

DOI: 10.5846/stxb202011052831

范泽孟.黑河流域植被垂直分布对气候变化的响应.生态学报,2021,41(10):4066-4076.

Fan Z M. Response analysis of gradient distribution of vegetation to climate change in Heihe River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 4066-4076.

# 黑河流域植被垂直分布对气候变化的响应

范泽孟<sup>1,2,3,\*</sup>

1 中国科学院地理科学与资源研究所,资源与环境信息系统国家重点实验室,北京 100101

2 中国科学院大学资源与环境学院,北京 100049

3 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心,南京 210023

**摘要:**黑河流域作为我国典型的生态系统过渡带,深入分析该区域内植被垂直分布变化对气候变化的响应,对于开展区域尺度植被分布对气候变化的响应研究极具代表性。近 30 年来,黑河流域的植被分布随着平均生物温度和降水分布变化,在空间分布上,尤其是垂直分布上发生了系列变化。基于黑河流域植被类型的 410 个野外调研采样数据、1980s 年代的植被数据、遥感影像、气候观测数据、DEM 等多源数据,分别构建了黑河流域气候要素和植被类型垂直分布变化的空间分析模型,定量揭示了黑河流域绿洲农田荒漠带( $\leq 1700$  m)、荒漠草原植被带(1700—2100 m)、干性灌丛草原植被带(2100—2500 m)、山地森林草原植被带(2500—3300 m)、高山灌丛草甸植被带(3300—3800 m)和高山寒漠草甸植被带( $\geq 3800$  m)6 个植被垂直带的植被变化及其对气候变化的响应差异。研究结果表明:在 1980s—2010s 期间,整个黑河流域植被空间分布的动态变化率为 25.75%,发生变化的总面积为 203.12 万  $\text{hm}^2$ ;绿洲农田荒漠植被带的变化面积最大(72.24 万  $\text{hm}^2$ ),山地森林草原植被带的植被动态变化率最高(56.93%);6 个垂直带内的年平均生物温度和平均降水整体上都呈增加趋势,其中降水的增长率随海拔升高呈下降趋势,而平均生物温度的增长率则随海拔升高呈持续上升趋势;黑河流域中低海拔植被带内的植被动态变化与年平均生物温度和平均降水的相关性整体上高于其他植被带;荒漠草原植被带和干性灌丛草原植被带的植被动态变化对气候变化的敏感性高于其他植被带内植被变化对气候变化的敏感性。

**关键词:**植被类型;垂直分布;动态变化;黑河流域

## Response analysis of gradient distribution of vegetation to climate change in Heihe River Basin

FAN Zemeng<sup>1,2,3,\*</sup>

1 State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China

**Abstract:** In the last 30 years, a series of spatial changes of vegetation types in different gradient zones has appeared in Heihe River Basin, where belongs a typical ecosystem transition zone in China. In order to explicitly analyze the dynamic change difference of vegetation types located in the different gradient zones of Heihe River Basin, the multi-source data of 440 field sampling data of vegetation types, vegetation spatial data of vegetation distribution in 1980s, remote sensing images, climatic observation data and DEM data were collected and preprocessed. Based on the vegetation distribution status and terrain characteristics of Heihe River Basin, the gradient zones of vegetation vertical distribution were classified into 6 vegetation zones of oasis farmland and desert zone (altitude  $\leq 1700$  m), desert grassland vegetation zone (1700 < altitude <

**基金项目:**国家重点研发计划项目(2018YFC0507202,2017YFA0603702);国家自然科学基金项目(41971358,41930647)

**收稿日期:**2020-11-05; **修订日期:**2021-03-11

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fanzm@lreis.ac.cn

2100 m), dry shrub steppe vegetation zone (2100m<altitude<2500 m), mountain forest and steppe vegetation zone (2500 <altitude<3300 m), alpine shrub and meadow vegetation zone (3300<altitude<3800 m), and alpine cold desert and meadow vegetation zone (altitude $\geq$ 3800 m). A spatial analysis model of vegetation vertical distribution and a correlation analysis equation between vegetation change and climatic change were developed in this paper. The results show that the dynamic change rate of vegetation in the whole Heihe River Basin is 25.75%, and the total area of change is 2.0312 million hectares between 1980s and 2010s. The change area of vegetation in the oasis farmland and desert vegetation zone is the largest (0.7224 million hectares), and the change rate of vegetation in the mountain forest grassland vegetation zone is the highest (56.93%). The mean annual biotemperature (MAB) and total annual average precipitation (TAP) in the six gradient zones of vegetation distribution showed an increasing trend, in which the increased rate of precipitation presented a downward trend with the increase of elevation altitude, while the increased rate of average biological temperature showed a continuous upward trend with the increase of elevation altitude. The correlation between the vegetation dynamic change and the change of MAB and TAP in the low and middle vegetation gradient zones were generally higher than that in other vegetation gradient zones in Heihe River Basin from 1980s to 2010s. The sensitivity of vegetation dynamic change to climatic change in the desert and steppe vegetation zone and the dry shrub and grassland vegetation zone was higher than that in other vegetation zones between 1980s and 2010s.

**Key Words:** vegetation type; vertical distribution; dynamic change; Heihe River Basin

植物群落是植物与环境间相互作用的产物,其相互作用表现在植被对环境要素变化的适应性和植被对环境要素的反馈作用<sup>[1-3]</sup>。植被类型的空间分布受到气温、降水、土壤、地形等多种环境因子的影响。针对如何分析植被与环境间的相关关系这一科学问题,目前主要采用包括主成分分析、多元统计分析、二歧指示种分析、典范对应排序方法、最大熵模型等方法,结合植被类型分布、地理因子、气候因子、能量因子等数据,对植被类型的空间分布与环境因素间的关系进行不同层次定量和定性的分析<sup>[4-9]</sup>。植被分布的时空格局在气候变化的驱动下往往会发生系列空间移动,而这种植被分布的时空移动状态可作为气候变化对植被变化影响,以及植被变化对气候变化响应定量分析的重要指标<sup>[10-13]</sup>。目前,在利用平均降水、日照时长、最热最冷月均温、高程、坡度、坡向、Kira 温暖指数、寒冷指数、平均生物温度等气候因子,对在植被分布与气候变化相关性方面开展了大量的研究<sup>[14-15]</sup>,但大部分研究主要集中运用单一或者某几个气候要素来对其与植被分布的相关关系进行分析<sup>[16]</sup>,或者主要对研究区域的植被覆盖指数(NDVI)等时空变化进行分析<sup>[17]</sup>,以及定量求算植被覆盖指数在某一海拔高程上的变化极值<sup>[18]</sup>,尚缺乏不同海拔高程上的植被类型分布的差异对比及其与气候要素的相关性的综合分析。

黑河流域作为我国第二大内陆河流域,总面积超过了  $14 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,为典型的大陆性干旱气候。从黑河上游至下游,全流域的生物温度逐渐升高,降雨量则逐渐减少。黑河上游主要为祁连山区,地势高寒,年降水量为 250—500 mm,植被垂直分布规律性明显。其中,高山垫状植被带主要分布海拔范围为 3900—4200 m,以蒿草和杂类草为主的高山草甸植被带主要分布海拔范围为 3600—3900 m,以杜鹃(*Rhododendron przewalskii*)灌丛、高山柳(*Salix cupularis*)灌丛和金露梅(*Potentilla fruticosa*)矮灌丛为主的高山灌丛草甸带主要分布海拔范围为 3300—3900 m,以青海云杉(*Picea crassifolia*)和祁连圆柏(*Sabina przewalskii*)为主的山地森林带主要分布海拔范围为 2400—3400 m,山地草原带主要分布在 2200—2600 m,荒漠草原带主要分布在 1900—2300 m。海拔在 2000 m 以下的黑河流域中下游地区的植被类型则主要为温带小灌木和半灌木荒漠植被类型。其中,中游除了自然生长的温带小灌木和半灌木荒漠植被,主要分布绿洲地区人工栽培的农作物和人工林植被类型。下游三角洲则以胡杨(*Populus euphratica*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)、怪柳(*Tamarix chinensis*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)等荒漠植被为主<sup>[19]</sup>。

气候变化将引起土壤水文循环系统变化<sup>[20]</sup>,导致植物生长和分布环境发生改变<sup>[21]</sup>,使得植被类型及分

布呈现相应的响应变化<sup>[22]</sup>。尤其是气温和降水作为最主要的气候要素,其时空分布变化,将直接关系到植被类型的空间分布范围及动态变化状态<sup>[23]</sup>。近 50 年来,黑河流域的平均气温呈显著上升趋势<sup>[24]</sup>。随着气候变化和人类活动强度的不断加剧,黑河流域的生态环境呈现出系列退化现象。其中,黑河上游山地草场超载导致大面积草场、牧场退化,下游的额济纳旗由原来西北地区的生态屏障沦为沙尘暴的重要发源地<sup>[25]</sup>,影响范围涉及中国西北、华北甚至华东地区<sup>[26-27]</sup>。虽然目前在黑河流域范围内,尤其是在小流域或者更小尺度上<sup>[28]</sup>,开展了大量的黑河流域植被变化观测和统计分析研究<sup>[29-30]</sup>。然而在黑河流域植被类型空间分布特征及与气候变化的关系目前主要集中在黑河流域上游地区,缺乏对整个黑河流域植被类型的垂直分布及其与气温、降水等气候要素的响应差异分析<sup>[31]</sup>。

因此,该论文旨在结合 1980s 年代的黑河流域植被类型的空间分布数据,以及大量的野外调研、历史采样、遥感影像等多源植被基础数据,以及气候观测模拟数据,在获取的黑河流域 2010s 时段 79 个植被型组的空间分布数据的基础上,分别构建气候要素和植被类型垂直分布变化的空间统计分析模型,定量分析黑河流域不同海拔梯度上植被变化与平均生物温度和降水变化的相关性,揭示黑河流域植被分布在不同的分布梯度带上对平均生物温度气温和降水变化的响应差异。该研究不仅可为整个黑河流域的生态系统变化监测和综合评估提供重要数据与方法支持,而且能够为开展黑河流域不同植被垂直带的生态修复与管理等提供辅助决策支持。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据收集与处理

在黑河流域植被垂直分布变化及其对气候变化响应定量分析过程中涉及到植被数据、气候数据及地形高程数据。植被类型及分布的基础数据包括寒区旱区科学数据中心网站(<http://westdc.westgis.ac.cn>)的 1980s 年代的植被类型空间分布数据和 2011—2015 年间野外实地采样的 410 个植被样本数据。基于 410 个植被样本数据、1980s 年代的植被空间数据,结合 Google Earth 平台的多源高分影像数据,采用 ArcGIS 空间制图和分析方法,实现黑河流域植被空间分布数据的更新,获得 2010s 年代黑河流域 79 种植被类型的空间分布数据(图 1)。气候数据来源于黑河流域 21 个气象常规观测站及周边区域内 13 个的气象观测站的气候观测资料。在对每个气象观测站点 1980s 年和 2010s 年两个时段的年平均降水和平均生物温度进行计算的基础上,利用高速度高精度曲面建模(HASM)方法,模拟得到黑河流域的空间分辨率为 500 m×500 m 的年平均降水和平均生物温度的空间分布数据(图 2)<sup>[32-33]</sup>。地形数据采用美国的 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)90 m×90 m 的 DEM 数据。

### 1.2 模型与方法

根据黑河流域的气温、降水、土壤及植被的空间分布格局及其垂直分异特征,结合黑河流域海拔高程范围(800—5400 m),将黑河流域植被分布从低海拔到高海拔依次划分为 6 级植被垂直分布梯度带:即,绿洲农田和荒漠带(≤1700 m)、荒漠草原植被带(1700—2100 m)、干性灌丛草原植被带(2100—2500 m)、山地森林草原植被带(2500—3300 m)、高山灌丛草甸植被带(3300—3800 m)和高山寒漠草甸植被带(≥3800 m)。利用 ArcGIS 空间统计方法,分别对每个植被垂直分布梯度带内的平均生物温度、平均降水及植被类型进行统计,并定量计算 1980s 和 2010s 两个时段内的植被垂直分布梯度带内平均生物温度、平均降水及植被类型的变化强度,解析黑河流域植被类型对气候变化响应的梯度差异。

其中,采用黑河流域 1980s( $t_0$ )和 2010s( $t_1$ )两个时段内植被垂直分布梯度带内的平均生物温度和平均降水的空间变化速率,表征两个时段内各植被垂直分布梯度带的气候要素变化强度的垂直差异性,其计算公式为:

$$DMAB_k = (Ave_{MAB,k,t_1} - Ave_{MAB,k,t_0}) / Ave_{MAB,k,t_1} \times 100\% \quad (1)$$

$$DTAP_k = (Ave_{TAP,k,t_1} - Ave_{TAP,k,t_0}) / Ave_{TAP,k,t_1} \times 100\% \quad (2)$$

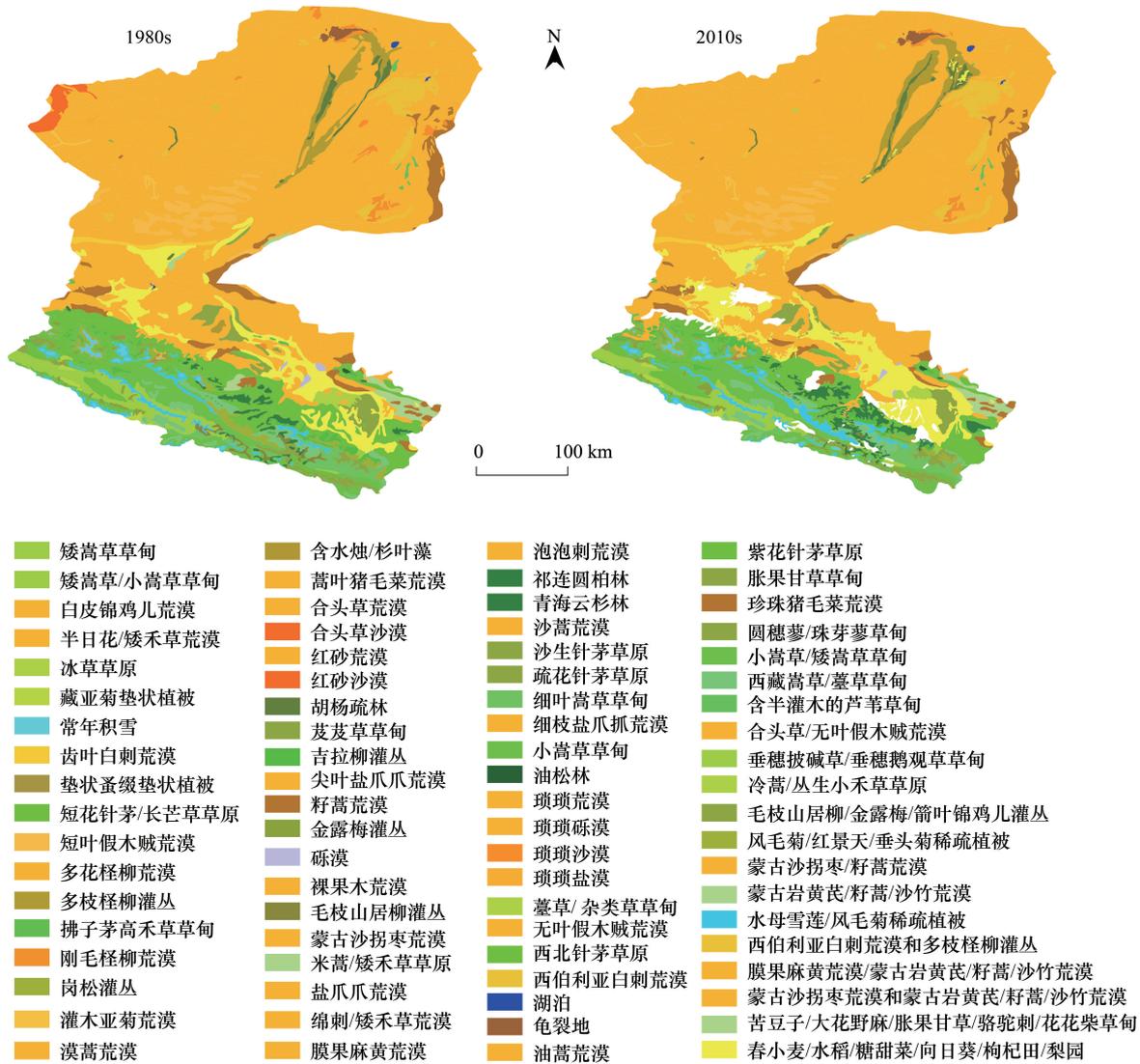


图 1 1980s 和 2010s 黑河流域植被类型的空间分布

Fig.1 Spatial distribution of vegetation in Heihe river Basin in 1980s and 2010s

式中,  $DMAB_k$ 、 $DTAP_k$  分别为  $t_0$  和  $t_1$  两个时段内第  $k$  个植被垂直分布梯度带内的平均生物温度和平均降水的变化强度;  $Ave_{MAB,k,t_0}$  和  $Ave_{MAB,k,t_1}$  分别为  $t_0$  和  $t_1$  两个时段内第  $k$  个植被垂直分布梯度带内的平均生物温度;  $Ave_{TAP,k,t_0}$  和  $Ave_{TAP,k,t_1}$  分别为  $t_0$  和  $t_1$  两个时段内第  $k$  个植被垂直分布梯度带内的平均降水;  $k=1,2,3,4,5,6$  分别表示绿洲农田和荒漠带、荒漠草原植被带、干性灌丛草原植被带、山地森林草原植被带、高山灌丛草甸植被带和高山寒漠草甸植被带 6 个植被垂直分布带的编码。

根据黑河流域 1980s ( $t_0$ ) 和 2010s ( $t_1$ ) 两个时段内植被垂直分布梯度带内的各种植被类型的空间分布数据, 求算每一种植被类型及所有植被类型在各个植被垂直梯度带内的变化率, 进而表征两个时段内各植被垂直分布梯度带的植被类型的变化差异性, 其计算公式为:

$$DVeg_{i,k} = \Delta S_{i,k,t_0-t_1} / S_k \times 100\% \tag{3}$$

$$DVeg_k = \sum \Delta S_{i,k,t_0-t_1} / S_k \times 100\% \tag{4}$$

式中,  $\Delta S_{i,k,t_0-t_1}$  表示  $t_0$  和  $t_1$  两个时段内第  $k$  个植被垂直分布带内第  $i$  种植被类型的变化面积;  $DVeg_{i,k}$  表示  $t_0$  和  $t_1$  两个时段内第  $k$  个植被垂直分布带内第  $i$  种植被类型的变化率;  $S_k$  表示第  $k$  个植被垂直分布带的总面

积;其余参数同上。

## 2 结果分析

### 2.1 黑河流域气候要素的空间分布变化及垂直分异

根据对 1980s 和 2010s 两个时期的黑河流域年平均生物温度和平均降水两个关键气候要素的空间分布变化数据(图 2)进行分析发现,平均降水量增长最显著的区域集中在黑河流域上游东部,祁连山脉段为减少趋势并呈带状分布;平均生物温度的增长主要集中在中游地带,增长强度往南侧随纬度下降逐渐减缓,在祁连山区的增长幅度小且呈带状分布。结合 DEM 数据,对黑河流域的 6 个植被垂直分布带的平均生物温度和平均降水的变化强度进行了统计分析表明(表 1):随着海拔高度的增加,整个黑流域的平均生物温度逐渐降低,而平均降水量则逐渐升高。从 1980s 时段到 2010s 时段,整个黑河流域的平均降水量增加了 7.57 mm,增加幅度为 2.39%。其中,荒漠草原植被带增量最大(增加 12.48 mm),绿洲农田与荒漠沙漠带增幅最快(增加了 14.64%),而高山寒漠草甸植被带的增量和增加幅度均为最小,分别为 2.58 mm 和 0.43%。另外,整个黑河流域的平均生物温度在两个时段内上升 0.62℃,上升幅度为 11.42%。其中,绿洲农田和沙漠荒漠带的平均生物温度增加最大(上升 0.80℃),但其增加幅度最小(增加 7.50%);高山寒漠草甸植被带的平均生物温度增加最小(上升 0.30℃),但其上升幅度最快(上升 37.97%)。

表 1 黑河流域平均生物温度和降水的垂直梯度变化

Table 1 Changes of mean average biotemperature and total annual average precipitation in different gradient zones of Heihe river basin between 1980s and 2010s

植被垂直分布带 Gradient zone of vegetation distribution	年平均降水 Total annual average precipitation				平均生物温度 Mean average biotemperature			
	1980s/mm	2010s/mm	2010s— 1980s/mm	变化率 Change rate/%	1980s/℃	2010s/℃	2010s— 1980s /℃	变化率 Change rate/%
绿洲农田荒漠带 Oasis farmland and desert zone ( $\leq 1700$ m)	49.94	57.25	7.31	14.64	10.66	11.46	0.80	7.50
荒漠草原植被带 Desert steppe vegetation zone (1700—2100 m)	170.04	182.52	12.48	7.34	7.98	8.73	0.75	9.40
干性灌丛草原植被带 Dry shrub grassland vegetation zone (2100—2500 m)	252.63	264.62	11.99	4.75	6.30	7.00	0.70	11.11
山地森林草原植被带 Mountain forest and grassland vegetation zone (2500—3300 m)	368.11	375.38	7.27	1.97	4.18	4.81	0.63	15.07
高山灌丛草甸植被带 A lpine shrub and meadow vegetation zone (3300—3800 m)	462.26	466.04	3.78	0.82	2.40	2.91	0.51	21.25
高山寒漠草甸植被带 Alpine cold desert and meadow vegetation zone ( $\geq 3800$ m)	596.31	598.89	2.58	0.43	0.79	1.09	0.30	37.97

### 2.2 黑河流域植被类型的空间分布及其整体动态变化

根据 1980s 和 2010s 两个时段的黑河流域植被类型空间分布数据,对两个时段内黑河流域的植被动态变化进行空间统计分析表明(图 1):在整个黑河流域范围内,祁连山区、俄博滩、野牛沟地区等上游区域植被类型的丰富度高于其他区域。河西走廊、阿拉善平原及狼心山西麓的植被类型分布相对单一,主要以荒漠/半荒漠植被类型为主。中游山丹、民乐地区的青海云杉植被类型呈现扩张趋势,上游祁连山区地区的西北针茅(*S. sareptana* var. *krylovii*)植被类型呈现退缩趋势,而中游肃南县地区的矮禾草草原植被类型呈现消亡变化趋势。荒漠及沙漠植被类型、人工经济作物田及果园、大型乔木、中高海拔耐寒灌丛类型的面积呈快速增长趋

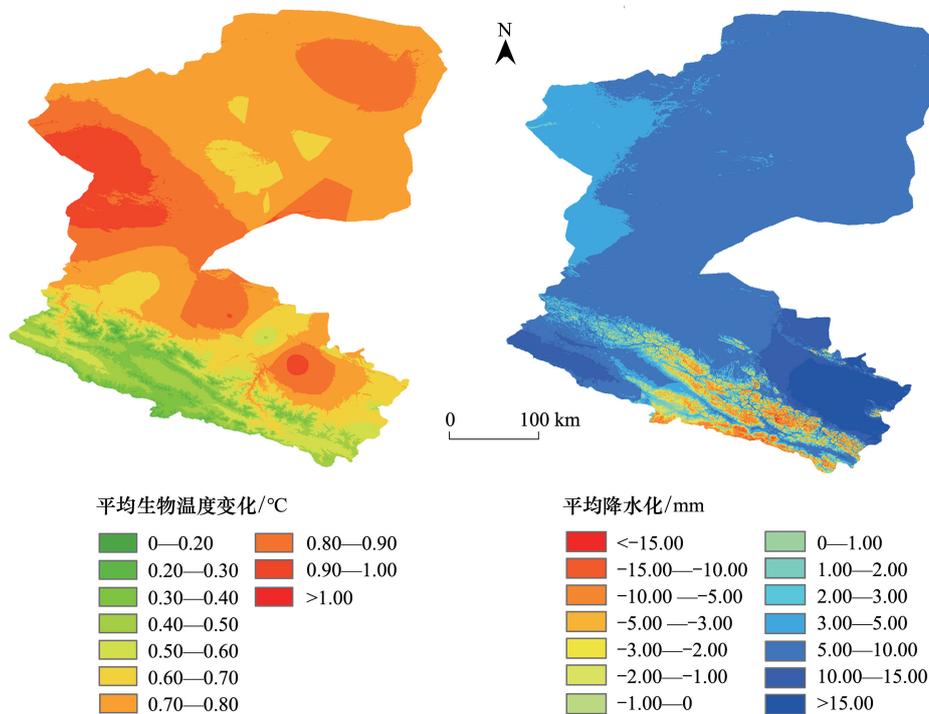


图2 1980s—2010s 黑河流域平均生物温度和平均降水的空间变化

Fig.2 Spatial Changes of mean annual biotemperature and average total annual precipitation in different gradients of Heihe river basin between 1980s and 2010s

势,而部分草原、草甸类型出现了不同程度的退化。1) 从动态变化速度上看,整个黑河流域植被空间分布的动态变化率为 25.75%。其中,毛枝山居柳 (*S. oritrepha*) 灌丛减少速度最快,在 1980s—2010s 期间减少了 95%,青海云杉林增加速度最快,在 1980s 到 2010s 期间增加了 96%。另外,苔草 (*Carex* sp.)-杂类草草甸植被类型、吉拉柳 (*S. gilashanica*) 灌丛、祁连圆柏林、青海云杉林、金露梅灌丛等植被类型呈快速增加趋势;毛枝山居柳灌丛、拂子茅 (*Calamagrostis epigeios*) 高禾草草甸、蒙古岩黄芪 (*Hedysarum monogolicum*)-籽蒿 (*Artemisia sphaerocephala*)-沙竹 (*Psammochloa villosa*) 荒漠、圆穗蓼 (*Polygonum macrophyllum*)-珠芽蓼 (*P. viviparum*) 草甸等植被类型呈快速减少趋势;2) 从动态变化面积上看,在 1980s—2010s 期间整个黑河流域植被分布发生变化的总面积为 203.12 万  $\text{hm}^2$ 。其中,春小麦-水稻-糖甜菜-向日葵-枸杞田-梨园代表的经济作物类型增加面积最多,从 1980s 到 2010s 增加了 20.03 万  $\text{hm}^2$ ,体现了人工植被中经济作物类型占主要变化的人工植被变化趋势,其次是青海云杉林,增加了 14.83 万  $\text{hm}^2$ 。籽蒿荒漠减少面积最多,在 1980s—2010s 期间减少了 16.61 万  $\text{hm}^2$ ,其次是矮嵩草草甸,减少了 15.23 万  $\text{hm}^2$ 。另外,虽然吉拉柳灌丛净增长的面积仅为 1.24 万  $\text{hm}^2$ ,但其在各海拔梯度上的变化趋势差异性明显,表明了该植被类型在垂直分布上对气候变化具有非常高的敏感性。

### 2.3 植被类型在垂直梯度上的变化趋势

对黑河流域 1980s—2010s 期间植被类型垂直分布的变化趋势进行统计分析(图 1,表 2)表明,绿洲农田和荒漠带、荒漠草原植被带、干性灌丛草原植被带、山地森林草原植被带、高山灌丛草甸植被带和高山寒漠草甸植被带 6 个垂直带内的优势植被类型呈现不同的变化趋势。其中,绿洲农田荒漠带的优势植被类型为红砂 (*Reaumuria songorica*) 荒漠,面积减少 7.95 万  $\text{hm}^2$ ;荒漠草原植被带的优势植被类型为合头草 (*Sympegma regelii*) 荒漠,面积减少 0.39 万  $\text{hm}^2$ ;干性灌丛草原植被带的优势植被类型为短花针茅 (*Stipa breviflora*)-长茅草 (*Imperata cylindrica*) 草原,面积减少 5.74 万  $\text{hm}^2$ ;山地森林草原植被带的优势植被类型为西北针茅 (*S. sareptana* var. *krylovii*) 草原,面积减少 6.36 万  $\text{hm}^2$ ;亚高山灌丛草甸植被带的优势植被类型为小蒿草

(*Kobresia pygmaea*) 草甸, 面积减少 1.54 万  $\text{hm}^2$ ; 高山寒漠草甸植被带的优势植被类型也是小蒿草草甸, 面积减少 0.31 万  $\text{hm}^2$ 。干性灌丛草原植被带内的优势植被类型短花针茅-长茅草草原, 其面积减少速度最快, 在 1980s—2010s 期间减少了 45.45%。

在 1980s 和 2010s 两个时段内, 山地森林草原植被带内的植被动态变化率最高(表 2), 达 56.93%, 绿洲农田荒漠带内的植被动态变化率最小, 为 7.73%。绿洲农田荒漠带的春小麦-水稻-糖甜菜-向日葵-枸杞田-梨园等人工植被面积增加最多(增加 16.58 万  $\text{hm}^2$ ), 籽蒿荒漠面积减少最多(减少 16.61 万  $\text{hm}^2$ ); 荒漠草原植被带和干性灌丛草原植被带内的吉拉柳灌丛面积增加最多(分别增加 5.88 和 4.30 万  $\text{hm}^2$ ), 而两个垂直带内的短花针茅-长茅草草原面积均减少最多(分别减少 1.07 万  $\text{hm}^2$  和 6.89 万  $\text{hm}^2$ ); 山地森林草原植被带的青海云杉林面积增加最多(12.22 万  $\text{hm}^2$ ), 西北针茅草原面积减少最多(减少 6.36 万  $\text{hm}^2$ ); 亚高山灌丛草甸植被带的合头草荒漠面积增加最多(增加 1.84 万  $\text{hm}^2$ ), 矮蒿草(*K. humilis*) 草甸面积减少最多(减少 4.93 万  $\text{hm}^2$ ); 高山寒漠草甸植被带的水母雪莲-风毛菊稀疏植被面积增加最多(增加 3.68 万  $\text{hm}^2$ ), 其矮蒿草草甸的面积减少最多(减少 13.86 万  $\text{hm}^2$ )。

表 2 黑河流域植被垂分布动态变化

Table 2 Dynamic change of vegetation change in Heihe river basin between 1980s and 2010s

植被垂直分布带 Gradient zone of vegetation distribution	植被变化总面积 Total area of vegetation change/(10000 $\text{hm}^2$ )	植被动态变化率 Change rate of vegetation/%
绿洲农田荒漠带 Oasis farmland and desert zone	72.24	7.73
荒漠草原植被带 Desert steppe vegetation zone	20.14	31.88
干性灌丛草原植被带 Dry shrub grassland vegetation zone	16.19	37.10
山地森林草原植被带 Mountain forest and grassland vegetation zone	43.26	56.93
高山灌丛草甸植被带 Alpine shrub and meadow vegetation zone	22.51	26.88
高山寒漠草甸植被带 Alpine cold desert and meadow vegetation zone	28.79	23.64

#### 2.4 典型植被类型垂直分布的动态变化

为了更好地揭示黑河流域植被的垂直分布变化趋势, 结合各植被垂直带类的主要植被类型及分布状况, 筛选了分布垂直跨度大于等于两个植被垂直带的 10 种典型植被类型, 并对其在 1980s 和 2010s 两个时段内的动态变化情况进行空间统计(表 3)。分析结果显示, 绿洲农田荒漠带内的尖叶盐爪爪(*Kalidium cuspidatum*) 荒漠和人工植被(春小麦-水稻-糖甜菜-向日葵-枸杞田-梨园) 增加速度最快, 分别为 39.92% 和 38.28, 均远高于该植被带内所有类型动态变化的 7.73%; 荒漠草原植被带内的人工植被(春小麦-水稻-糖甜菜-向日葵-枸杞田-梨园) 增加速度最快, 1980s—2010s 期间增加了 62.06%, 而该植被带内的青海云杉林则全部消失; 干性灌丛草原植被带内的合头草荒漠增加速度最快, 增加了 82.41%; 山地森林草原植被带内的合头草荒漠增加最快, 其次青海云杉林和金露梅灌丛, 增加幅度分别高达 774.34%、197.06% 和 169.84%; 高山灌丛草甸植被带内的膜果麻黄荒漠增加最快, 增加了 228.00%, 而毛枝山居柳-金露梅-箭叶锦鸡儿(*Caragana jubata*) 灌丛则减少 100%; 高山寒漠草甸植被带内的金露梅灌丛增加最快, 增加了 54.50%, 而青海云杉林减少了 88.32%。

另外, 尖叶盐爪爪荒漠和人工植被(春小麦-水稻-糖甜菜-向日葵-枸杞田-梨园) 在绿洲农田荒漠带、荒漠草原植被带和干性灌丛草原植被带均呈增长趋势, 在其他垂直植被带内则总体呈减少趋势。毛枝山居柳-金露梅-箭叶锦鸡儿灌丛、水母雪莲-风毛菊稀疏植被、藏亚菊垫状植被和金露梅灌丛在山地森林草原植被带、高

山灌丛草甸植被带和高原寒漠草甸植被带呈增长趋势。青海云杉林在荒漠草原植被带、高山灌丛草甸植被带和高原寒漠草甸植被带呈减少趋势,在山地森林草原植被带呈快速增长趋势。高山灌丛草甸植被带的合头草荒漠呈快速增长趋势。

表 3 典型植被类型在各植被带内的变化率

Table 3 Change rate of classical vegetation types in each gradient zone of vegetation distribution

植被垂直分布带 Gradient zone of vegetation distribution	主要植被类型变化率 Change rate of major vegetation types/%										所有植被类型变化率 Change rate of all vegetation types/%
	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	
绿洲农田荒漠带 Oasis farmland and desert zone	39.92	38.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.22	-2.27	0.29	7.73
荒漠草原植被带 Desert steppe vegetation zone	7.88	62.06	0.00	0.00	0.00	0.00	-100.00	0.00	2.45	-2.79	31.88
干性灌丛草原植被带 Dry shrub grassland vegetation zone	3.42	27.64	0.00	0.00	0.00	0.00	40.54	0.00	3.70	82.41	37.10
山地森林草原植被带 Mountain forest and grassland vegetation zone	-0.18	-58.77	15.73	8.70	0.00	169.84	197.06	0.00	0.00	774.34	56.93
高山灌丛草甸植被带 Alpine shrub and meadow vegetation zone	0.00	-100.00	19.35	157.77	1.22	103.20	-26.29	228.00	0.00	0.00	26.88
高原寒漠草甸植被带 Alpine cold desert and meadow vegetation zone	0.00	0.00	11.47	24.57	1.45	54.50	-88.32	44.29	0.00	0.00	23.64

V1—V10 为 10 种植被的编号,其中 V1 代表尖叶盐爪爪荒漠,V2 代表春小麦-水稻-糖甜菜-向日葵-枸杞田/梨园,V3 代表毛枝山居柳-金露梅-箭叶锦鸡儿灌丛,V4 代表水母雪莲(*Saussurea medusa*)/风毛菊(*Saussurea japonica*)稀疏植被,V5 代表藏亚菊(*Ajania tibetica*)垫状植被,V6 代表金露梅灌丛,V7 代表青海云杉林,V8 代表膜果麻黄(*Ephedra przewalskii*)荒漠,V9 代表红砂荒漠,V10 代表合头草荒漠

## 2.5 植被类型垂直分布对气候要素的响应分析

为了更好地揭示黑河流域不同海拔垂直梯度上的植被动态变化对年平均生物温度和平均年降水等关键气候要素变化的响应关系,利用 ArcGIS 的空间分析模块对黑河流域海拔每间隔 100m 的植被动态变化率( $\Delta S$ )年平均生物温度变化值( $\overline{\Delta MAB}$ )和平均年降水的变化值( $\overline{\Delta TAP}$ )进行空间统计(表 4)。并对黑河流域的绿洲农田荒漠带、荒漠草原植被带、干性灌丛草原植被带、山地森林草原植被带、高山灌丛草甸植被带和高原寒漠草甸植被带六个垂直带内的  $\Delta S$ 、 $\overline{\Delta MAB}$ 和 $\overline{\Delta TAP}$ 的相关性进行分析。结果显示,仅高原寒漠草甸植被带内的植被动态变化率与年平均生物温度变化值和平均年降水的变化具有显著的相关性,其中与年降水的变化呈显著负相关( $P < 0.05$ ),与年生物温度变化呈极显著负相关( $P < 0.01$ )。另外,从海拔每间隔 100 m 的数值分析看,随着海拔的升高,荒漠草原与干性灌丛草原两个植被带的 $\overline{\Delta MAB}$ 均呈逐渐增加趋势, $\overline{\Delta TAP}$ 均呈持续增加趋势,然而  $\Delta S$  在荒漠草原植被带内整体呈增加趋势,在干性灌丛草原植被带内则整体呈减少趋势。以上分析表明,黑河流域的 $\overline{\Delta MAB}$ 和 $\overline{\Delta TAP}$ 对其植被动态变化具有不同的驱动效应,但在不同的植被垂直带上,这种驱动效应存在显著的垂直地带性差异。

表 4 黑河流域植被垂直分布动态变化与气候要素的相关性

Table 4 Correlation between vegetation change and climatic factors in Heihe river basin

植被垂直分布带 Gradient zone of vegetation distribution	海拔 Elevation/m	$\overline{\Delta TAP}/\text{mm}$	$\overline{\Delta MAB}/^\circ\text{C}$	$\Delta S/\%$	$\Delta S$ 与 $\overline{\Delta TAP}$ 的相关性	$\Delta S$ 与 $\overline{\Delta MAB}$ 的相关性
					Correlation between $\Delta S$ and $\overline{\Delta TAP}$	Correlation between $\Delta S$ and $\overline{\Delta MAB}$
绿洲农田荒漠带 ( $\leq 1700$ m)	< 900	0.4845	0.0662	0.0345	$r = 0.62 (P > 0.05)$	$r = 0.39 (P > 0.05)$
	900—1000	0.3684	0.0661	0.0563		
	1000—1100	0.2425	0.0650	0.0773		
	1100—1200	0.1862	0.0694	0.1167		
	1200—1300	0.1522	0.0745	0.0408		

续表

植被垂直分布带 Gradient zone of vegetation distribution	海拔 Elevation/m	$\overline{\Delta TAP}$ /mm	$\overline{\Delta MAB}$ /°C	$\Delta S$ /%	$\Delta S$ 与 $\overline{\Delta TAP}$ 的相关性 Correlation between $\Delta S$ and $\overline{\Delta TAP}$	$\Delta S$ 与 $\overline{\Delta MAB}$ 的相关性 Correlation between $\Delta S$ and $\overline{\Delta MAB}$
	1300—1400	0.1220	0.0789	0.1050		
	1400—1500	0.1039	0.0817	0.1444		
	1500—1600	0.0940	0.0862	0.0848		
	1600—1700	0.0850	0.0898	0.0806		
荒漠草原植被带 (1700—2100 m)	1700—1800	0.0791	0.0908	0.2574	$r = -0.81 (P > 0.05)$	$r = 0.76 (P > 0.05)$
	1800—1900	0.0760	0.0922	0.3792		
	1900—2000	0.0725	0.0952	0.4062		
	2000—2100	0.0686	0.0977	0.3988		
干性灌丛草原植被带 (2100—2500 m)	2100—2200	0.0606	0.1026	0.3998	$r = 0.79 (P > 0.05)$	$r = -0.78 (P > 0.05)$
	2200—2300	0.0507	0.1102	0.4248		
	2300—2400	0.0431	0.1157	0.3336		
	2400—2500	0.0379	0.1209	0.3285		
山地森林草原植被带 (2500—3300 m)	2500—2600	0.0357	0.1232	0.3342	$r = -0.55 (P > 0.05)$	$r = 0.36 (P > 0.05)$
	2600—2700	0.0315	0.1294	0.4514		
	2700—2800	0.0251	0.1391	0.5953		
	2800—2900	0.0217	0.1469	0.7003		
	2900—3000	0.0177	0.1563	0.7476		
	3000—3100	0.0138	0.1674	0.7407		
	3100—3200	0.0107	0.1789	0.6160		
	3200—3300	0.0100	0.1878	0.4573		
高山灌丛草甸植被带 (3300—3800 m)	3300—3400	0.0104	0.1935	0.3065	$r = 0.19 (P > 0.05)$	$r = -0.23 (P > 0.05)$
	3400—3500	0.0098	0.2023	0.2690		
	3500—3600	0.0077	0.2129	0.2947		
	3600—3700	0.0071	0.2219	0.2564		
	3700—3800	0.0062	0.2337	0.2951		
高山寒漠草甸植被带 ( $\geq 3800$ m)	3800—3900	0.0051	0.2493	0.2539	$r = -0.49 (P < 0.05)$	$r = -0.81 (P < 0.01)$
	3900—4000	0.0045	0.2659	0.2614		
	4000—4100	0.0034	0.2878	0.2802		
	4100—4200	0.0023	0.3162	0.2868		
	4200—4300	0.0018	0.3481	0.2500		
	4300—4400	0.0014	0.3765	0.2378		
	4400—4500	0.0020	0.4034	0.1823		
	4500—4600	0.0027	0.4341	0.1338		
	4600—4700	0.0045	0.4655	0.0916		
	4700—4800	0.0072	0.4961	0.0483		
	4800—4900	0.0079	0.5404	0.0380		
	4900—5000	0.0085	0.5643	0.0324		
	5000—5100	0.0077	0.6332	0.0179		
	>5100	0.0065	0.6764	0.0000		

$\overline{\Delta MAB}$  (mean annual biotemperature) 和  $\overline{\Delta TAP}$  (average total annual precipitation) 分别为海拔间隔 100 米的年平均生物温度和平均年降水变化值;  $\Delta S$  为海拔间隔 100 米的植被动态变化率

### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

2010s 年代黑河流域植被类型空间分布数据的获取结果表明, 结合多源高分辨率遥感影像数据、野外实地调研采样点数据、历史采样点数据、气候观测数据、黑河流域矢量边界数据, 运用 Google Earth 平台和 ArcGIS 空间制图和分析方法, 不仅可以高效地实现黑河流域植被类型空间分布数据的快速更新, 而且能够有

效弥补目前仅基于某一植被指数(如 NDVI)对黑河流域植被变化进行分析的算法缺陷<sup>[17]</sup>。1980s 和 2010s 两个时段的黑河流域不同垂直梯度带上的植被变化差异的分析表明,基于气候要素数据、DEM 数据及植被分布数据构建的黑河流域植被类型与气候要素在不同垂直带上的空间分析模型,可以有效地对黑河流域不同垂直梯度带上的植被类型动态变化及其与气候要素变化的响应关系进行定量解析。譬如,荒漠草原植被带和干性灌丛草原植被带的植被动态变化与年平均生物温度和降水的相关性高于其他植被带,有效证实了这两个植被带类的植被变化对气候变化的敏感性高于其他植被带内植被变化对气候变化的敏感性的相关研究结论<sup>[34-35]</sup>;分布于绿洲农田荒漠带、荒漠草原植被带、干性灌丛草原植被带和山地森林草原植被带的(森林、草地及荒漠绿洲等)植被生态系统在 1980s 和 2010s 时段内的变化幅度高于其他的植被带,进一步表明了人类活动对位于黑河流域中下游植被变化的干扰强度大于对高海拔植被变化的干扰强度<sup>[36]</sup>。

另外,国内外大量研究表明,生态过渡带是对气候变化和人类活动最为敏感的区域<sup>[37-39]</sup>。在生态过渡带区域内,植被类型及其多样性的分布更容易受到平均生物温度和降水等气候要素变化的影响而发生改<sup>[40-42]</sup>。因此,黑河流域作为我国典型的生态过渡带,定量解析黑河流域不同垂直梯度上的植被类型的动态变化趋势及其对不同气候要素变化响应的梯度差异,不仅对开展其他生态过渡带的植被类型动态变化及气候变化响应具有借鉴意义,而且开展大尺度下植被分布对气候变化的响应研究也极具代表性<sup>[43-44]</sup>。

在后续的研究工作中,将进一步结合更高分辨率的遥感数据,数量更多、分布更均匀的实地样点数据,考虑阴坡和阳坡的地形影响差异,对流域内各植被类型进行识别和提取,进而在提高各植被类型边界划分精度的基础上,对黑河流域未来植被类型及其垂直分布的变化情景进行模拟预测。

### 3.2 主要结论

黑河流域绿洲农田荒漠带、荒漠草原植被带、干性灌丛草原植被带、山地森林草原植被带、高山灌丛草甸植被带和高山寒漠草甸植被带六个植被垂直带内的平均生物温度和平均降水在 1980s—2010s 间整体上均呈增加趋势。其中,降水的增长率随海拔升高呈下降趋势,而平均生物温度的增长率则随海拔升高呈持续上升趋势。

在 1980s 和 2010s 两个时段内,黑河流域植被类型分布发生变化的面积高达 203.12 万  $\text{hm}^2$ ,动态变化率为 25.75%。其中,春小麦-水稻-糖甜菜-向日葵-枸杞田-梨园代表的经济作物类型增加面积最多(增加 20.03 万  $\text{hm}^2$ ),毛枝山居柳灌丛减少速度最快(减少 95%)。不同植被垂直带的对比分析表明,山地森林草原植被带(2500—3300m)的变化最快,变化率为 56.93%;绿洲农田荒漠沙漠植被带(1700m 以下)的变化最慢,变化率仅为 7.73%,而中低海拔植被带内的植被动态变化率与年平均生物温度和平均降水的相关系数整体上高于其他植被带。

总之,随海拔升高,黑河流域植被类型的总面积变化率逐渐降低。其中,中低海拔段的荒漠化和人工经济作物面积呈快速增加趋势,草原和灌丛面积呈减少趋势;;中高海拔段的耐寒灌丛、荒漠类型植被和部分稀疏植被类型的面积整体呈增长趋势;乔木类型在中海拔段呈增长趋势,高海拔则显著减少趋势。极高海拔段主要是永久冰川、常年积雪和稀疏植被,无明显变化。

### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Quinn J F, Dunham A E. On hypothesis testing in ecology and evolution. *The American Naturalist*, 1983, 122(5): 602-617.
- [ 2 ] Legendre P, Fortin M J. Spatial pattern and ecological analysis. *Vegetatio*, 1989, 80(2): 107-138.
- [ 3 ] Borcard D, Legendre P, Drapeau P. Partialling out the spatial component of ecological variation. *Ecology*, 1992, 73(3): 1045-1055.
- [ 4 ] 张元明, 陈亚宁, 张道远. 塔里木河中游植物群落与环境因子的关系. *地理学报*, 2003, 58(1): 109-118.
- [ 5 ] 张文辉, 卢涛, 马克明, 周建云, 刘世梁. 岷江上游干旱河谷植物群落分布的环境与空间因素分析. *生态学报*, 2004, 24(3): 552-559.
- [ 6 ] Jafari M, Chahouki M A Z, Tavili A, Azarnivand H, Amiri G Z. Effective environmental factors in the distribution of vegetation types in Poshtkouh rangelands of Yazd Province (Iran). *Journal of Arid Environments*, 2004, 56(4): 627-641.
- [ 7 ] 王翠红, 张金屯. 中国部分自然保护区物种多样性与环境因子的关系. *西北植物学报*, 2004, 24(8): 1468-1471.
- [ 8 ] Arshad M, Anwar-Ul-Hussan, Ashraf M Y, Noureen S, Moazzam M. Edaphic factors and distribution of vegetation in the Cholistan desert, Pakistan. *Pakistan Journal of Botany*, 2008, 40(5): 1923-1931.

- [ 9 ] 李亚飞, 刘高焕. 大香格里拉地区植被空间分布的环境特征. 自然资源学报, 2011, 26(8): 1353-1363.
- [ 10 ] Parmesan C, Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 2003, 421(6918): 37-42.
- [ 11 ] Loarie S R, Duffy P B, Hamilton H, Asner G P, Field C B, Ackerly D D. The velocity of climate change. *Nature*, 2009, 462(7276): 1052-1055.
- [ 12 ] Chmura D J, Anderson P D, Howe G T, Harrington C A, Halofsky J E, Peterson D L, Shaw D C, Brad St.Clair J. Forest responses to climate change in the northwestern United States: ecophysiological foundations for adaptive management. *Forest Ecology and Management*, 2011, 261(7): 1121-1142.
- [ 13 ] Lioubimtseva E, Cole R, Adams J M, Kapustin G. Impacts of climate and land-cover changes in arid lands of Central Asia. *Journal of Arid Environments*, 2005, 62(2): 285-308.
- [ 14 ] 谢春平, 方彦, 方炎明. 乌冈栎地理分布与水热环境因子的关系. 水土保持研究, 2011, 18(1): 125-131.
- [ 15 ] He M Z, Zheng J G, Li X R, Qian Y L. Environmental factors affecting vegetation composition in the Alxa Plateau, China. *Journal of Arid Environments*, 2007, 69(3): 473-489.
- [ 16 ] 周勋, 范泽孟, 岳天祥. 黑河流域植被类型分布模拟分析. 地球信息科学学报, 2017, 19(4): 493-501.
- [ 17 ] Yuan L H, Chen X Q, Wang X Y, Xiong Z, Song C Q. Spatial associations between NDVI and environmental factors in the Heihe River Basin. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(9): 1548-1564.
- [ 18 ] 张立峰, 闫浩文, 杨树文, 朱俊文, 邱丽莎. 黑河流域植被覆盖变化及其对地形的响应. 遥感信息, 2018, 32(2): 46-52.
- [ 19 ] 杨耀年. 黑河中游生态整治对策. 甘肃水利水电技术, 2006, (4): 322-324.
- [ 20 ] Dobson A P, Bradshaw A D, Baker A J M. Hopes for the future: restoration ecology and conservation biology. *Science*, 1997, 277(5325): 515-522.
- [ 21 ] Emanuel W R, Shugart H H, Stevenson M P. Climatic change and the broad-scale distribution of terrestrial ecosystem complexes. *Climatic Change*, 1985, 7(1): 29-43.
- [ 22 ] Leemans R, Eickhout B. Another reason for concern; regional and global impacts on ecosystems for different levels of climate change. *Global Environmental Change*, 2004, 14(3): 219-228.
- [ 23 ] Adger W N, Brown K. *Land Use and the Causes of Global Warming*. New York: John Wiley, 1994.
- [ 24 ] 郭昆明, 龔耀文, 王晓云, 邱天. 黑河流域 1960-2015 年气温时空变化特征. 水土保持研究, 2020, 27(2): 253-260.
- [ 25 ] 金晓媚. 黑河流域天然植被的面积变化研究. 地学前缘, 2005, 12(S1): 166-169.
- [ 26 ] 贾艳红, 赵传燕, 南忠仁. 西北干旱区黑河下游植被覆盖变化研究综述. 地理科学进展, 2007, 26(4): 64-74.
- [ 27 ] 白福, 李文鹏, 黎志恒. 黑河流域植被退化的主要原因分析. 干旱区研究, 2008, 25(2): 219-224.
- [ 28 ] He Z B, Zhao W Z. Characterizing the spatial structures of riparian plant communities in the lower reaches of the Heihe River in China using geostatistical techniques. *Ecological Research*, 2006, 21(4): 551-559.
- [ 29 ] 金晓媚, 万力, 胡光成. 黑河上游山区植被的空间分布特征及其影响因素. 干旱区资源与环境, 2008, 22(6): 140-144.
- [ 30 ] Jiang X H, Liu C M. The influence of water regulation on vegetation in the lower Heihe River. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(5): 701-711.
- [ 31 ] 许莎莎, 孙国钧, 刘慧明, 龚雪平, 郝媛媛, 张立勋. 黑河河岸植被与环境因子间的相互作用. 生态学报, 2011, 31(9): 2421-2429.
- [ 32 ] Yue T X, Zhao N, Ramsey R D, Wang C L, Fan Z M, Chen C F, Lu Y M, Li B L. Climate change trend in China, with improved accuracy. *Climatic Change*, 2013, 120(1/2): 137-151.
- [ 33 ] Yue T X, Zhao N, Liu Y, Wang Y F, Zhang B, Du Z P, Fan Z M, Shi W J, Chen C F, Zhao M W, Song D J, Wang S H, Song Y J, Yan C Q, Li Q Q, Sun X F, Zhang L L, Tian Y Z, Wang W, Wang Y A, Ma S N, Huang H S, Lu Y M, Wang Q, Wang C L, Wang Y Z, Lu M, Zhou W, Liu Y, Yin X Z, Wang Z, Bao Z Y, Zhao M M, Zhao Y P, Jiao Y M, Naseer U, Fan B, Li S B, Yang Y, Wilson J P. A fundamental theorem for eco-environmental surface modelling and its applications. *Science China Earth Sciences*, 2020, 63(8): 1092-1112
- [ 34 ] 范泽孟, 范斌. 欧亚大陆植被生态系统平均中心时空偏移的情景模拟. 生态学报, 2019, 39(14): 5028-5039.
- [ 35 ] 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.
- [ 36 ] Shen Q, Ma Y. Did water diversion projects lead to sustainable ecological restoration in arid endorheic basins? Lessons from long-term changes of multiple ecosystem indicators in the lower Heihe River Basin. *Science of the Total Environment*, 2020, 701: 134785.
- [ 37 ] Smith T B, Wayne R K, Girman D J, Bruford M W. A role for ecotones in generating rainforest biodiversity. *Science*, 1997, 276(5320): 1855-1857.
- [ 38 ] Mayle F E, Burbridge R, Killeen T J. Millennial-scale dynamics of southern amazonian rain forests. *Science*, 2000, 290(5500): 2291-2294.
- [ 39 ] Chapin III F S, Zavaleta E S, Eviner V T, Naylor R L, Vitousek P M, Reynolds H L, Hooper D U, Lavorel S, Sala O E, Hobbie S E, Mack M C, Diaz S. Consequences of changing biodiversity. *Nature*, 2000, 405(6783): 234-242.
- [ 40 ] Pauli H, Gottfried M, Dullinger S, Abdaladze O, Akhalkatsi M, Alonso J L B, Coldea G, Dick J, Erschbamer B, Calzado R F, Ghosn D, Holten J I, Kanka R, Kazakis G, Kollár J, Larsson P, Moiseev P, Moiseev D, Molau U, Mesa J M, Nagy L, Pelino G, Puşcaş M, Rossi G, Stanisci A, Syverhuset A O, Theurillat J P, Tomaselli M, Unterluggauer P, Villar L, Vittoz P, Grabherr G. Recent plant diversity changes on Europe's mountain summits. *Science*, 2012, 336(6079): 353-355.
- [ 41 ] Marshall C J, Liebherr J K. Cladistic biogeography of the Mexican transition zone. *Journal of Biogeography*, 2000, 27(1): 203-216.
- [ 42 ] Loehle C. Disequilibrium and relaxation times for species responses to climate change. *Ecological Modelling*, 2018, 384: 23-29.
- [ 43 ] Fan Z M, Fan B, Yue T X. Terrestrial ecosystem scenarios and their response to climate change in Eurasia. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62(10): 1607-1618.
- [ 44 ] 范泽孟, 范斌, 岳天祥. 欧亚大陆植被生态系统潜在分布情景及其对气候变化的响应. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(11): 1817-1830.