 a。EWI 上升趋势较强的区域位于秦岭南坡西部的略阳、勉县、汉中等地,而秦岭东部的商洛市及渭南市各地 EWI 上升趋势较弱。可见,秦岭山地 EWI 变化趋势在空间上既存在整体的一致性,又存在区域上的差异性。

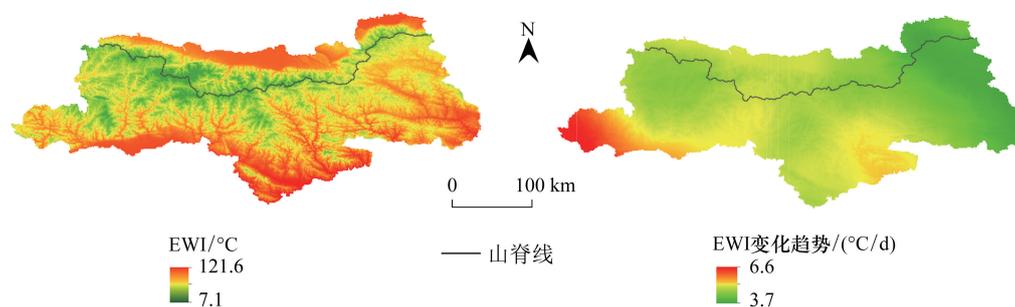


图 2 1959—2020 年秦岭山地有效温暖指数(EWI)空间分布及变化趋势

Fig.2 Spatial distribution and change trend of EWI in Qinling Mountains from 1959 to 2020

2.1.2 近 62 年秦岭山地 EWI 时间变化及突变分析

图 3 为 1959—2020 年秦岭山地陕西段 EWI 的时间变化趋势及 M-K 突变检验。由图 3 知,近 62 年来,秦岭山地 EWI 呈上升趋势,其中最低值出现在 1967 年,EWI 值为 65.2°C,最高值出现在 2018 年,为 97.9°C。就 M-K 突变监测结果来看,UF 曲线与 UB 曲线于 2001 年相交,且在 1.96 置信水平区间之内,即秦岭山地 EWI

于 2001 年发生显著的上升型突变,2004 年达到显著。突变前 1959—2001 年 EWI 平均值为 71.9℃,而突变后 2002—2020 年 EWI 平均值为 80.9℃。已有研究表明,秦岭山地气温于 1994 年前后发生增温性突变^[20],秦岭日均温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 日数于 1999 年发生突变^[30],而日均温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 日数通常被用于植被物候期的判定。由此可见,在气候变化背景下,无论是生态气候学角度还是植被物候的角度,秦岭山地植被均在 20 世纪末及 21 世纪初对气候变化产生了较为明显的响应。

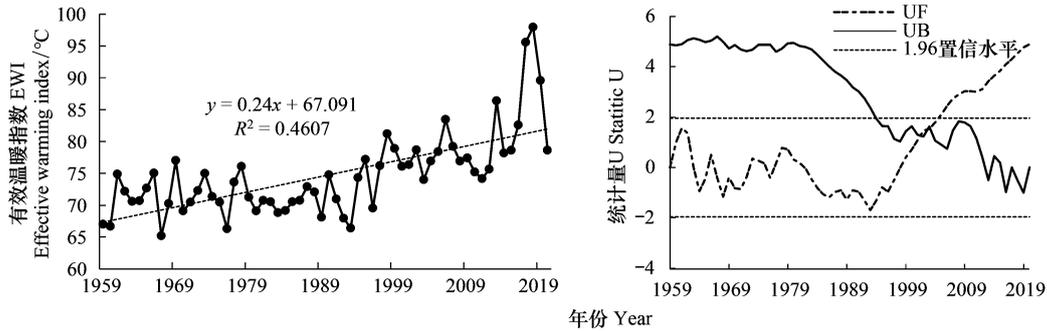


图 3 1959—2020 年秦岭山地 EWI 时间变化趋势及 M-K 突变检验

Fig.3 Temporal variation trend of EWI and M-K mutation test in Qinling Mountains from 1959 to 2020

2.2 1959—2020 年秦岭陕西段植被潜在分布格局变化

2.2.1 近 62 年来秦岭山地植被潜在分布区划分

以 EWI 突变时间 2001 年为节点,按照表 1 中的植被类型分类方案,对 1959—2001 及 2002—2020 年秦岭山地陕西段植被潜在分布区进行划分,得到两个时段内秦岭山地陕西段植被潜在分布区格局(图 4)。由图 4 知,1959—2001 年,秦岭山地南坡可分为五个植被类型潜在分布区,分别为暖温带常绿阔混交林、暖温带落叶阔叶林、温带针阔混交林、寒温带亚高山针叶林、高寒灌丛草甸。秦岭北坡划分为四个植被类型潜在分布区,与南坡相比,无暖温带常绿阔混交林。2001 年后,秦岭北坡的渭河东部平原地区逐渐出现了暖温带常绿阔混交林的潜在分布区,秦岭南北坡均包含五种植被类型的潜在分布区。

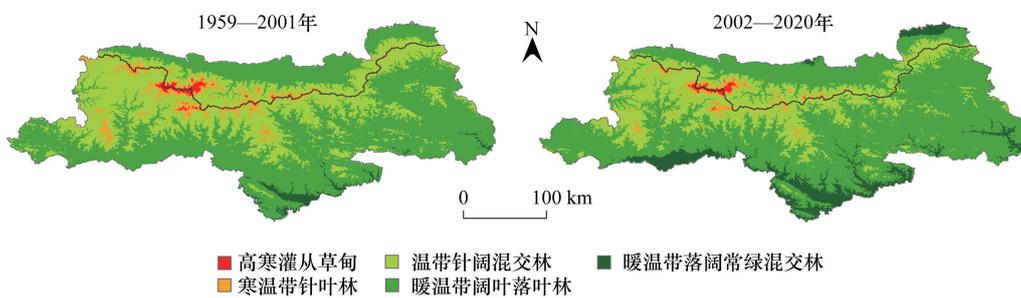


图 4 1959—2020 年秦岭山地植被潜在分布划分

Fig.4 Potential distribution of vegetation in Qinling Mountains from 1959 to 2020

2.2.2 秦岭山地陕西段植被潜在分布区面积变化

图 5 为 EWI 突变前后秦岭山地陕西段不同植被类型潜在分布区空间变化。由图 5 可知,EWI 突变前后各植被类型分布区域发生了不同程度的变化,总体表现为以维持原有潜在分布区为主,但又有不同程度的减小及增大区。其中,暖温带常绿阔混交林在低海拔潜在分布区明显增大,其余各植被类型在低海拔处的潜在分布区减小,整体向高海拔区迁移。

根据每种植被类型所含的像元数以及每个像元所代表的实际地表面积,计算得出 EWI 突变前后秦岭山

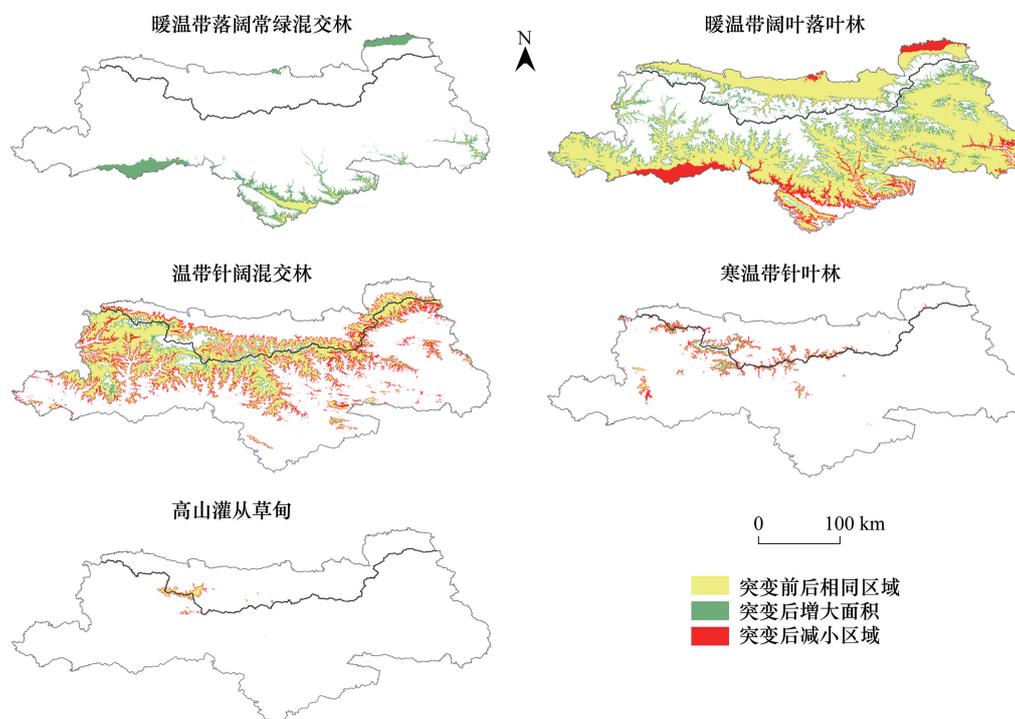


图5 1959—2020年秦岭山地不同植被类型潜在分布区空间变化

Fig.5 Spatial distribution changes of suitable areas of different vegetation types in Qinling Mountains from 1959 to 2010

地南北坡植被分布面积变化(表2)。根据表2,突变点以后,暖温带落叶常绿混交林及暖温带落叶阔叶林潜在分布区面积增大。暖温带常绿阔叶林为潜在分布区面积增大比率最大的植被类型,在秦岭南坡,突变后较突变前面积增长了283.58%,增加区域主要分布于汉江上游;在秦岭北坡,突变前无该植被的潜在分布区,而突变后在渭河东部出现了面积为547.6 km²的潜在分布区。暖温带落叶阔叶林为秦岭山地分布面积最大的植被类型,该类型植被的潜在分布区在突变点前后呈较弱的增长,在南坡与北坡的面积增长比率分别为7.92%与7.39%。

表2 1959—2020年秦岭山地南北坡不同植被类型潜在分布区面积变化/km²

Table 2 Variation of suitable area of different vegetation types on the northern and southern slopes of Qinling Mountains from 1959 to 2010

		暖温带落叶常绿混交林 Warm-temperate mixed deciduous- evergreen forest	暖温带落叶阔叶林 Warm-temperate deciduous broadleaved forest	温带针阔混交林 Temperate mixed coniferous- broadleaved forest	寒温带针叶林 Cold-temperate coniferous forest	高寒灌丛草甸 Alpine scrub
南坡 South slope	变化前面积	1080.1	28311.3	16316.6	1499.3	249.9
	变化后面积	4142.9	30552.2	11864.7	763.6	133.8
	变化面积	3062.8	2240.9	-4451.9	-735.8	-116.1
北坡 North slope	变化前面积	0.0	6559.5	4668.5	953.8	293.0
	变化后面积	547.6	7044.6	4135.9	563.6	183.2
	变化面积	547.6	485.1	-532.6	-390.3	-109.8

秦岭山地潜在分布区面积减小的植被类型有温带针阔混交林、寒温带针叶林以及高寒灌丛草甸。其中,寒温带针叶林是气温突变前后潜在分布区面积减小比例最大的植被类型,秦岭南坡与北坡的缩减比率分别为49.07%与40.91%。高寒灌丛草甸为秦岭山地面积最小的植被类型,其潜在分布区亦呈明显的减小趋势,南坡

与北坡的缩减比率分别为 46.45% 与 37.48%。温带针阔混交林为除暖温带落叶阔叶林外秦岭山地面积最大的植被类型,亦为潜在分布区面积减小最多的植被类型,南坡与北坡的缩减比率分别为 27.28% 与 11.41%。

2.2.3 秦岭山地陕西段植被潜在分布区垂直变化

受秦岭山地地形要素的影响,秦岭山地不同植被类型呈现出明显的垂直地带性,在气候变暖的影响下,各植被类型分布的海拔高度会发生不同程度的迁移。利用植被分布区与 DEM 数据做叠加分析,得到秦岭山地南北坡植被潜在分布区平均海拔高度变化情况(表 3)。由表 3 知,在秦岭南坡,EWI 突变点后,常绿阔混交林、落叶阔叶林、针阔混交林、亚高山针叶林、高寒草甸灌丛潜在分布区的平均海拔高度较突变点前向高海拔区分别上移了 118 m、116 m、143 m、157 m、159 m。在秦岭北坡,EWI 突变前无常绿阔混交林潜在分布区,EWI 突变后海拔 344 m 处为常绿阔混交林潜在分布区,落叶阔叶林、针阔混交林、亚高山针叶林、高山灌丛草甸潜在分布区较突变点前向高海拔区分别上移了 114 m、145 m、166 m、160 m。

综合以上,随着气候变暖,秦岭山地各植被类型潜在分布区的平均海拔上移幅度由大到小分别为高寒草甸灌丛、寒温带亚高山针叶林、温带针阔混交林、暖温带落叶阔叶林、暖温带落叶阔混交林。可见,在秦岭山地高海拔区植被较低海拔区植被对气候变化更加敏感。

表 3 秦岭山地南北坡不同类型植被潜在分布区平均海拔高度变化/m

Table 3 Change of average altitude of suitable areas of different vegetation types on the northern and southern slopes of the Qinling Mountains

		暖温带落叶 常绿混交林 Warm-temperate mixed deciduous- evergreen forest	暖温带落叶 阔叶林 Warm-temperate deciduous broadleaved forest	温带针阔混交林 Temperate mixed coniferous- broadleaved forest	寒温带针叶林 Cold-temperate coniferous forest	高寒灌丛草甸 Alpine scrub
南坡	变化前海拔高度	356	914	1577	2262	2806
South slope	变化后海拔高度	474	1030	1720	2419	2965
	上移幅度	118	116	143	157	159
北坡	变化前海拔高度	-	654	1580	2233	2868
North slope	变化后海拔高度	344	768	1725	2399	3028
	上移幅度	-	114	145	166	160

2.3 未来气候模式下秦岭山地植被潜在分布区格局预估

基于多元线性回归的统计降尺度及多气候模式集合的方法对秦岭山地未来气温可进行较好的模拟^[31],利用该方法分别预测了在 RCP4.5 情景(中端浓度排放路径)及 RCP8.5 情景(高端浓度排放路径)下未来 50 a (2070 年)秦岭山地气温,并计算 EWI,根据 EWI 对秦岭山地未来植被潜在分布区变化进行预估。

图 6 为两种情景下秦岭山地 2070 年植被潜在分布区的分布格局预估。由图 6 可知,由于气候变暖,未来秦岭山地的植被带潜在分布区不但发生了空间上的位移,而且其植被带谱格局也可能发生变化。到 2070 年,秦岭山地南北坡均有可能出现亚热带常绿阔叶林潜在分布区。考虑到秦岭北坡低海拔区人为干扰明显,此区域应多为人工种植植被,而高海拔区的植被则可能发生自然演替。

表 4 为 RCP4.5 及 RCP8.5 情景下 2070 年秦岭山地不同植被带潜在分布区的面积预估。由表 4 可知,随着气候变暖,热量指标上升,亚热带及暖温带植被潜在分布区面积不断扩大,而温带及寒温带植被类型的面积不断缩减,高寒植被潜在分布区将有可能变得很小甚至消失。到 2070 年,秦岭山地陕西段北坡的亚热带常绿阔叶林将可能快速发展,在 RCP4.5 及 RCP8.5 情景下,其潜在分布区面积将可能分别占北坡面积的 35% 及 38%,超过暖温带落叶常绿混交林及暖温带落叶阔叶林,成为北坡生长区面积最大的植被类型。而在秦岭南坡,亚热带常绿阔叶林的潜在分布区面积在两种情景下将可能达到南坡面积的 31% 及 41%,暖温带落叶常绿混交林在秦岭南坡为主导植被类型,两种情景下该植被类型潜在分布区面积将可能占南坡面积的 51% 及 45%。在 RCP4.5 及 RCP8.5 情景下,秦岭山地南北坡高寒植被类型的潜在分布区不断减小,尤其是在秦岭南

坡,高寒灌丛草甸潜在分布区的面积将可能缩减至 3 km²,面积占比不足 0.1%。

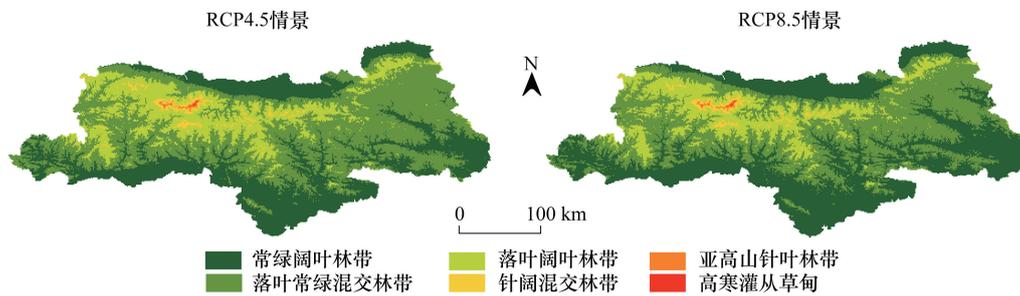


图 6 RCP4.5 及 RCP8.5 情景下 2070 年秦岭山地植被潜在分布区分布格局预估

Fig.6 Prediction of distribution pattern of suitable vegetation areas in Qinling Mountains in 2070 under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios
RCP4.5 及 RCP8.5: 代表性浓度路径 4.5 及 8.5

表 4 RCP4.5 及 RCP8.5 情景下 2070 年秦岭山地南北植被带潜在分布区面积预估/km²

Table 4 Estimation of suitable area of vegetation belt on the northern and southern slopes of Qinling Mountains in 2070 under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios

	北坡 North slope		南坡 South slope	
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
亚热带常绿阔叶林 Subtropical evergreen broadleaved forest	4369.7	4766.9	14888.1	19267.7
暖温带落叶常绿混交林 Warm-temperate mixed deciduous-evergreen forest	4164.5	4145.5	24152.8	21262.4
暖温带落叶阔叶林 Warm-temperate deciduous broadleaved forest	3349.9	3049.3	7784.5	6432.0
温带针阔混交林 Temperate mixed coniferous-broadleaved forest	512.1	442.0	597.1	467.7
寒温带亚高山针叶林 Cold-temperate coniferous forest	68.2	62.9	47.3	40.7
高寒灌丛草甸 Alpine scrub	18.1	16.0	3.8	3.1

RCP4.5 及 RCP8.5: 代表性浓度路径 4.5 及 8.5

3 结论与讨论

3.1 讨论

3.1.1 植被潜在分布区划分的可靠性与不确定性分析

本文的研究结果表明,21 世纪以来秦岭山地暖温带植被类型的潜在分布区呈扩张趋势,高寒植被类型的潜在分布区呈缩减趋势。这与同类研究结果具有一致性,Grabherr 曾预计全球增温将导致植被带以每十年 8—10m 的速度向高海拔移动^[32];李霞和张新时预计年均温增加 4℃ 时中国部分暖温带山地森林将转变为亚热带型山地森林,亚热带型山地森林面积增加近 3 倍,暖温带山地森林面积小幅增加,寒温带山地森林面积减少^[33];在区域尺度上亦有类似的结论,四川省 20 世纪 80 至 90 年代、21 世纪初期、中期以及末期四个时段各气候植被类型的平均海拔均向高海拔上移^[34];东北主要森林类型生长将受限于气候增暖,针叶树种比例下降,阔叶树比例增加,温带针阔混交林垂直分布带有上移的趋势^[35,36]。在秦岭地区,亦有研究表明草地呈现出减少趋势^[37],而秦岭草地多为高寒草甸。这充分说明了在气候变暖条件下,气温的升高有利于暖温带植被的生长,而高寒区域的植被类型的生长条件发生改变,再加之下方植被类型的侵入,导致其潜在分布区面积减小。

本文用于分析秦岭山地的植被潜在分布区划分的生物气候学指标是建立在热量因子的基础上,即认为年均温、最热月气温、最冷月气温对植被的分布格局起主要作用。热量因子在植被分布中起到关键的作用,同时水分因子、自然灾害以及人类活动等诸多因素对植被空间分布也具有一定的影响^[38,39]。本文在生物气候学模型中未考虑水分因子的原因主要是基于以下考虑;首先是基于秦岭山地水热条件的考虑。就热量而言,秦

岭山地气温垂直地带性非常明显^[40,41],且近些年具有显著的上升趋势^[20];而就水分条件而言,秦岭山地年均降水量约 825 mm^[42],水量充沛,且近些年来秦岭山地降水量虽有减少趋势但并未达到显著^[19]。因此水分条件对于秦岭山地植被生长的限定性较弱,而热量因子对秦岭山地植被分布的解释力明显大于水分因子^[28],因此认为植被分布格局更多地受到热量因子的控制。同时,亦有研究指出,以单因素为标准对于确定区域植被类型具有较好的指示意义^[43,44]。因此本文根据基于三个气温要素建立的热量因子推算秦岭山地植被带变化具有一定的参考意义。

另外,根据前人相关研究结论,植被带的迁移对于气候变化的响应往往有一定的滞后性,这种滞后的时间尺度或许是一、二百年^[45],同时植被带的迁移也受到其迁移能力、迁移速率、成土能力以及迁移障碍等因素的影响^[46]。因此,本研究中提出的植被带的潜在分布区的变化在某种程度上指该区域的热量指标的变化达到了该类植被带的生长需求,在气候持续变暖的大背景下,这种植被带的迁移存在一定的可能性。

3.1.2 气候变化背景下秦岭山地植被管理建议

针对气候变化引起的植被垂直格局的变化,应积极制定应对措施以保证植被正常生长,尤其要注意防御不利条件对新生植被的干扰。由于气候变暖而发生的植被带更替是在较为理想的条件下发生,但在植被带更替过程中,新生植被往往比较脆弱,容易受到极端气候条件以及人为活动的干扰^[47]。新生植被带未成林之前,原有植被带死亡,会造成秦岭植被整体覆盖度下降,生产力减退。目前已有学者提出,在秦岭的太白山及牛背梁等地观测到巴山冷杉的死亡,巴山冷杉表现出一定的衰退趋势^[48]。这也反映了随着气候变暖,喜阴冷环境的巴山冷杉原有生境发生了变化^[49],其热量条件在一定程度上不利于巴山冷杉的生长,故而出现了植被带在更替过程中原有植被死亡的现象。因此,应积极防御不利条件对不同类型植被的影响,尤其是对新生植被的干扰,制定新生植被的保护措施以及应对自然灾害预案,保证新老植被的顺利更替,保持秦岭生态活力。同时,在气候变化背景下,科学合理地评估气候资源,根据气候条件的变化逐步调整农林作物适生区,实现农林生产力的最大化^[50],是秦岭山地科学应对气候变化必要手段。

3.2 结论

(1) 在气候变暖背景下,1959—2020 年秦岭山地陕西段 EWI 整体呈上升趋势,进入 21 世纪后的增长趋势更为明显,秦岭南坡 EWI 上升趋势略强于北坡,近 62 年来南北坡倾向率分别为 0.48℃/10 a 与 0.46℃/10 a。

(2) 气候变暖导致秦岭山地植被潜在分布区格局发生变化。在秦岭北坡,21 世纪前仅包含四个植被类型潜在分布区,分别为落叶阔叶林、针阔混交林、亚高山针叶林、高山灌丛;21 世纪后,秦岭山地北坡渭河东部逐渐出现常绿落叶阔混交林潜在分布区,共含五个植被类型分布区。

(3) 秦岭山地植被潜在分布区面积及海拔高度发生变化。随着气候变暖,秦岭山地南北坡暖温带落叶常绿混交林、暖温带落叶阔叶林潜在分布区的面积扩张,而温带针阔混交林、寒温带针叶林以及高寒灌丛潜在分布区的面积减小。秦岭山地各植被带潜在分布区的平均海拔均呈现上移趋势,高寒植被类型上移幅度大于暖温植被类型。

(4) 未来气候情景下秦岭山地植被垂直分布格局可能发生变化。在 RCP4.5 及 RCP8.5 情景下,低海拔区植被带面积持续扩张,高海拔区植被带面积持续缩减,到 2070 年秦岭南北坡均可能出现亚热带常绿阔叶林潜在分布区,亚热带常绿阔叶林、暖温带落叶常绿混交林将可能代替温带针阔混交林发展为秦岭山地潜在分布区面积最大的植被类型。

参考文献 (References):

- [1] 张百平,姚永慧. 山体效应研究. 北京: 中国环境出版社, 2015.
- [2] Bugmann H K M, Solomon A M. Explaining forest composition and biomass across multiple biogeographical regions. *Ecological Applications*, 2000, 10(1): 95-114.
- [3] IPCC. Fifth Assessment Report (AR5)-IPCC. Stockholm: IPCC, 2013.
- [4] Kottek M, Grieser J, Beck C, Rudolf B, Rubel F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*,

- 2006, 15(3): 259-263.
- [5] Baker B, Diaz H, Hargrove W, Hoffman F. Use of the Köppen-Trewartha climate classification to evaluate climatic refugia in statistically derived ecoregions for the People's Republic of China. *Climatic Change*, 2010, 98(1/2): 113.
- [6] Rubel F, Kottek M. Observed and projected climate shifts 1901-2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification. *Meteorologische Zeitschrift*, 2010, 19(2): 135-141.
- [7] Feng X M, Zhao Y S. Grazing intensity monitoring in Northern China steppe: integrating CENTURY model and MODIS data. *Ecological Indicators*, 2011, 11(1): 175-182.
- [8] Lenihan J M, Bachelet D, Neilson R P, Drapek R. Response of vegetation distribution, ecosystem productivity, and fire to climate change scenarios for California. *Climatic Change*, 2008, 87(S1): 215-230.
- [9] Raab D, Bayley S E. A vegetation-based Index of Biotic Integrity to assess marsh reclamation success in the Alberta oil sands, Canada. *Ecological Indicators*, 2012, 15(1): 43-51.
- [10] 方精云. 我国森林植被带的生态气候学分析. *生态学报*, 1991, 11(4): 377-387.
- [11] 徐文铎. 吉良的热量指数及其在中国植被中的应用. *生态学杂志*, 1985, 4(3): 35-39.
- [12] Fang J Y, Song Y C, Liu H Y, Piao S L. Vegetation-climate relationship and its application in the division of vegetation zone in China. *Acta Botanica Sinica*, 2002, 44(9): 1105-1122.
- [13] 倪健. KIRA 指标的拓展及其在中国植被与气候关系研究中的应用. *应用生态学报*, 1997, 8(2): 161-170.
- [14] 王襄平, 张玲, 方精云. 中国高山林线的分布高度与气候的关系. *地理学报*, 2004, 59(6): 871-879.
- [15] You G Y, Liu B, Zou C X, Li H D, McKenzie S, He Y Q, Gao J X, Jia X R, Arain M A, Wang S S, Wang Z, Xia X, Xu W G. Sensitivity of vegetation dynamics to climate variability in a forest-steppe transition ecozone, north-eastern Inner Mongolia, China. *Ecological Indicators*, 2021, 120: 106833.
- [16] Chiu C A, Lin P H, Hsu C K, Shen Z H. A novel thermal index improves prediction of vegetation zones; associating temperature sum with thermal seasonality. *Ecological Indicators*, 2012, 23: 668-674.
- [17] 康慕谊, 朱源. 秦岭山地生态分界线的论证. *生态学报*, 2007, 27(7): 2774-2784.
- [18] 白红英. 秦巴山区森林植被对环境变化的响应. 北京: 科学出版社, 2014.
- [19] 白红英, 刘康, 王俊, 李书恒. 气候变化背景下秦岭山地植被响应与适应. 北京: 科学出版社, 2019.
- [20] Zhao T, Bai H Y, Yuan Y, Deng C H, Qi G Z, Zhai D P. Spatio-temporal differentiation of climate warming (1959-2016) in the middle Qinling Mountains of China. *Journal of Geographical Sciences*, 2020, 30(4): 657-668.
- [21] 王晓东. 长白山北坡林线对气候变化的响应过程研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2011.
- [22] 刘丹, 于成龙. 气候变化对东北主要地带性植被类型分布的影响. *生态学报*, 2017, 37(19): 6511-6522.
- [23] 宋文静, 吴绍洪, 陶泽兴, 戴君虎. 近 30 年中国中东部地区植物分布变化. *地理研究*, 2016, 35(8): 1420-1432.
- [24] 张月悦, 程志刚, 陈笑笑, 宾昕, 靳立亚. 秦巴山区植被快速变化区典型气候指标的演变特征及其海拔依赖性分析. *成都信息工程大学学报*, 2020, 35(4): 471-478.
- [25] 张百平. 中国南北过渡带研究的十大科学问题. *地理科学进展*, 2019, 38(3): 305-311.
- [26] 岳明. 秦岭植物垂直带谱完整复杂. *森林与人类*, 2015, (2): 76-81.
- [27] 陆福志, 鹿化煜. 秦岭—大巴山高分辨率气温和降水格点数据集的建立及其对区域气候的指示. *地理学报*, 2019, 74(5): 875-888.
- [28] 赵婷. 气候变化背景下秦岭山地植被变化的地形分异效应[D]. 西安: 西北大学, 2020.
- [29] 王景才, 郭佳香, 徐蛟, 李帆. 近 55 年淮河上中游流域气候要素多时间尺度演变特征及关联性分析. *地理科学*, 2017, 37(4): 611-619.
- [30] 张善红, 白红英, 齐贵增, 梁佳, 赵婷, 孟清. 1960-2019 年秦岭气候带界限的变化研究. *自然资源学报*, 2021, 36(10): 2491-2506.
- [31] 刘甲毅, 邓丽姣, 傅国斌, 白红英, 王俊. 两种统计降尺度方法在秦岭山地的适用性. *应用气象学报*, 2018, 29(6): 737-747.
- [32] Grabherr G, Gottfried M, Pauli H. Climate effects on mountain plants. *Nature*, 1994, 369(6480): 448.
- [33] 张新时. 研究全球变化的植被-气候分类系统. *第四纪研究*, 1993(02): 157-169+193-196.
- [34] 逯亚峰, 刘艳青, 王玉宽, 刘媛, 王爱华. 未来气候变化对山地生物气候类型分布的影响——以四川省为例. *生态学报*, 2015, 35(21): 7052-7060.
- [35] 程肖侠, 延晓冬. 气候变化对中国东北主要森林类型的影响. *生态学报*, 2008, 28(2): 534-543.
- [36] 冷文芳, 贺红土, 布仁仓, 胡远满. 气候变化条件下东北森林主要建群种的空间分布. *生态学报*, 2006, 26(12): 4257-4266.
- [37] 郭少壮, 白红英, 孟清, 赵婷, 黄晓月, 齐贵增. 秦岭地区林地与草地景观格局变化及其驱动因素. *生态学报*, 2020, 40(1): 130-140.
- [38] 李学梅, 任志远, 张翀. 气候因子和人类活动对重庆市植被覆盖变化的影响分析. *地理科学*, 2013, 33(11): 1390-1394.
- [39] 王瑾. 基于遥感的青海湖流域植被分类、空间分布与影响因素研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [40] 傅抱璞, 李兆元. 秦岭山地的气候特点. *陕西气象*, 1983, (1): 1-11.
- [41] 翟丹平, 白红英, 秦进, 邓晨晖, 刘荣娟, 何红. 秦岭太白山气温直减率时空差异性研究. *地理学报*, 2016, 71(9): 1587-1595.
- [42] 马新萍. 秦岭林线及其对气候变化的响应[D]. 西安: 西北大学, 2015.
- [43] 方精云. 也论我国东部植被带的划分. *植物学报*, 2001, 43(5): 522-533.
- [44] 邹春静, 徐文铎. 中国东北植被生态学研究中的焦点问题. *应用生态学报*, 2004, 15(10): 1711-1721.
- [45] 刘国华, 傅伯杰. 全球气候变化对森林生态系统的影响. *自然资源学报*, 2001, 16(1): 71-78.
- [46] 王开发, 张玉兰, 蒋辉. 我国华南沿海第四纪植被带迁移和古气候变化. *科学通报*, 1991, 36(6): 447-450.
- [47] 周广胜. 《中国植被/陆地生态系统对气候变化的适应性与脆弱性》. *气象*, 2015, 41(8): 1048-1048.
- [48] 党海山. 秦巴山地亚高山冷杉(*Abies fargesii*)林对区域气候的响应[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉植物园), 2007.
- [49] 秦进, 白红英, 周旗, 王俊, 李书恒, 甘卓亭, 包光. 牛背梁自然保护区林线不同海拔巴山冷杉径向生长对气候变化的响应. *干旱区地理*, 2017, 40(1): 147-155.
- [50] 朱松丽, 朱磊, 赵小凡, 王文涛, 张文秀. "十二五"以来中国应对气候变化政策和行动评述. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(4): 1-8.