

张余,张克存,孟宪红,等,2019. 高寒草地沙化过程的气候因子分析[J]. 高原气象,38(1): 187-195. Zhang Yu, Zhang Kechun, Meng Xianhong, et al, 2019. Climatic factors of desertification process in alpine meadow[J]. Plateau Meteorology, 38(1): 187-195. DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2018. 00111.

高寒草地沙化过程的气候因子分析

张余^{1,2}, 张克存¹, 孟宪红¹, 安志山¹

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 利用高寒地区 2000、2005、2010 和 2016 年植被的 NDVI 和 1971-2016 年的气象要素数据, 分析了高寒草地沙化的主要气候驱动因子和机制。结果表明: (1) 2000-2016 年, NDVI 呈现先增加后减小的变化趋势。中北部 NDVI 值最先开始减小, 并逐渐向川西北扩张。(2) 20 世纪 90 年代开始, 研究区气温逐年上升, 2000 年以后增温趋势尤为显著。降水量逐年趋于减小, 未发生显著变化, 降水主要集中在夏季, 日照时数呈减小趋势。21 世纪以来, 中北部平均风速呈增加趋势。(3) 对 NDVI 解释力最大的因子是气温和降水, 但随着时间推移, 日照时数和风速的解释力逐渐增强。因子交互结果均表现为双因子增强或非线性增强, 彼此之间的综合作用对沙化进程的影响较大。(4) 玛曲和若尔盖多大风和沙尘暴天气, 玛曲近 3 年的合成输沙方向均为 SSE, 属于低风能环境, 风向变率为中比率, 高风速级的输沙势占比有所增加, 风沙活动强度自西北向东南方向增强。综合来看, 气温升高和降水减少是草地沙化的主导因子, 日照时数影响草地植被的生长, 风速、风向决定了沙化速率和蔓延方向。

关键词: 草地沙化; 气候变化; 植被指数

文章编号: 1000-0534(2019) 01-0187-09 **中图分类号:** K903 **文献标志码:** A

DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2018. 00111

1 引言

近年来, 由于温室气体的增加导致全球气候变暖已成为不可争辩的事实(Oreskes, 2004)。在这种大环境下, 气候变化对区域自然环境的影响逐渐成为生态、水文、大气等学科的研究热点。有“世界屋脊”之称的青藏高原, 其草地生态系统在全球变化研究中具有特殊的地位, 对草地状况的研究是反映生态系统演变的重要内容, 具有重要的意义。20 世纪 50 年代以来气温每 10 年升高 0.32℃(郑然等, 2015), 退化草地面积比例由 80 年代后期的 44.43% 增加到 2000 以来的 49.05%, 1966-2006 年青藏高原东缘的若尔盖盆地土地沙化增长速率为 3.44%, 尤其是 1966-1977 年, 增长速率达 7.43%(于惠, 2013; 白军红等, 2008; 董治宝等, 2012)。可见, 青藏高原高寒草地生态系统对气候变化极其敏

感, 同时加上人为干扰(王长顺等, 2013; 王文丽等, 2008; 汪晓菲等, 2015), 导致该地区草地生产力开始衰退, 景观破碎化程度加剧, 水土流失、沙化等问题日益严重。

对此, 国内很多学者利用遥感卫星, 对青藏高原草地生态系统(于惠, 2013; 王长顺等, 2013)、三江源区植被变化(魏占雄等, 2011; 康悦等, 2011; 钱拴等, 2010)以及若尔盖高原景观格局(白军红等, 2008; 严晓瑜, 2008)与气候变化的关系进行了许多探索性研究。实地观测和模型预测结果均表明, 青藏高原生态系统对气温升高的响应较其他气候因子更为敏感(Qin et al, 2014), 在利用 OTC 装置模拟增温状况下, 增温会导致高寒地区植物群落生物多样性指数下降, 显著影响了高寒草地的植物群落物种组成和多样性(Wang et al, 2012; 徐振锋等, 2009; Klein et al, 2004)。研究表明青藏高

收稿日期: 2018-06-25; 定稿日期: 2018-09-28

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0504801); 国家自然科学基金项目(41871016)

作者简介: 张余(1993-), 男, 陕西宝鸡人, 硕士研究生, 主要从事风沙地貌研究。E-mail: sxbjqzy@126.com

通信作者: 张克存(1978-), 男, 甘肃民勤人, 研究员, 主要从事风沙工程与风沙灾害研究。E-mail: kecunzh@lzb.ac.cn

原地区植被覆盖呈整体改善而局部退化趋势(张戈丽等, 2010; 梁四海等, 2007), 物候表现为返春期提前、枯黄期推迟、生长季延长的趋势(宋春桥等, 2011; 李红梅等, 2010), 且不同季节增温对物候的影响存在差异(Piao et al, 2011)。谢欣汝等(2018)通过分析近 10 年空气温度和湿度的变化特征表明, 随着气温的持续增加, 外界向青藏高原提供的水汽反而减小, 导致地表相对湿度呈现减小的趋势, 从而影响了高寒草地植被的生长。另有研究表明, 影响高寒草原植物生长发育的土壤碳氮比主要受年均日照时数、年均气温、积温等的影响, 且呈现出极显著相关关系(王健林等, 2014)。此外, 许多研究分析对比了自然和人为因子对高寒草地沙化的驱动力大小和影响排序(王辉, 2007; 陈文业等, 2013), 结果均表明气候变暖的异常扰动是诱导因素, 超载过牧是强化因素, 两者共同作用于草地植被而引起沙化过程的发生发展。其次, 由于高寒草地地处西风带, 具有高效扬沙机制(梁玉祥等, 2007), 以风力为主促进的流沙蔓延、沙丘移动等沙化过程已成为一种新的退化方式, 其影响程度逐年加剧(薛嫻等, 2007; 汪晓菲等, 2015), 尤其是冬、夏季风的年际、年代际变化均呈上升趋势, 且夏季风增强的趋势更为显著(周娟等, 2017)。鉴于此, 为全面深入了解近五十年来甘南与川西北气候变化特征及其对高寒草地沙化的影响, 本文从时间和空间两个方面探讨了其对气候变化的响应过程, 旨在揭示高寒草地沙化过程和机理, 为维护草地生态系统的稳定和制定合理的修复措施提供理论依据。

2 研究区概况

研究区以高寒草地沙化区(川西北和甘南)为例, 该区位于青藏高原东部边缘(101.42°E–102.58°E, 32.54°N–35.00°N), 是第四纪隆起中的一个相对沉降区(图 1)。四周被环山包围的丘状高原, 平均海拔 3 700 m 以上, 区内主要地貌类型为低山、丘陵、河谷和阶地等, 素有“川西北高原的绿洲”之称, 是我国三大湿地之一。同时也是长江、黄河上游重要的水源涵养区。气候属于高原寒温带湿润季风气候, 年平均气温 0~2 °C, 有逐年增加之势, 年均降水量 647.76 mm。土地以沼泽土为主, 潜育化程度高, 部分地区分布大量泥炭。主要植被为亚高山草甸和沼泽草地, 山地周围分布有灌木林和冷杉林。

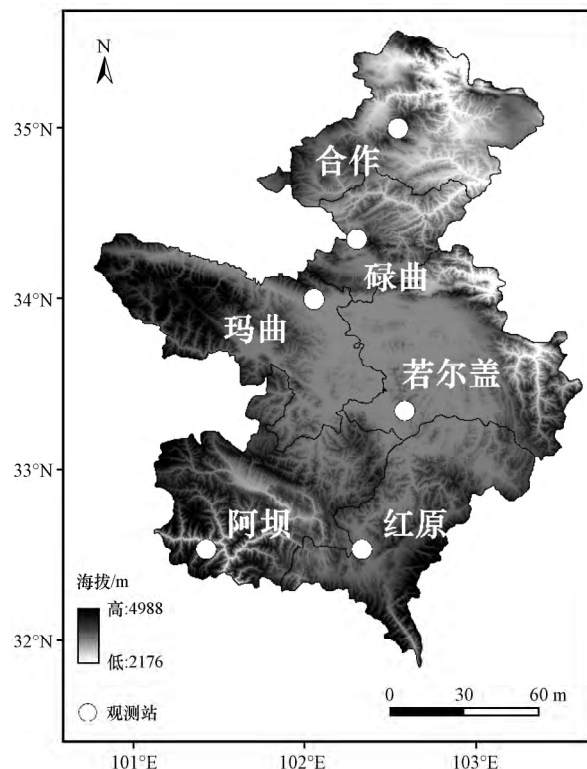


图 1 研究区气象站点分布

Fig. 1 The distribution of meteorological stations in study area

3 资料与方法

3.1 数据来源与处理

选取甘南、川西北境内的合作、玛曲、碌曲、若尔盖、红原、阿坝 6 个气象站多年气象资料进行分析。气温、降水和日照时数资料来源中国气象局气象数据中心(<http://data.cma.cn/>), 干旱、大风和沙尘暴日数和风速资料来自当地气象站实测数据。为了深入分析研究区风沙动力环境, 输沙势计算使用 2014–2016 年中国科学院西北生态环境资源研究院若尔盖高原湿地生态系统研究站高精度的定位风况资料。遥感和 DEM 数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(<http://www.gscloud.cn>), NDVI 数据选用 MODND1M 月合成数据, 该数据取月内每天最大值, 经过水、云、重气溶胶以及云阴影掩膜处理的双向大气校正表面反射率计算得到。

3.2 研究方法

输沙势(DP) 又称输沙风能, 是表征风沙活动强弱的参数, 它反映了一定时间内风力搬运沙的能力(丁国栋, 2010), 通常采用 Fryberger(1979) 的计算方法:

$$DP = V^2(V - V_t) t, \quad (1)$$

式中: DP 为输沙势(单位: VU); V 为大于 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的起沙风速(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); V_t 为起动风速(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); t 为起沙风作用时间,一般以频率表示。

合成输沙势(RDP) 是各个方向输沙势的矢量合成,合成输沙方向(RDD) 为合成输沙势的方向, RDP/DP 表示风向变率, $0.0 \sim 0.3$ 为小比率, $0.3 \sim 0.8$ 为中比率,大于 0.8 为大比率。用 Man-Kendall 方法进行气候跃变检验(魏凤英, 1999),采用线性回归方法分析 1971-2016 年气候变化趋势。

为了进一步定量分析主导高寒草地沙化的驱动因子,利用地理探测器模型能有效探测各因子对因变量的贡献率,同时可以分析多因子的交互作用

(Wang et al, 2010)。本文基于“因子探测器”和“交互作用探测器”来研究高寒地区各气象要素对 NDVI 的影响程度,具体计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (2)$$

式中: q 为某因子对因变量空间分布的解释力程度; h 为因子的分类或分区; N_h 和 N 分别为子区域和总区域的样本数; σ_h^2 和 σ^2 分别是子区域和总区域的离散方差。

交互作用探测器用于评估因子之间共同作用时是否会增强或减弱对因变量的解释程度。交互类型可分为以下几类,如表 1 所列。

表 1 两个因子对因变量交互作用类型

Table 1 Types of interaction between two covariates

交互作用	判据
非线性减弱	$q(X1 \cap X2) < \min[q(X1), q(X2)]$
单因子非线性减弱	$\min[q(X1), q(X2)] < q(X1 \cap X2) < \max[q(X1), q(X2)]$
双因子增强	$q(X1 \cap X2) > \max[q(X1), q(X2)]$
独立	$q(X1 \cap X2) = q(X1) + q(X2)$
非线性增强	$q(X1 \cap X2) > q(X1) + q(X2)$

4 结果与分析

4.1 植被状况的时空分布特点

为保证遥感信息的可比性,选取 2000、2005、2010 和 2016 年 5 月(植物生长季)的 NDVI 数据(图 2)。从图 2 中可以看出,2000-2005 年,研究区植被覆盖状况明显好转,NDVI 值介于 $0.5 \sim 1.0$ 的植被面积大幅度增加;2005-2010 年,研究区中部

和北部以及玛曲西部高海拔部分地区 NDVI 值减小至 $0.4 \sim 0.5$,整体植被状况未发生较大的变化;2010-2016 年植被状况开始恶化,其覆盖程度大范围缩减,中北部 NDVI 值减小至 $0.3 \sim 0.4$,大于 0.5 的区域也仅集中分布在中部和南部的行政交界附近以及若尔盖东部边缘地带。空间上,NDVI 小于 0.2 的玛曲西部、阿坝西部和红原东南部主要是高山积雪,合作北部为裸露山地,若尔盖西北和玛

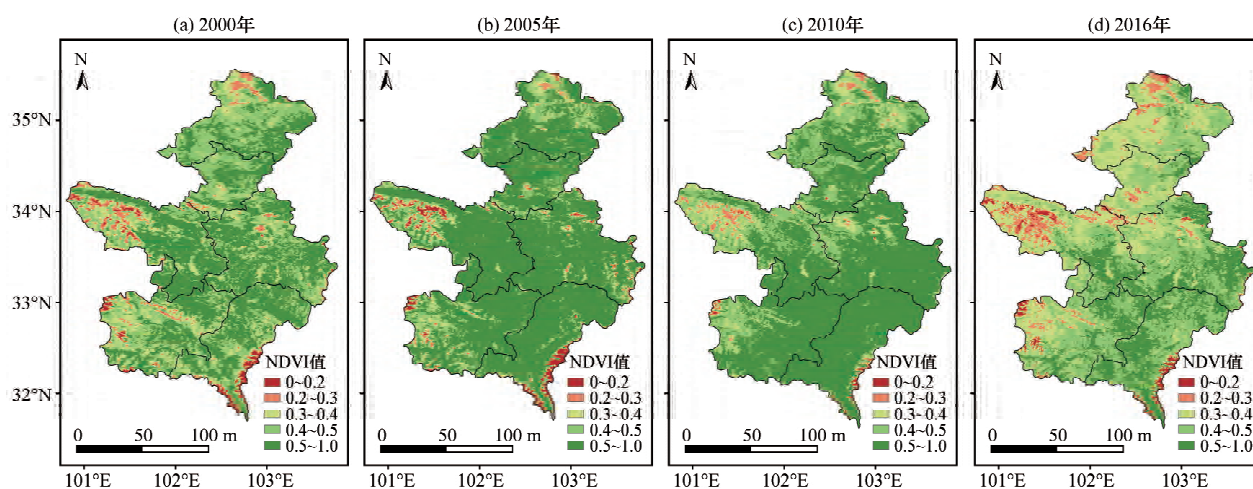


图 2 研究区 NDVI 指数年际变化

Fig. 2 Spatial pattern of NDVI in 2000-2016

曲东南方位为破碎化沙地。NDVI 介于 0.2~0.3 之间,海拔在 3 000~3 500 m 的中部地区主要是潜在沙化的草地。并且,通过实地调查发现,这种斑块状沙地在若尔盖和红原交界处也有零散的分布,主要沿河流、沼泽边缘地带。

4.2 气候变化的线性趋势分析

利用甘南、川西北草原 1971-2016 年逐年气象要素统计出该区域气温、降水、平均风速的年际变化趋势(图 3)。从图 3 中可以看出,各地区年平均气温均呈上升趋势,不同年代之间气温增幅不同。20 世纪 80 年代平均气温比 70 年代增加了 0.15℃,90 年代比 80 年代增加 0.37℃,2000 年以后气温增幅最大,比 90 年代高出 0.68℃;合作在 20 世纪 70-80 年代、80-90 年代以及 20 世纪 90 年代至 21

世纪 00 年代气温增幅分别为 0.21℃、0.53℃和 0.52℃;红原分别为 0.2℃、0.31℃和 0.65℃;玛曲为 0.19℃、0.25℃和 0.97℃,该站点气温增加主要是因为平均最低气温的上升,从 20 世纪 70 年代的-5.06℃增加至 21 世纪 00 年代的-3.23℃,平均最高气温增幅较小。综合来看,甘南、川西北草原气温的变化趋势同全球气候变暖趋势相一致,增温主要集中在 20 世纪 90 年代中后期,尤其是 2000 年以后,气温进入快速增加阶段,各季节气温明显增加。气温的年代际变化与草地沙化进程具有同期相似性,结合若尔盖高原草地沙化面积监测结果显示(雍国伟等,2003;游宇驰等,2017),空间上也具有较高一致性,表现为增幅越大的区域,草地沙化越严重。

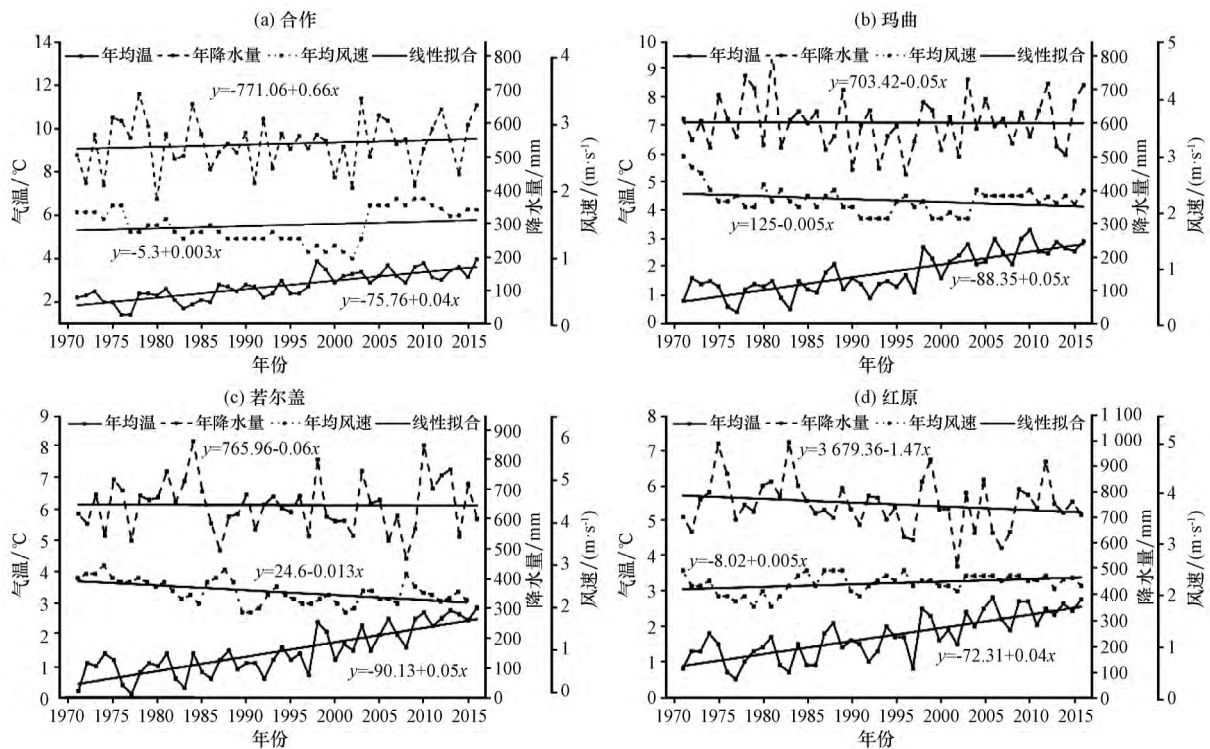


图 3 1971-2016 年高寒草地气温、降水、风速年代际变化

Fig. 3 Decadal variation of air temperature and precipitation and wind velocity in alpine grasslands from 1971 to 2016

研究区北部年降水量表现为增加趋势,中部和南部呈现减小趋势,且南部的减小率远大于中部。若尔盖年际降水量波动较大,特别是 20 世纪 80 年代,降水的分配极不均匀,1984 年降水量达到 862.9 mm,而 1987 年仅有 494.4 mm,20 世纪 90 年代的降水量变化较为平稳,21 世纪以来,降水量变化分为两个阶段,2000-2008 年降水量先增加后减小至最低值 464.8 mm,2010 年增加至最大值后又开始减小;玛曲各年代平均降水量均小于若尔

盖,年间降水量差异大(图 3),20 世纪 90 年代降水量最少,牧草生长期(4-9 月)降水占全年降水的 87.3%;合作各年代平均降水量均小于 550 mm,最小值仅 374 mm;红原由于受季风气候和周边高山影响,各年代平均降水量均大于 700 mm,80 年代出现最大降水 996.3 mm,年降水量的线性递减率最大,为 $-1.47 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。可见,研究区中部年间降水波动大,年内降水的分配也极不均衡,这容易破坏表层土壤结构,形成“板结”引起土壤渗透性下

降,造成地表径流的输沙能力增大,促进草地沙化。

根据数据统计可知,研究区较大风速主要集中在 1-5 月,各地区平均风速变化趋势有较大差异。北部年均风速较低,为 $1.42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,多西北偏北风,减小率为每 10 年 $0.025 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,2002 年之后,风速开始增加,增加率为 $0.03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,极大风速可达 $22.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;中部若尔盖和玛曲的平均风速大于北部地区,分别为 2.32 和 $2.13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,2005 年之后,风速同样呈现增加的趋势,极大风速值高达 $36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,风向多以西北为主;南部红原一线平均风速 $2.31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,20 世纪 80-90 年代,风速呈现先增加后减小的趋势,本世纪风速变化较为平稳,没有较大起伏,多西南风。综合来看,玛曲和若尔盖

的风力较为强劲,而沙丘集中分布在中北部相对低海拔地区(魏振海等,2009),在强风作用下这些积沙会发生移动,形成的风沙流会侵蚀地表,从而加速了草地沙化过程。

4.3 气候跃变检验

采用 Mann-Kendall 方法对合作、若尔盖和玛曲地区的气温、降水以及日照时数进行跃变检验,可以更直观的看出气候因子的年代际变化规律(图 4)。合作[图 4(a)]气温 UF 曲线在 1997 年之后超过+1.96 信度线,与 UB 曲线相交于 1996 年,交点位于信度线之间,跃变开始。降水量 UF 曲线介于信度线之间,在 0 刻度线上下波动,未发生跃变。日照时数的 UF 和 UB 曲线有三个交点,介于信度线之间,跃变点需进一步检验。

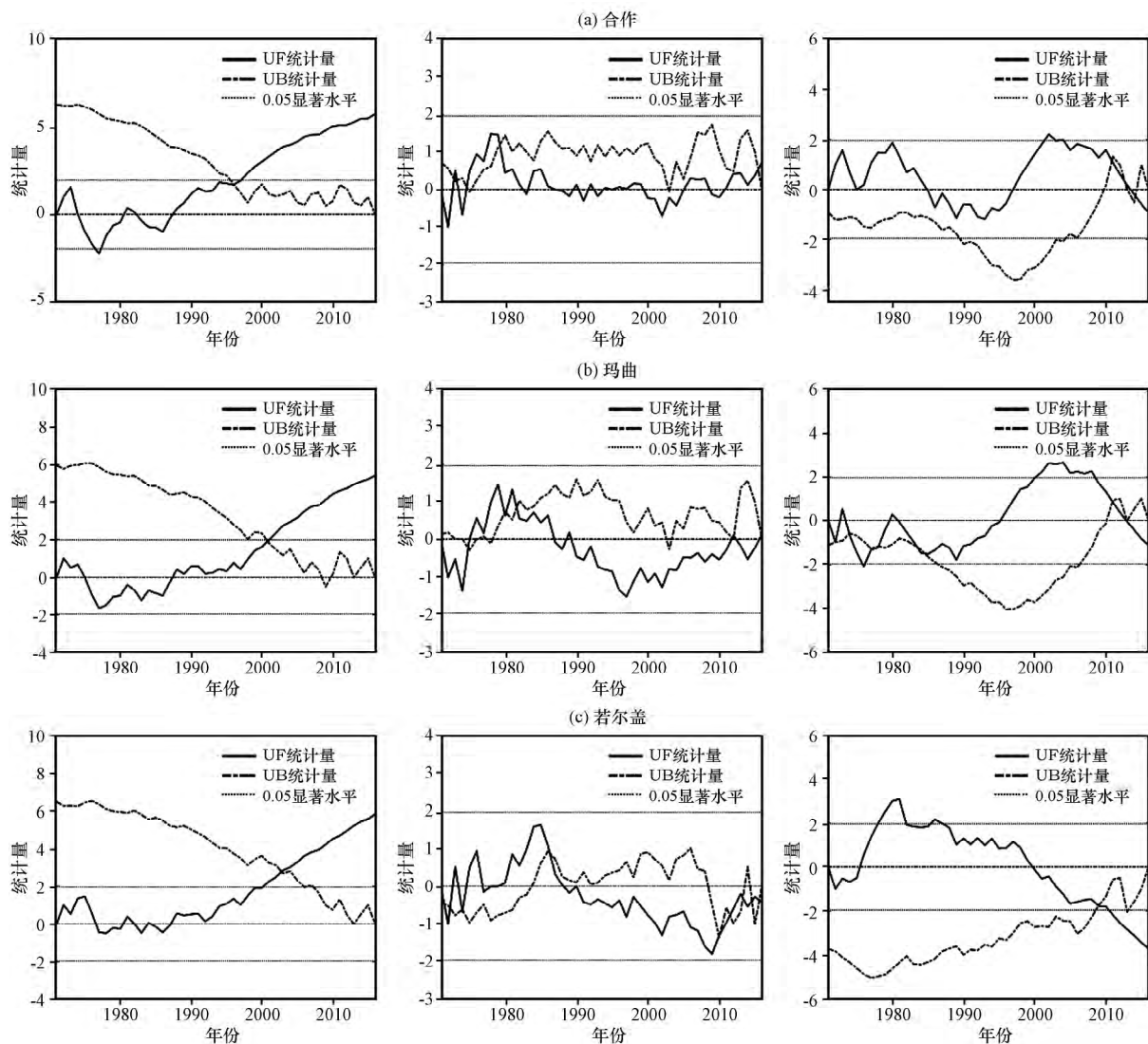


图 4 合作(a)、玛曲(b)、若尔盖(c)年均气温(左)、降水量(中)、日照时数(右) Mann-Kendall 检验

Fig. 4 Average annual air temperature (left), precipitation (medium) and sunshine hours (right) by using Mann-Kendall Method in Hezuo (a), Zoige (b) and Maqu (c)

玛曲地区[图4(b)]气温的UF曲线在1975–1987年小于0,之后大于0,年均温由下降趋势转变为上升趋势,UF曲线在2001年超过+1.96信度线,两条曲线相交于信度线之间,交点是2000年,为气温跃变的开始。20世纪90年代以后,玛曲地区降水量逐年下降,在0.05的显著性水平下未发生跃变。日照时数从1995年开始逐年上升,2000–2008年增加趋势显著,2013年开始呈减小趋势。

自20世纪90年代开始,若尔盖[图4(c)]气温UF>0,温度呈持续上升之势,在2000年超过+1.96信度线,表明气温在0.05的显著性水平下上升显著。1989–2016年若尔盖降水量UF值均小于0,表明近26年间该地区降水量持续下降,但80年代的降水量却处于上升趋势,两条曲线的交点较多,由于UF值未超过±1.96,说明在0.05的显著性水平下,若尔盖地区的降水量未发生跃变。1975–1981年若尔盖日照时数明显增加,尤其在1978–1982年UF值超过信度线,日照时数显著增加,之后到2000年间日照时数增长趋势变缓,2000年以后UF值小于0,日照时数减少,并在信度线内与UB曲线相交于2009年,表明跃变开始。

综合检验结果来看,本世纪以来,各地区气温上升趋势显著(UF>1.96),玛曲和若尔盖降水趋势均呈减小趋势,且以若尔盖的减小程度最大,这与草地沙化程度的空间分布一致,表现为气温上升趋势越显著、降水减小趋势越大的区域,沙化草地的分布面积越广,沙化更为严重,日照时数的检验结

果也佐证了这一变化。

4.4 地理探测器分析

因子探测器结果如表2所示,不同年份气象要素对高寒草地NDVI的解释程度不同,2000–2005年间,气温对NDVI的空间分布起着至关重要的作用。

表2 2000–2016年高寒草地NDVI的驱动因子探测

Table 2 Driving factor detection of NDVI in alpine meadow in 2000–2016

年份	NDVI的驱动因子探测/%			
	气温	降水	风速	日照时数
2000年	9.0	5.1	5.0	5.6
2005年	17.7	6.4	7.2	5.7
2010年	32.2	35.4	16.1	20.3
2016年	13.6	14.1	13.4	12.9

用,降水、风速和日照时数对NDVI的解释力较小;2010–2016年间,降水对NDVI的影响程度最大,其余因子同样有较强的解释力。由此可见,21世纪以来,随着时间推移,NDVI的主导因子也随之发生了变化,表现为由单因子气温主导向多因子综合主导变化的特点。

从2000–2016年间各因子交互对NDVI的解释力(表3)结果来看,各因子之间的交互作用均表现出双因子增强或非线性增强,彼此之间加强了对NDVI的解释力。同一时期内,降水、风速、日照时数三者之间的非线性增强贡献率是单个因子独立贡献率的2倍多,这是各因子综合作用于NDVI的结果。

表3 2000–2016年高寒草地NDVI的交互因子探测

Table 3 Interactive detection of NDVI in alpine meadow in 2000–2016

交互因子	2000年		2005年		2010年		2016年	
	q/%	类型	q/%	类型	q/%	类型	q/%	类型
气温∩降水	13.9	双因子增强	24.1	双因子增强	38.7	双因子增强	33.6	非线性增强
气温∩风速	11	双因子增强	21.3	双因子增强	40.1	双因子增强	29.1	非线性增强
气温∩日照时数	16.2	非线性增强	24	非线性增强	41.3	双因子增强	27.3	非线性增强
降水∩风速	12.5	非线性增强	21.3	非线性增强	41.4	双因子增强	30	非线性增强
降水∩日照时数	13	非线性增强	19.5	非线性增强	41.8	双因子增强	30.1	非线性增强
风速∩日照时数	12.5	非线性增强	12.1	双因子增强	35.9	双因子增强	26.6	非线性增强

综合单因子和交互因子探测结果,影响NDVI的主要因子是气温和降水,但风速和日照时数的影响也不容忽视,其交互效应对植被NDVI的影响不亚于气温和降水。

4.5 沙尘暴、大风日数与输沙势

沙尘暴是风动力环境与沙化生态环境的直接产

物,是一种灾害性天气,对自然环境和人类生存产生极大的危害。从沙尘暴和大风日数(日最大风速 $\geq 10.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 日数)的空间分布(图5)来看,甘南地区的年均沙尘暴日数大于川西北,其是玛曲,年均沙尘暴日数是红原的6.5倍,是若尔盖的3.2倍。然而,大风日数和沙尘暴日数在同一区域却表

现出不一致性,如玛曲大风日数和沙尘暴日数都较高,而红原一线年均大风日数达到 67.1 天,年均沙尘暴日数仅 1 天,原因在于形成沙尘暴需同时满足沙源、大风和不稳定空气层结这三个条件,红原地区虽多大风天气,但沙源较为匮乏,不足以形成沙尘暴。相比之下,若尔盖高原中北部集中分布有古风成沙丘,有着充足的沙源物质(徐刚等,2007; Yang et al, 2014),风沙活动更为剧烈。

玛曲县近 3 年的输沙势为例(图 6),输沙方向以 270° – 337.5° 和 0° – 45° 较为集中,即 NW 和 NNE 方向,其中仅 WNW 方向的输沙势比重占 25%~40.7%,输沙方向单一,合成输沙方向均为 SSE 方向,属于低风能环境,风向变率为中比率,风况以宽单峰型为主。2015 年大于 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速级的输沙势比重较 2014 年同风速级增加 15%,2016 年 $8 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速级输沙势比重比 2014 年

增加了近 6%。风沙活动强度呈现出自西北向东南增强的趋势。

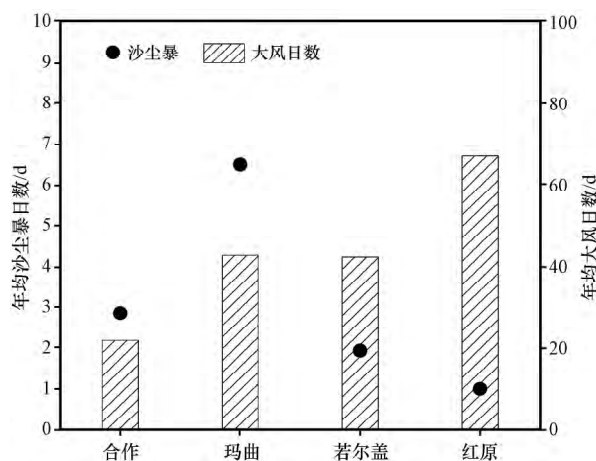


图 5 年均沙尘暴日数和大风日数分布

Fig. 5 The distribution of annual mean sandstorms and gale days

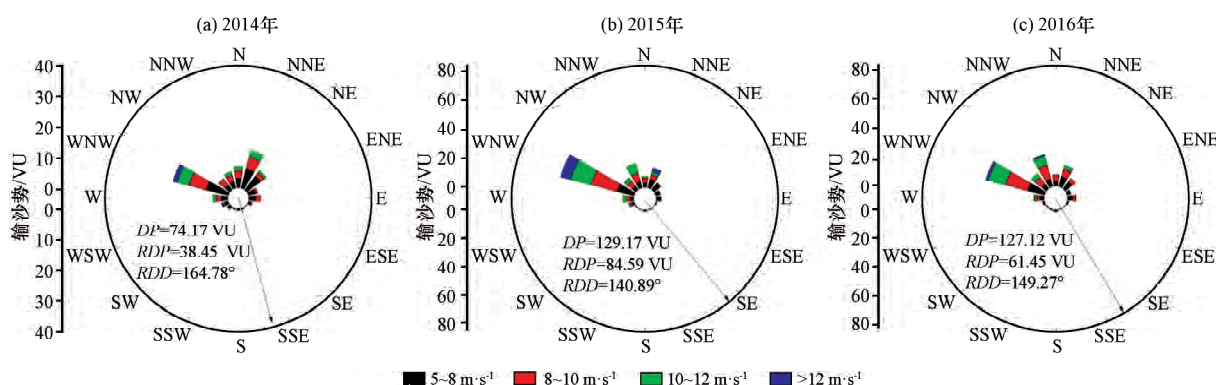


图 6 2014–2016 年玛曲县不同风速级输沙势

Fig. 6 The drift potential in Maqu from 2014 to 2016

5 讨论

遥感监测结果表明,1966 年,若尔盖、阿坝、红原及玛曲沙地和沙化草地共计 9016.2 hm^2 ,1999 年,达到 29898.0 hm^2 ,沙地面积增加了 331.6%,不包括 27052.0 hm^2 的潜在沙化土地(雍国伟等,2003)。2001–2011 年,当地政府加强了草地的管理,各种防沙治沙措施发挥了一定的效用,使得若尔盖高原的沙化扩张速率有所减缓(魏振海等,2010),2011–2016 年沙化面积再次趋于增加(游宇驰等,2017)。本研究对 NDVI 的监测同样证明了这一变化趋势。此外,基于气温和降水对草地变化的影响作为统计单元得出的结论分异性较大。有学者研究得出,长江黄河源区的高寒草地生态系统退化主要是气温引起的暖干化造成的(杜际增等,

2015),草地生产力和植物多样性显著受到温度变化影响(Xu et al, 2008; 李英年等,2010)。但也有学者通过分析 NDVI 与气温和降水的相关关系说明降水量的主导作用更大(刘正佳等,2015)。这种分歧主要受控于研究尺度和统计年限。根据本研究气象因子解释力的排序可知,2000–2016 年 NDVI 的主导因子由单因子转变为多因子。这一时间段内,气温增加、降水减少引起的表土干旱化,使得高含沙量的沙层逐渐裸露。同时,气温升高导致的冻土退化、热融沉陷、滑塌(薛娴等,2007; 李晓英等,2015)以及河流沼泽附近形成的新沙源地,在强风吹蚀作用下,会进一步蔓延,且其蔓延方向与年合成输沙方向一致,即重心向东南方向移动,魏振海等(2010)对不同期沙丘遥感解译的结果也证实了这一点。此外,根据跃变检验结果表明,自 2009 年

开始,沙化最严重的中部地区日照时数呈现减小趋势,此时,植被的生长状况逐渐恶化,日照时数对植被 NDVI 的贡献率也比 2005 年增加了 3.5 倍。可见,日照时数对植被的生长起着重要的作用。然而,王建兵等(2008)认为,气温升高、日照时间增加对放牧活动有利,会延长牲畜的采食时间,严重影响了产草量,从而导致草场退化,是一种间接的影响关系。关于日照时数和超载过牧之间的关系,还需进一步量化分析。

6 结论

(1) 21 世纪之后,NDVI 的变化趋势分为三个阶段:2000–2005 年 NDVI 值迅速增加阶段,2005–2010 年整体稳定阶段,2010–2016 年迅速减小阶段。

(2) 就空间尺度来说,甘南平均气温变化大于川西北,但小于阿坝地区,川西北降水量较大。从时间尺度分析,20 世纪 90 年代以后,气温逐年上升,并在 2000 年以后呈显著增加趋势。而降水量逐年趋于减小,未发生显著变化,降水主要集中在夏季。合作和玛曲的日照时数均在 20 世纪 90 年代中期开始增加,至 2013 年转变为减小趋势,若尔盖的日照时数在 2000 年开始减小,2009 年发生跃变。

(3) 2000–2016 年,随着时间的推移,影响 NDVI 的因子由单因子气温主导转变为多个气象因子主导,各因子的贡献率呈增加趋势。因子交互结果均为双因子增强或非线性增强,彼此之间的相互作用增大了对 NDVI 的解释力。

(4) 大风日数和沙尘暴次数多发生在玛曲和若尔盖地区,玛曲近 3 年的合成输沙方向均为 SSE,高风速级的输沙势占比重有所增加,风向变率为中比率,风况为宽单峰型,风沙活动重心向东南方向移动。

致谢:感谢中国科学院西北生态环境资源研究院若尔盖高原湿地生态系统研究站提供风况资料。

参考文献:

- Fryberger S G, 1979. Dune forms and wind regime [M] // McKee E D. A Study of Global Sand Seas. US Geological Survey Professional Paper, 137–169.
- Klein J A, Harte J, Zhao X Q, 2004. Experimental warming causes large and rapid species loss, dampened by simulated grazing, on the Tibetan Plateau [J]. *Ecology Letters*, 7(12): 1170–1179.
- Oreskes N, 2004. The scientific consensus on climate change [J]. *Science*, 306: 1689.
- Piao S L, Wang X H, Ciais P, et al, 2011. Changes in satellite-derived

vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006 [J]. *Global Change Biology*, 17(10): 3228–3239.

Qin D, Plattner G K, Tignor M, et al, 2014. Climate change 2013: The physical science basis [M]. Cambridge, UK, and New York, USA: Cambridge University Press.

Wang J F, Li X H, Christakos G, et al, 2010. Geographical Detectors—Based Health Risk Assessment and its Application in the Neural Tube Defects Study of the Heshun Region, China [J]. *International Journal of Geographical Information Science* 24, 107–127.

Wang S P, Duan J C, Xu G P, et al, 2012. Effects of warming and grazing on soil N availability, species composition and ANPP in alpine meadow [J]. *Ecology*, 93(11): 2365–2376.

Xu X K, Chen H, Levy J K, 2008. Spatiotemporal vegetation cover variations in the Qinghai-Tibet plateau under global climate change [J]. *Chinese Science Bulletin*, 53: 915–922.

Yang M, Wang S, Yao T, et al, 2014. Desertification and its relationship with permafrost degradation in Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 39(1): 47–53.

白军红, 欧阳华, 崔保山, 等, 2008. 近 40 年来若尔盖高原高寒湿地景观格局变化 [J]. *生态学报*, 28(5): 2245–2252.

陈文业, 张瑾, 戚登臣, 等, 2013. 黄河首曲—玛曲县高寒草甸沙化动态演变趋势及其驱动因子定量分析 [J]. *草业学报*, 22(2): 11–21.

丁国栋, 2010. 风沙物理学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 230–232.

董治宝, 胡光印, 颜长珍, 等, 2012. 江河源区沙漠化 [M]. 北京: 科学出版社, 136–138, 250.

杜际增, 王根绪, 李元寿, 2015. 近 45 年长江黄河源区高寒草地退化特征及成因分析 [J]. *草业学报*, 24(6): 5–15.

康悦, 李振朝, 田辉, 等, 2011. 黄河源区植被变化趋势及其对气候变化的响应过程研究 [J]. *气候与环境研究*, 16(4): 505–512.

李红梅, 马玉寿, 王彦龙, 2010. 气候变暖对青海高原地区植物物候期的影响 [J]. *应用气象学报*, 21(4): 500–505.

李晓英, 姚正毅, 王宏伟, 等, 2015. 若尔盖盆地沙漠化驱动机制 [J]. *中国沙漠*, 35(1): 51–59.

李英年, 薛晓娟, 王建雷, 等, 2010. 典型高寒植物生长繁殖特征对模拟气候变化的短期响应 [J]. *生态学杂志*, 29(4): 624–629.

梁四海, 陈江, 金晓媚, 等, 2007. 近 21 年青藏高原植被覆盖变化规律 [J]. *地球科学进展*, 22(1): 33–40.

梁玉祥, 易美桂, 楚可要, 等, 2007. 若尔盖地区湿地萎缩、草地退化沙化与北方沙尘干旱地区因果关系探索 [J]. *自然杂志*, 29(4): 233–238.

刘正佳, 邵全琴, 王丝丝, 2015. 21 世纪以来青藏高寒草地的变化特征及其对气候的响应 [J]. *干旱区地理*, 38(2): 275–282.

钱拴, 伏洋, Pan F F, 2010. 三江源地区生长季气候变化趋势及草地植被响应 [J]. *中国科学(地球科学)*, 40(10): 1439–1445.

宋春桥, 游松财, 柯灵红, 等, 2011. 藏北高原植被物候时空动态变化的遥感检测研究 [J]. *植物生态学报*, 35(8): 853–863.

汪晓菲, 何平, 康文星, 2015. 若尔盖县高原草地沙化成因分析 [J]. *中南林业科技大学学报*, 35(3): 100–106.

王辉, 2007. 玛曲高寒草甸沙化特征及沙化驱动机制研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 5–74.

王建兵, 王振国, 吕虹, 2008. 黄河重要水源补给区草地退化的气候

- 背景分析—以玛曲县为例[J]. 草业科学, 25(4): 23–27.
- 王健林, 钟志明, 王忠红, 等, 2014. 青藏高原高寒草原生态系统土壤碳氮比的分布特征[J]. 生态学报, 34(22): 6678–6691.
- 王文丽, 董治宝, 胡光印, 等, 2008. 若尔盖高原近 30 年沙地变化趋势分析[J]. 中国沙漠, 28(4): 617–621.
- 王长顺, 孟凡栋, 李新娥, 等, 2013. 青藏高原草地生态系统对气候变化的响应[J]. 生态学杂志, 32(6): 1587–1595.
- 魏凤英, 1999. 现代气候统计诊断预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 63–66.
- 魏占雄, 郭连云, 谢卫东, 2011. 三江源区高寒草地牧草生长季气候变化特征及其对牧草生育期长度的影响[J]. 水土保持研究, 18(4): 170–178.
- 魏振海, 董治宝, 胡光印, 等, 2009. 若尔盖盆地沙丘形成分布影响因素探讨[J]. 中国沙漠, 29(6): 1035–1042.
- 谢欣汝, 游庆龙, 林厚博, 2018. 近 10 年青藏高原中东部地表相对湿度减少成因分析[J]. 高原气象, 37(3): 642–650. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2017.00091.
- 徐刚, 赵志中, 王燕, 等, 2007. 川北若尔盖高原盆地沙漠化、岩漠化遥感动态监测研究[J]. 地质通报, 26(8): 1048–1055.
- 徐振锋, 胡廷兴, 李小艳, 等, 2009. 川西亚高山采伐迹地草坡群落对模拟增温的短期响应[J]. 生态学报, 29(6): 2899–2905.
- 薛娴, 郭坚, 张芳, 等, 2007. 高寒草甸地区沙漠化发展过程及成因分析—以黄河源区玛多县为例[J]. 中国沙漠, 27(5): 725–732.
- 严晓瑜, 2008. 不同时间尺度若尔盖湿地植被变化及其与气候的关系[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 1–93.
- 雍国伟, 石承苍, 岳鹏飞, 2003. 川西北高原若尔盖草地沙化及湿地萎缩动态遥感监测[J]. 山地学报, 21(6): 758–762.
- 游宇驰, 李志威, 黄吵, 等, 2017. 1990–2016 年若尔盖高原荒漠化时空变化分析[J]. 生态环境学报, 26(10): 1671–1680.
- 张戈丽, 欧阳华, 张宪洲, 等, 2010. 基于生态地理分区的青藏高原植被覆被变化及其对气候变化的响应[J]. 地理研究, 29(11): 2004–2016.
- 郑然, 李栋梁, 蒋元春, 等, 2015. 全球变暖背景下青藏高原气温变化的新特征[J]. 高原气象, 34(6): 1531–1539. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00123.
- 周娟, 文军, 王欣, 等, 2017. 青藏高原季风演变及其与土壤湿度的相关分析[J]. 高原气象, 36(1): 45–56. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2016.00003.
- 于惠, 2013. 青藏高原草地变化及其对气候的响应[D]. 兰州: 兰州大学, 1–102.

Climatic Factors of Desertification Process in Alpine Meadow

ZHANG Yu^{1,2}, ZHANG Kecun¹, MENG Xianhong¹, AN Zhishan¹

(1. Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Ecological-Environmental and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on indexes of NDVI and meteorological data in alpine meadow, the main climatic driving factors and mechanism of desertification in alpine meadow were studied. Results indicated as follows: (1) the value of NDVI presents a trend of increasing and then decreasing during 2000–2016, northern and middle of study area is first to decrease and gradually expended to northwest of Sichuan. (2) The air temperature is sustained warming since 1990s, and the upward trend is obvious after 2000. The general tendency of precipitation is decrease and chiefly concentrated in summer with no significant change, sunshine duration showed a downward trend. Annual average wind velocity showed an upward trend since 2000. (3) Air temperature and precipitation are the crucially influencing factors of NDVI, along with time-lapse, the explanatory power of sunshine duration and wind velocity are gradually increased. The interactive q values between two factors are higher than any q value of separated factors, and most of the interactive results belongs to bivariate enhancement or nonlinear enhancement, the interactive effect between each factor has great influence on the desertification process. (4) The gale and sandstorm occurred frequently in Zoige and Maqu, resultant sand transporting direction (RDD) was SSE with low wind energy environment and medium wind direction variability in Maqu during 2014–2016, the proportion of DP at high wind velocity level has increased, and the intensity of sand activity is enhanced from northwest to southeast. Consequently, rising temperature and decreasing precipitation are the dominant factors for meadow desertification, the growth of vegetation is affected by sunshine duration, and the desertification rate and spreading direction are determined by sand activity.

Key words: Meadow desertification; climate change; NDVI