

# 近30年祁连山东段冷龙岭地区寒冻荒漠分布范围及其对气候变化的响应

张富广, 曾彪, 杨太保

(兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000)

**摘要:**利用祁连山东段冷龙岭地区1990s—2010s的Landsat TM, OLI遥感影像数据, 结合NDVI阈值和人工目视解译提取1990s, 2000s, 2010s研究区寒冻荒漠分布范围, 分析近30 a研究区寒冻荒漠分布范围变化特征及其对气候变化的响应过程和机理, 同时考虑了地形差异对寒冻荒漠对气候响应的影响。结果表明: (1) 近30 a以来, 祁连山东段冷龙岭地区寒冻荒漠呈萎缩趋势, 以约 $4.5 \text{ km}^2/\text{年}$ 的速率萎缩, 但局部地段也有扩张情况; 其中萎缩区大量分布在3 900~4 100 m的海拔带, 扩张区零星分布于各高度带。该现象导致祁连山东段冷龙岭地区寒冻荒漠分布下界平均海拔向高海拔推进, 推进速率约为 $23 \text{ m}/10 \text{ a}$ 。(2) 受水热条件控制, 寒冻荒漠萎缩变化主要分布在 $12^\circ$ 以下低坡度地区, 同时由于寒冻风化作用加强, 碎屑坡积等物理过程影响, 低坡度区域也存在扩张变化, 随着坡度变陡, 寒冻荒漠基本无变化; 同时, 在不同坡向上均存在寒冻荒漠的萎缩与扩张变化。寒冻荒漠在阳坡变化大于阴坡。(3) 1990—2015年祁连山东段冷龙岭地区气温呈波动增加趋势, 线性增长率约为 $0.3 \sim 0.5^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ , 增温幅度显著, 呈先快后慢趋势, 降水量无明显变化趋势, 但在时间序列上呈现波动。该时期气候变化导致了上述寒冻荒漠分布范围的变化, 且分析结果表明其主要受控于气温变化。

**关键词:**寒冻荒漠; 气候变化; 遥感监测; 冷龙岭地区

**中图分类号:** P931.3; TP79

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2017)06-0305-08

## Changes in the Distribution Range of Alpine Desert and Its Responses to Climate Change in the Lenglongling Area of Eastern Qilian Mountains in Recent 30 Years

ZHANG Fuguang, ZENG Biao, YANG Taibao

(College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** we study on changes in the distribution range of alpine desert and its responses to climate change in the Lenglongling Range of Eastern Qilian Mountains in recent 30 years by using the distributed range of alpine desert in different years, which were obtained as threshold of NDVI and artificial visual interpretation, and were extracted from TM remote sensing digital images in the Lenglongling Area of Eastern Qilian Mountains from 1990s to 2010s. We analyzed the variation characteristics of the change of the distribution range of alpine desert, and then discussed the process and mechanism that the change of the distribution range of alpine desert responses to climate change. Meanwhile, we obtained the topographical data (altitude, slope, aspect) from DEM in the study area in order to discover the relationship between the change of the distribution range of alpine desert and topographical factors. The results indicated that alpine desert was shrinking gradually in the Lenglongling Range of Eastern Qilian Mountains in recent 30 years, but it was expanding in the local section; the shrinking area of alpine desert mainly distributed in the altitude of 3 700~4 100 meters and the expansion region scattered in the different altitude zones. This phenomenon has caused that the average elevation of the lower bound of alpine desert in the Lenglongling Range of Eastern Qilian Mountains nearly had significantly moved to higher altitudes, the move rate was about  $23 \text{ m}/\text{decade}$  during the study period. Under hydrothermal conditions control, the shrinking area of alpine desert in slope mainly

收稿日期: 2016-12-11

修回日期: 2017-01-13

资助项目: 国家自然科学基金(40901056); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(lzujbky-2013-130); 国家基础科学人才培养资助项目(J1210065); 兰州大学地理学基地科研训练及科研能力提高项目

第一作者: 张富广(1989—), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 研究方向为区域植被对气候变化的响应。E-mail: zhangfg15@lzu.edu.cn

通信作者: 曾彪(1979—), 男, 湖北京山人, 副教授, 主要从事全球变化与区域响应研究。E-mail: zenb@lzu.edu.cn

concentrated in the range of below the gradient of 12, also due to frost weathering strengthen, debris slope and physical processes that affect, the expansion changes occurred in the low slope region. As the slope gradient increases, the change of the distribution range of alpine desert has decreased gradually. Meanwhile the shrinking and expansion changes of alpine desert have reflected in different aspects. The changes of alpine desert in sunny slope are greater than that in shady slope. The temperature in the Lenglongling Area of Eastern Qilian Mountains from 1990 to 2015 had a increasing trend and the increase range of temperature was significant, which showed as rapidly first and then slow and had warmed at a rate of about  $0.3\sim 0.5^{\circ}\text{C}/\text{decade}$ . The precipitation had no obvious change, but fluctuated in the range of about  $350\sim 600\text{ mm}$  in time series. In this period, the climate change resulted in the change of the distribution range of the alpine desert, and the results showed that it was mainly controlled by the change of temperature.

**Keywords:** alpine desert; climate change; remote sense monitoring; Lenglongling area

近百年来全球平均温度上升了  $0.85^{\circ}\text{C}$ , 而我国近 60 a 来气温上升尤为明显, 平均每十年升高约  $0.23^{\circ}\text{C}$ , 几乎是全球升温速率的两倍 (IPPC 2013)。当前这种快速的气候变化过程已经并正在引起区域乃至全球尺度的地表植被覆盖变化, 并引起了诸多的生态环境问题<sup>[1-4]</sup>。气候变化是陆地生态系统中决定地球上植被类型及其分布的主要驱动因子, 同时植被也是区域气候特征的反映和指示, 两者之间存在着密不可分的联系<sup>[5]</sup>。高寒荒漠带—高山草甸带边界大都分布于极高海拔地区。该地区植被生长与分布受到了寒冷气候的强烈控制, 对气候变化的响应可能更加敏感。而且由于海拔高, 人烟稀少, 因此人类活动对高寒荒漠带产生的直接影响极小, 控制其分布变化的主要是自然因素。

目前, 在荒漠化研究领域中, 学术界对于干旱引起的暖荒漠研究较多, 而对高山顶部由寒冷引起的冷荒漠关注较少。随着全球变化和区域可持续发展等研究的不断深入, 以更高的时间和空间分辨率对高寒荒漠分布范围和动态变化进行监测分析, 已成为全球环境变化领域重要的发展方向, 具有十分显著的科学意义<sup>[2]</sup>。祁连山生态环境在近几十年变暖的气候背景下也发生了显著的变化<sup>[6-8]</sup>。祁连山高山地区人类活动相对较少, 为观测纯自然过程下高寒区植被带谱变化提供了可能。在全球气候变暖背景下, 高寒植被是如何响应的, 高寒区植被带谱如何变化, 寒冻荒漠分布变化如何? 这些分布变化受气候因子影响外, 还受其他哪些因子的影响, 如地形因子, 土壤等影响。本文通过研究 1990s—2010s 祁连山东段冷龙岭地区寒冻荒漠分布范围变化与气候变化及地形因子关系, 揭示气候因素与地形因素对寒冻荒漠分布范围变化的影响过程和机理。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区

祁连山东段冷龙岭地区位于青藏高原东北段, 西起扁都口, 东止乌鞘岭, 在青海海北藏族自治州门源

回族自治县北部和甘肃武威、金昌市的交界处, 地理坐标为  $101^{\circ}3'-102^{\circ}52'\text{E}$ ,  $37^{\circ}02'-38^{\circ}5'\text{N}$ , 东西长约 225 km, 南北宽约 30~50 km。山峰海拔多为 4 000~5 000 m, 南坡较缓, 北坡较陡。最高峰岗什卡海拔 5 254.5 m。属大陆性高原季风气候区, 区域气温、降水在水平、垂直方向上都有较大差异。寒冻荒漠作为研究区内植被带谱的顶端类型, 其下接高寒草甸, 高寒草甸上界的扩张和萎缩驱使寒冻荒漠下界的变化。

### 1.2 数据集

1.2.1 遥感数字影像 选用美国地质勘探调查局 USGS 空间分辨率为 30 m 的 Landsat5 TM 影像和 Landsat8 OLI 影像。选取夏季 7 月, 8 月份植被生长最好、积雪覆盖影响小的时期影像; 云覆盖量低 (小于 10%) 的影像; 影像时间间隔为 10 a 左右, 分别用 1990s, 2000s, 2010s 每个年代早、中、晚期各取一年的解译结果并求它们的交集作为各年代的变化情况。对选取的遥感影像进行了系统辐射校正和地面控制点几何精校正, 并利用 DEM 进行了地形校正。

1.2.2 气候数据 在中国西部高山区, 气象站较少且数据记录时间较短。门源站 ( $37^{\circ}23'\text{N}$ ,  $101^{\circ}37'\text{E}$ , 1 013.7 m), 乌鞘岭站 ( $37^{\circ}12'\text{N}$ ,  $102^{\circ}52'\text{E}$ , 1 025.2 m) 分别始建于 1957 年、1938 年, 是距离冷龙岭区域最近的气象站, 且其所处位置对位于高海拔的研究区气候特征具有代表性。

本文选择由中国气象局气象科学数据共享服务网提供的距冷龙岭地区较近且记录连续的门源、乌鞘岭 2 个气象站点的 1990—2015 年月平均气温和降水数据, 通过计算得到年值数据。

1.2.3 数字高程模型 选用美国国家航空和航天局 NASA 空间分辨率为 30 m 的 ASTER GDEM V2 数据。该数据是对 GDEM 数据的修正, 其清晰度高且水平和垂直方向的准确度较高, 能够完全满足带谱动态变化的研究需求。

1.3 研究方法 with 精度评估

1.3.1 寒冻荒漠分布范围提取 分别对每一年代范围内按影像选取要求选择的三幅遥感影像数据预处理后进行 NDVI 计算,然后调整 NDVI 阈值(根据荒漠植被覆盖度并结合人工目视判读,NDVI 取值 0.2 效果最佳)初步确定寒冻荒漠边界,并对同年代际三幅影像初步解译结果求交集,结合目视解译修改,最终提取祁连山东段冷龙岭地区寒冻荒漠分布边界。

1.3.2 精度评估 人工目视解译可能会造成寒冻荒漠边界范围像素级别的位移误差。一般认为小于半个像元的误差是能够被接受的<sup>[9]</sup>,并将解译误差控制在 5% 以内。故采用 Granshaw<sup>[10]</sup>提出的缓冲区分析方法创建 7.5 m 缓冲区评估解译结果,进行误差检验。经计算三期影像寒冻荒漠边界提取误差分别为 2.74%,2.73%,2.78%。

1.3.3 寒冻荒漠分布范围变化与气候、地形要素相关分析 将三期祁连山东段冷龙岭地区寒冻荒漠分布范围进行比较,得到 1990s—2010s 寒冻荒漠分布

的未变化区域、萎缩区域、扩张区域,并进行统计分析;采用线性回归分析研究气候因子(气温、降水)在 1990—2015 年时间序列上的变化趋势与演变规律,进而分析寒冻荒漠分布范围变化与气候变化的关系;并利用从 DEM 数据获取的地形要素数据,分析寒冻荒漠分布未变化区、萎缩区和扩张区在不同海拔高度、坡度、坡向上的分布特征,探索寒冻荒漠分布范围变化与地形因子关系。

2 结果与分析

2.1 寒冻荒漠变化特征

近 30 a 祁连山东段冷龙岭地区寒冻荒漠呈萎缩趋势,局部地段也有扩张情况(图 1)。该结果与韦振锋等<sup>[11]</sup>得到的西北地区植被覆盖整体呈增加趋势,但仍有局部地区荒漠化和城市化扩张抑制植被生长的结论一致。与李飞等<sup>[12]</sup>近 30 a 来中国陆地植被活动整体趋于增强,西北稀疏植被区植被状况持续转好的研究结果也一致。

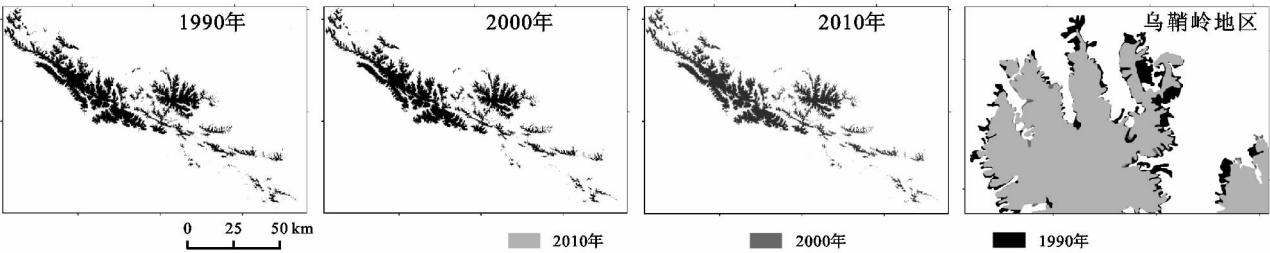


图 1 祁连山东段冷龙岭地区寒冻荒漠的分布及变化示例

1990s—2010s,祁连山东段冷龙岭地区寒冻荒漠逐渐萎缩,且呈先快后慢的萎缩趋势,萎缩速率约为 4.5 km<sup>2</sup>/年。1990s—2000s 寒冻荒漠萎缩变化量大于 2000s—2010s 萎缩变化量,且在 1990s—2000s 的萎缩速率明显快于 2000s—2010s(表 1)。

表 1 1990s—2010s 寒冻荒漠分布面积变化情况

年代	总量/ km <sup>2</sup>	萎缩量/ km <sup>2</sup>	萎缩 变化率	平均每年减少量/ (km <sup>2</sup> ·a <sup>-1</sup> )
1990s	1438.66	87.90	0.06	8.79
2000s	1350.75	46.76	0.03	4.68
2010s	1303.99	—	—	—
总计	—	134.66	0.09	—

2.2 不同海拔高度寒冻荒漠变化情况

在不同海拔高度带上,1990s—2000s 寒冻荒漠在未变化区、萎缩区、扩张区的变化范围与其在 2000s—2010s 的变化范围相似,主要分布在海拔 3 700~4 100 m(图 2A,图 2B)。寒冻荒漠萎缩区主要分布在 3 900~4 100 m 海拔带。随着海拔的增加,寒冻荒漠萎缩变化率逐渐减小,寒冻荒漠基本无变化(图 2C,图 2D)。1990s—2000s 寒冻荒漠扩张变化率比 2000s—2010s 小,且

2000s—2010s 寒冻荒漠在 3 300~3 800 m 范围内扩张变化率大于萎缩变化率(图 2D)。在不同海拔高度带上,2000s—2010s 寒冻荒漠扩张趋势大于 1990s—2000s,寒冻荒漠扩张趋势凸显(图 2A,2B)。

寒冻荒漠分布下界变化主要分布在海拔 3 900~4 000 m(表 2)。1990s—2000s 寒冻荒漠分布下界向上推进约 52.8 m,过渡带变化贡献主要力量。但 2000s—2010s 寒冻荒漠分布下界向上推进约 17 m,主体部分变化起主要作用。寒冻荒漠主体部分平均海拔向上推进约 31.78 m,过渡带平均海拔向上推进约 38 m。总体看来,主体部分边界平均海拔上推变化与过渡带边界平均海拔上推变化对寒冻荒漠分布下界向上推进变化贡献相当。近 30 a 冷龙岭地区寒冻荒漠分布下界平均海拔向上推进约 69.8 m。祁连山东段冷龙岭地区寒冻荒漠分布下界平均海拔以 23 m/10 a 的速率向高海拔推进。该结果与在全球变暖背景下,物种可能被迫向更寒冷的环境迁移,比如高纬度,高海拔或二者兼并<sup>[13-14]</sup>的结论一致。气候变化已经引起了植被分布范围的改变,并且全球气候变暖很可能正驱使植被向更高的纬度和更高的海拔迁移<sup>[15-16]</sup>。

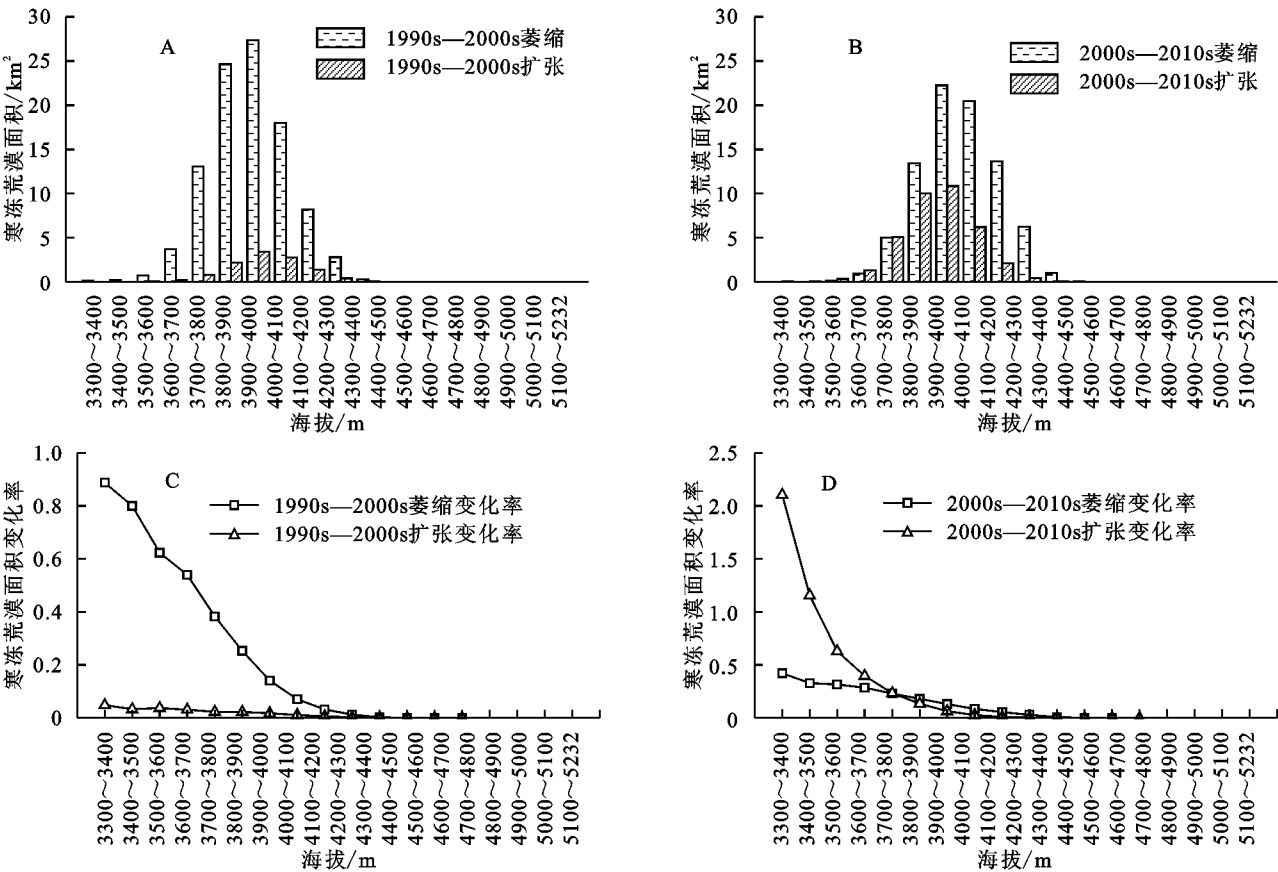


图 2 寒冻荒漠在不同海拔高度带上的变化

表 2 寒冻荒漠分布下界平均海拔

年代	平均海拔/m				
	主体边界 平均海拔	向上推进 平均海拔	过渡带 平均海拔	过渡带边界 向上推进	整体边界 向上推进
1990s	3960.40	3855.27	18.65	34.16	52.82
2000s	3979.06	3889.44	13.13	3.83	16.96
2010s	3992.19	3893.27			
总计	—	31.78	—	37.99	69.78

2.3 不同坡度寒冻荒漠变化情况

由图 3A,3B 可以看出,在不同坡度带上,近 30 a 祁连山东段冷龙岭地区寒冻荒漠萎缩变化主要分布在低坡度地区。1990s—2000s 寒冻荒漠扩张主要分布在 4°以下坡度范围,2000s—2010s 寒冻荒漠扩张主要分布在 12°以下坡度范围。1990s—2000s 冷龙岭地区寒冻荒漠在不同坡度带萎缩量稍大于 2000s—2010s 寒冻荒漠萎缩量。与之相反,2000s—2010s 冷龙岭地区寒冻荒漠在不同坡度带扩张量大于 1990s—2000s 寒冻荒漠扩张量。随着坡度的增加,寒冻荒漠变化逐渐减小,寒冻荒漠基本无变化。由图 3C,3D 知,在不同坡度带上,1990s—2000s 冷龙岭地区萎缩变化率稍大于 2000s—2010s 寒冻荒漠萎缩变化率。与之相反,2000s—2010s 冷龙岭地区扩张变化率大于 1990s—2000s 寒冻荒漠扩张变化率。与 1990s—2000s 相比,2000s—2010s 寒冻荒漠扩张

力量显现。同时,随着坡度增加,寒冻荒漠变化率逐渐减小,寒冻荒漠基本无变化。

2.4 不同坡向寒冻荒漠变化情况

祁连山东段冷龙岭地区寒冻荒漠在不同坡向上均有萎缩和扩张变化(图 4A,4B)。1990s—2000s 寒冻荒漠萎缩变化主要分布在西坡,其次为南坡、西南坡、西北坡,2000s—2010s 寒冻荒漠萎缩变化主要分布在东坡,其次为南坡、西坡、西南坡和东南坡。1990s—2000s 寒冻荒漠扩张区主要分布在东坡,2000s—2010s 寒冻荒漠扩张区主要分布在西坡,其次为南坡、西南坡和西北坡。由图 4C,4D 知,随着坡向由阴坡转阳坡(北坡→东坡、西坡→南坡),1990s—2000s 寒冻荒漠的萎缩呈增加分布趋势。但 2000s—2010s 寒冻荒漠坡向由北坡转向东坡,其萎缩呈增加趋势,坡向由南坡转向西坡,其萎缩呈减少分布趋势。1990s—2000s 寒冻荒漠扩张变化率在东坡最大,其他坡向上均很小。随着坡向由阴坡转阳坡,2000s—2010s 寒冻荒漠扩张变化率呈增加趋势,在南坡最大。在不同坡向上,2000s—2010s 冷龙岭地区寒冻荒漠扩张趋势大于 1990s—2000s 扩张趋势,扩张趋势凸显。整体看来,阳坡寒冻荒漠变化比阴坡大,这与戴声佩等<sup>[17]</sup>阳坡植被比阴坡活跃,植被改善趋势较强的结论一致。

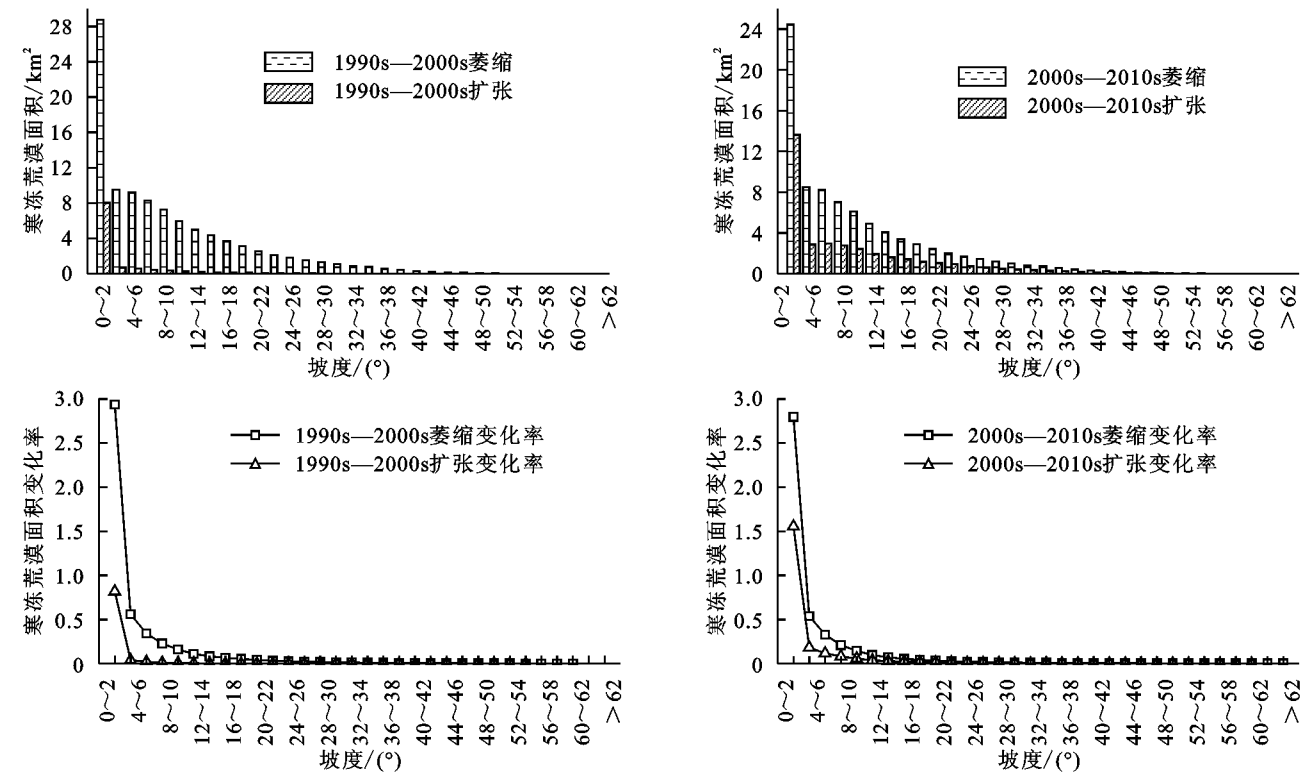


图 3 寒冻荒漠在不同坡度上变化

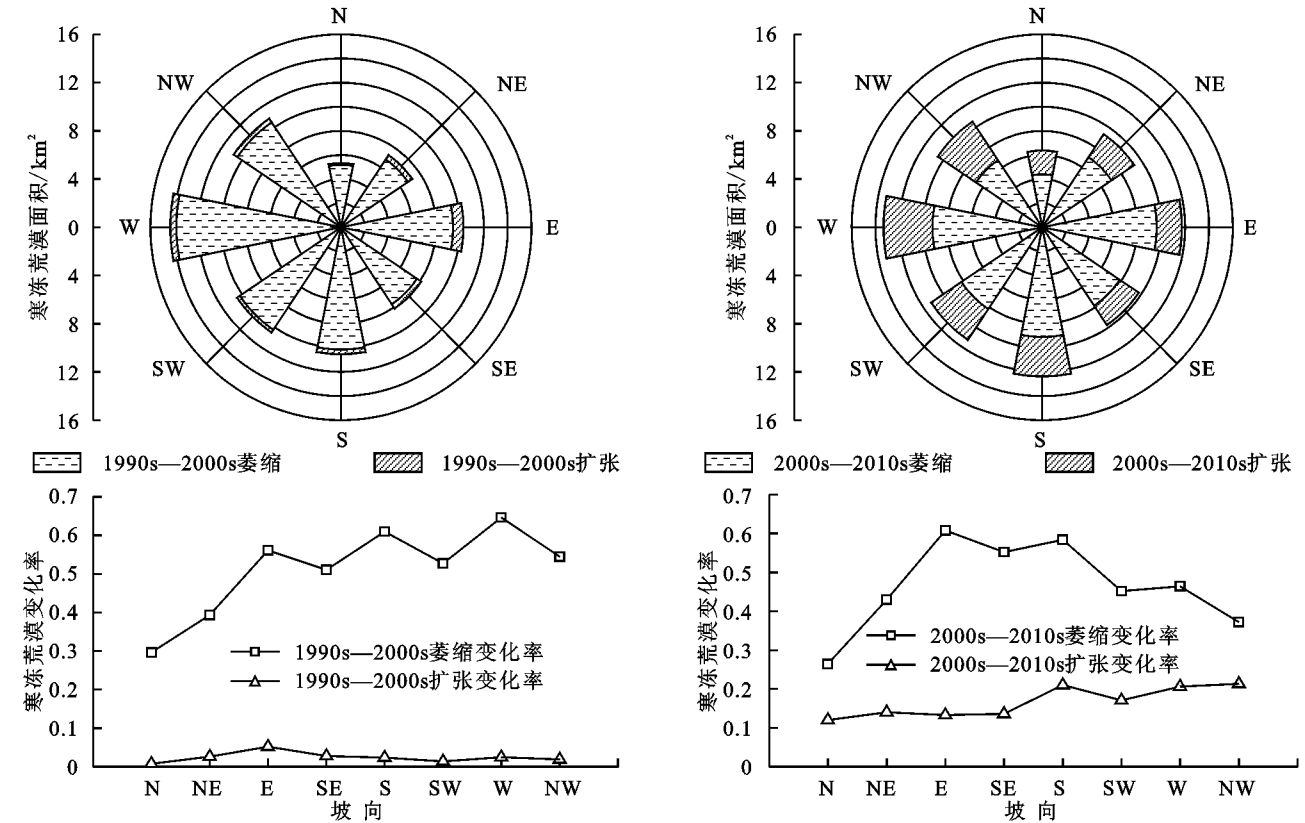


图 4 寒冻荒漠在不同坡向的变化

2.5 气候变化特征

研究区内门源站、乌鞘岭站两个气象站点气温变化在 1990—2015 年呈明显上升趋势,气温线性增长率分别约为 0.5℃/10 a 和 0.3℃/10 a,气温增加幅

度明显,且两个气象站点的气温变化趋势基本一致。在整个研究时期内,气温总体上呈波动增加趋势,且升温速率先快后慢。其中在 1990—1999 年年平均气温上升最快,其次为 2000—2009 年、2010—2015 年

年平均气温增加更为缓慢。从1990—2015年研究区内门源站、乌鞘岭站年降水量无明显变化趋势,但在时间序列上其在350~600 mm间呈现波动。门源站与乌鞘岭站的降水量变化趋势基本一致,且在时间序列上的波动性变化也基本相同。同一时期,研究区内气温变化幅度大于降水量变化幅度。

### 3 讨论

由于高寒荒漠植物十分稀疏,高山草甸向上扩张过程中几乎可以不考虑原有植被对扩张过程的竞争影响,且通过人工目视解译处理,已去除人类活动的影响,因此本文研究寒冻荒漠分布受高山草甸扩张和退缩影响时只考虑物理性的生境条件。

#### 3.1 祁连山东段冷龙岭地区寒冻荒漠变化对气候变化的响应

气候因子中以降水和气温对植被生长的影响最为直接和重要<sup>[18-20]</sup>,温度、降水通过影响植物的光合作用、呼吸作用及土壤有机碳分解等进而影响植物的生长和分布。1990s—2010s祁连山东段冷龙岭地区寒冻荒漠呈萎缩趋势,且其萎缩呈先快后慢的趋势。1990s—2000s寒冻荒漠变化呈快速萎缩趋势,2000s—2010s寒冻荒漠变化仍呈萎缩趋势,变化程度较1990s—2000s小(表1)。同时,1990—2015年祁连山东段冷龙岭地区气温呈明显增加趋势,且表现为先快后慢,降水量无明显变化趋势。1990—1999年气温显著升高,2000—2009年气温增加趋势较前一时期变缓,2010—2015年气温增加趋势更为缓慢。寒冻荒漠分布范围变化对同时期气温变化响应更为敏感,说明该时期寒冻荒漠分布范围变化与气温相关性更强,其分布范围变化主要受气温控制。温度是高寒草甸草地生长的限制因子<sup>[21]</sup>。Zeng等<sup>[22]</sup>指出,高海拔地区植被生长主要受限于温度因子,而增温促进了这些地区近几十年来的植被改善。在一定条件下,气温升高,高于某一特定阈值,低温对高寒草甸生长限制得到释放,高寒草甸加速扩张,致使寒冻荒漠快速萎缩。反之,当气温低于该阈值时,高寒草甸生长受到限制,寒冻荒漠扩张占据优势。寒冻荒漠带在气候变化驱动下的萎缩与扩张的地理过程是可逆的,且气温对其分布范围变化起主要影响作用。

#### 3.2 祁连山东段冷龙岭地区寒冻荒漠变化与地形因子的关系

在一定气候条件下,地形因子通过对光、温度、水分等生态因子的空间再分配,形成多种多样的生态环境,从而间接影响植物的生长<sup>[23]</sup>。由海拔高度和局部地形引起的土壤特征(水份和养分)差异,能够在很大程度上影响植被分布及其与气候变化间的关系<sup>[24]</sup>。寒冻

荒漠带—高山草甸带边界大都分布于极高海拔地区,气候寒冷,植被生长主要受气温的控制。祁连山东段冷龙岭地区寒冻荒漠萎缩与扩张变化主要分布在3700~4100 m海拔带(图2),寒冻荒漠带—高山草甸带边界平均海拔变化主要分布在3900~4000 m海拔带(表2)。随着海拔的增加,寒冻荒漠萎缩变化率逐渐减小,寒冻荒漠基本无变化。这可能与海拔对气温和降水的影响关系较大,且海拔高度的变化能够引起大气温度、大气CO<sub>2</sub>浓度和地势等的变化<sup>[13]</sup>,海拔高的地区坡度一般更陡,水分条件差,土壤基础差,植被活动强度更弱或不存在。位于高海拔地区的高寒草甸随着气温升高,低温限制得到释放,高寒草甸在温度适宜,水分充足,坡度较低的地区迅速扩张,当扩张到一定程度,无法继续在该地区扩张,高寒草甸则向温度、水分条件相对差一些,坡度更大些的地区扩张,直到温度、水分、坡度等条件不能满足高寒草甸生长,高寒草甸扩张受到限制。在整个变化过程中,寒冻荒漠随之动态变化。高寒草甸—寒冻荒漠整体变化过程导致寒冻荒漠带—高山草甸带边界向更高海拔迁移。同时,寒冻荒漠分布下界向高海拔推进的幅度也主要受气温影响,随着气温变化强度的改变,寒冻荒漠分布下界向高海拔推进幅度也相应变化(表2)。在不同海拔高度带上,2000s—2010s寒冻荒漠扩张趋势相比1990s—2000s寒冻荒漠扩张趋势,扩张作用凸显,且在3300~3800 m海拔范围内2000s—2010s寒冻荒漠扩张变化率大于萎缩变化率。这主要是由于在相应海拔高度带上,后一时期气温增加趋势较前一时期变缓,主要受气温控制的高寒草甸的扩张在一定程度上受到限制,寒冻荒漠扩张得到体现,与1990s—2000s寒冻荒漠扩张情况相比,2000s—2010s寒冻荒漠扩张趋势凸显,在海拔分布带谱下部出现了寒冻荒漠扩张变化率大于萎缩变化率的情况。

坡度和坡向是非常重要的地形因子。坡度影响土壤的水分渗透、排放、地表径流的形成以及地表径流速度,一般与土壤含水量呈负相关<sup>[25]</sup>。由图3可知,祁连山东段冷龙岭地区寒冻荒漠的变化集中在12度以下坡度范围,其萎缩变化在低坡度地区。在一定温度条件下,该地区土壤含水量充足,利于高寒草甸扩张。在阳坡,光照增强,虽然同时期气温增加变缓,但高寒草甸仍缓慢扩张,致使寒冻荒漠萎缩增加。一般,北坡(西坡)较南坡(东坡)的土壤具有更好的结构、通透性和持水性能<sup>[27]</sup>。同时,热量因素是决定植物区系地理成分分布格局的重要因素<sup>[28]</sup>。由南坡转向西坡后,虽然土壤、水分环境更有利于高寒草甸生长,但光照辐射强度随之变弱,空气对流中热量补给不足,且同时期气温增加变缓,由于研究区内高

寒草甸生长主要受控于气温,与相同气温变化条件下由北坡转向东坡寒冻荒漠萎缩变化相比,热量来源减少,高寒草甸的扩张更为缓慢,故寒冻荒漠萎缩呈现减少趋势。整体变化上,阳坡大于阴坡,在相同气温条件下,由于光照辐射差异引起坡向土壤水分条件不同,进而导致高寒草甸生长分布差异。

寒冻荒漠分布范围变化受气温、降水、地形、土壤等因素的共同作用,但是气温对其分布范围变化起主要影响作用。

### 3.3 地形因子对寒冻荒漠分布范围变化的影响

本文考虑了局部地形差异对寒冻荒漠分布变化的影响。海拔升高,气温会下降,当气温低于高寒植被生长最低温度限制,植被生长受到限制,寒冻荒漠扩张。在气候变暖的背景下,这一情况在一定程度上得到缓解。坡度增加,土壤持水力下降,含水量降低,且土壤细颗粒物不易附着,植被生存条件恶劣,不利于高寒草甸扩张,寒冻荒漠分布范围变化逐渐减小,随着坡度变陡,寒冻荒漠基本无明显变化。坡向不同导致光照、热量分配差异。究其根本,海拔、坡度、坡向因子共同影响了水热条件的分配,进而影响了寒冻荒漠分布范围的变化。

## 4 结论

(1) 1990s—2010s 祁连山东段冷龙岭地区寒冻荒漠呈萎缩趋势,萎缩速率约为  $4.5 \text{ km}^2/\text{年}$ ,但局部地段也有扩张情况。总体呈现为先快后慢的萎缩变化趋势,2000s—2010s 寒冻荒漠扩张趋势大于1990s—2000s 扩张趋势,其扩张趋势凸显。其中萎缩区大量分布在  $3\ 900\sim 4\ 100 \text{ m}$  的海拔范围,扩张区零星分布于各高度带。该现象导致祁连山东段冷龙岭地区寒冻荒漠分布下界平均海拔显著向高海拔推进,推进速率为  $23 \text{ m}/10 \text{ a}$ ,其中主体部分边界平均海拔上推变化与过渡带边界平均海拔上推变化对寒冻荒漠分布下界向上推进变化贡献相当。

(2) 受水热条件控制,寒冻荒漠萎缩变化主要分布在  $12^\circ$  以下低坡度地区,在坡度较陡地区,土壤、水分条件差以及寒冻风化作用加强,致使低坡度区域也存在扩张变化,随着坡度增加,寒冻荒漠萎缩与扩张变化减弱,坡度较陡地区寒冻荒漠无明显变化;寒冻荒漠在不同坡向上均存在萎缩与扩张变化。随着坡向由阴坡转为阳坡,1990s—2000s 寒冻荒漠萎缩呈增加趋势,1990s—2000s 寒冻荒漠萎缩呈先增加后减小趋势。与1990s—2000s 相比,2000s—2010s 扩张力量凸显。寒冻荒漠在阳坡变化大于阴坡。

(3) 1990—2015 年祁连山东段冷龙岭地区气温

呈波动增加趋势,线性增加速率约为  $0.3\sim 0.5^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ ,降水量无明显变化趋势,但在时间序列上其在  $350\sim 600 \text{ mm}$  间呈现波动。该时期气候变化导致上述寒冻荒漠分布范围变化,且其对气温变化响应更为敏感。寒冻荒漠分布范围变化主要受气温变化控制。

### 参考文献:

- [1] Walther G R. Community and ecosystem responses to recent climate change[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences*, 2010, 365 (1549):2019-24.
- [2] Tchebakova N M, Rehfeldt G E, Parfenova E I. From Vegetation Zones to Climates; Effects of Climate Warming on Siberian Ecosystems [M] // *Permafrost Ecosystems*. Springer Netherlands, 2009:427-446.
- [3] Ni J. Impacts of climate change on Chinese ecosystems: Key vulnerable regions and potential thresholds [J]. *Regional Environmental Change*, 2011, 11(1):49-64.
- [4] Arneth A. Climate science: Uncertain future for vegetation cover[J]. *Nature*, 2015, 524(7563):44-45.
- [5] 李洪权,范广洲,周定文,等. 青藏高原春季植被变化特征及其对夏季气温的影响[J]. *地理科学*, 2008, 28(2): 259-265.
- [6] Liu J, Liu X L, Hou L M. Changes and ecological vulnerability of landscape pattern in Eastern Qilian Mountain[J]. *Arid Land Geography*, 2012, 35(5):795-805.
- [7] Wang Y, Jia W, Liu C, et al. Ecological Environment Change in North Slope of Qilianshan Mountains[J]. *Chinese Forestry Science & Technology*, 2012(3):42-43.
- [8] Yao J Q, Yang Q, Chen Y N, et al. Climate change in arid areas of Northwest China in past 50 years and its effects on the local ecological environment[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(5):1283-1291.
- [9] Bolch T, Yao T, Kang S, et al. A glacier inventory for the western Nyainqentanglha Range and the Nam Co Basin, Tibet, and glacier changes 1976—2009[J]. *The Cryosphere*, 2010, 4(3):419-433.
- [10] Granshaw F D, Fountain A G. Glacier change(1958—1998) in the North Cascades National Park Complex, Washington, USA[J]. *Journal of Glaciology*, 2006, 52 (52):251-256.
- [11] 韦振锋,王德光,张翀,等. 1999—2010 年中国西北地区植被覆盖对气候变化和人类活动的响应[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(6):1665-1670.
- [12] 李飞,曾源,李晓松,等. 近 30 年中国陆地植被活动遥感监测[J]. *中国科学:地球科学*, 2014, 08:1671-1678.
- [13] 徐浩杰,杨太保,曾彪. 杜鹃叶片气孔长度和密度对海拔变化的响应[J]. *干旱区研究*, 2012, 29(6):177-178.
- [14] Bonino M F, Azócar D L M, Schulte J A, et al. Climate change and lizards: changing species' geographic

- ranges in Patagonia [J]. Regional Environmental Change, 2015, 15(6):1121-1132.
- [15] Fagre D B, Peterson D L, Hessl A E. Taking the Pulse of Mountains: Ecosystem Responses to Climatic Variability [J]. Climatic Change, 2003, 59(1/2):263-282.
- [16] Chen J, Yang Y A, Sun H. Advances in the Studies of Responses of Alpine Plants to Global Warming [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2011, 17(3):435-446.
- [17] Dai S P, Zhang B, Wang H J, et al. Vegetation cover change and the driving factors over northwest China [J]. Journal of Arid Land, 2011, 3(1):25-33.
- [18] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999 [J]. Science, 2003, 300(5625):1560-1563.
- [19] Fang J, Shilong P, He J, et al. Increasing terrestrial vegetation activity in China, 1982—1999 [J]. Science in China, 2004, 47(3):229-40.
- [20] 崔林丽, 史军, 杨引明, 等. 中国东部植被 NDVI 对气温和降水的旬响应特征 [J]. 地理学报, 2009, 64(7):850-860.
- [21] Dai Shengpei, Zhang Bo, Wang Qiang, et al. Variation in grassland vegetation NDVI and its ten-day response to temperature and precipitation in the Qilian Mountains [J]. Resources Science, 2010, 32(9):1769-1776.
- [22] Zeng B, Yang T B. Impacts of climate warming on vegetation in Qaidam Area from 1990 to 2003 [J]. Environmental monitoring and Assessment, 2008, 144(1):403-417.
- [23] 张微笑. 地形因子对山区植物生长的影响 [J]. 华夏地理, 2015(3):76-77.
- [24] Zhang H, Qian Y, Wu Z, et al. Vegetation-environment relationships between northern slope of Karlik Mountain and Naomaohu Basin, East Tianshan Mountains [J]. Chinese Geographical Science, 2012, 22(3):288-301.
- [25] 何其华, 何永华, 包维楷. 干旱半干旱区山地土壤水分动态变化 [J]. 山地学报, 2003, 21(2):149-156.
- [26] 刘旻霞, 王刚. 高寒草甸植物群落多样性及土壤因子对坡向的响应 [J]. 生态学杂志, 2013, 32(2):259-265.
- [27] 王礼先. 水土保持学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1995.
- [28] 严岳鸿, 何祖霞, 苑虎, 等. 坡向差异对广东古兜山自然保护区蕨类植物多样性的生态影响 [J]. 生物多样性, 2011, 19(1):41-47.

~~~~~  
(上接第 304 页)

- [7] 马晓冬, 李全林, 沈一. 江苏省乡村聚落的形态分异及地域类型 [J]. 地理学报, 2012, 67(4):516-525.
- [8] 李胜坤, 张毅, 闫欣, 等. 竹溪县农村居民点景观格局及空间分布特征 [J]. 水土保持研究, 2014, 21(4):203-207.
- [9] 郭晓冬, 马利邦, 张启媛. 基于 GIS 的秦安县乡村聚落空间演变特征及其驱动机制研究 [J]. 经济地理, 2012, 32(7):56-62.
- [10] 朱彬, 张小林, 马晓东. 苏北地区乡村聚落的空间格局及其影响因子分析 [J]. 农业现代化研究, 2014, 35(4):453-459.
- [11] 荣连伟, 师学义, 李炳意, 等. 黄土山丘区农村居民点类型划分与优化策略 [J]. 水土保持研究, 2016, 23(6):271-277.
- [12] 郑文升, 姜玉培, 罗静, 等. 平原水乡乡村聚落空间分布规律与格局优化 [J]. 经济地理, 2014, 34(11):120-127.
- [13] 李冬梅, 王冬艳, 李红, 等. 吉中低山丘陵区农村居民点时空演变 [J]. 经济地理, 2016, 36(5):143-151.
- [14] 任国平, 刘黎明, 付永虎, 等. 都市郊区乡村聚落景观格局特征及影响因素分析 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(2):220-229.
- [15] 陈永林, 谢炳庚. 江南丘陵区乡村聚落空间演化及重构: 以赣南地区为例 [J]. 地理研究, 2016, 35(1):184-194.
- [16] 宋开山, 刘殿伟, 王宗明, 等. 1954 年以来三江平原土地利用变化及驱动力 [J]. 地理学报, 2008, 63(1):93-104.
- [17] 鄂施璇, 雷国平, 宋戈. 松嫩平原粮食主产区农村居民点格局及影响因素分析 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(18):234-240.
- [18] 王曼曼, 吴秀芹, 吴斌, 等. 盐池北部风沙区乡村聚落空间格局演变分析 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(8):260-270.
- [19] 边静, 何多兴, 田永中. 基于信息熵与空间洛伦兹曲线的土地利用空间结构分析: 以重庆市合川区为例 [J]. 水土保持研究, 2011, 18(5):201-211.
- [20] 李寿国, 石培基, 刘春芳. 黄土丘陵区乡村聚落时空演变特征及格局优化: 以七里河区为例 [J]. 经济地理, 2015, 35(1):126-133.
- [21] 张珂, 赵耀龙, 付迎春, 等. 滇池流域 1974—2008 年土地利用的分形动态 [J]. 资源科学, 2013, 35(1):232-239.
- [22] 杨忍, 刘彦随, 龙花楼, 等. 基于格网的农村居民点用地时空特征及空间指向性的地理要素识别: 以环渤海地区为例 [J]. 地理研究, 2015, 34(6):1077-1087.
- [23] 龙花楼, 李裕瑞, 刘彦随. 中国空心化村庄演化特征及其动力机制 [J]. 地理学报, 2009, 64(10):1203-1213.