

青藏高原植被对气候变化响应的研究进展

侯小丽^{1,2}, 张丽^{2,3}, 张炳华³, 周宇³, 梁勇⁴ (1. 山东农业大学林学院, 山东泰安 271018; 2. 海南省地球观测重点实验室, 海南三亚 572000; 3. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 数字地球重点实验室, 北京 100094; 4. 山东农业大学信息学院, 山东泰安 271018)

摘要 青藏高原作为全球气候变化的启动器和调节器, 在全球气候变化研究中备受关注。研究全球变暖背景下的青藏高原气候变化以及植被的响应特征, 对于推进该区域气候变化研究具有重要意义, 目前已有不少该方面的研究报道, 但大多局限于对个别气候因素或个别植被响应的描述, 缺乏对多种气候因素的综合概括和对植被响应区域差异方面的系统概括。该研究首先总结了青藏高原多个气候参数(气温、降水、积雪、日照辐射、水热通量等)的变化特征; 然后归纳了在气候变化背景下, 高原植被特征参数(绿度、物候、生产力、碳源/汇)对气候变化响应的规律; 最后针对4个环境脆弱区, 包括藏北、三江源、环青海湖、林芝, 进行了植被变化气候响应特征的讨论。基于以上概述, 分析了青藏高原植被气候变化响应研究方面存在的问题, 对未来的研究方向进行了展望。

关键词 高原植被系统; 植被绿度; 物候; 植被生产力; 碳源/汇; 蒸散发

中图分类号 S718.51+2 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2016)17-230-06

Research Progress in Responses of Vegetation Ecosystem to the Climate Change in Qinghai-Tibetan Plateau

HOU Xiao-li^{1,2}, ZHANG Li^{2,3}, ZHANG Bing-hua³ et al (1. Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018; 2. Key Laboratory for Earth Observation of Hainan Province, Sanya, Hainan 572000; 3. Key Laboratory of Digital Earth Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094)

Abstract As an important starter and adjuster of climate change, Qinghai-Tibetan Plateau has gained extensive attention. Under the context of global warming, study on the responses of vegetation ecosystem to climate change in Qinghai-Tibetan Plateau has significant implications for coping with climate change. Currently, there are numerous of studies on vegetation ecosystem and its response to climate change in Qinghai-Tibetan Plateau. However, they mainly focused on few climate factors, or the response of individual physiological process, which lacked the comprehensive knowledge of variations of climate factors and the different responses of vegetation to climate changes. In this research, we first demonstrated the variations and trends of climate factors in Qinghai-Tibetan Plateau, including temperature, precipitation, snow, solar radiation, water and heat fluxes. We then summarized the changes of the vegetation greenness, phenology, productivity, carbon sink/source, evapotranspiration under the impacts of climate changes. We finally discussed the vegetation variations in four hot spots, including the Northern Tibet, the Three Rivers Source, area around Qinghai Lake, and the Linzhi area. Based on the research above, the paper analyzed the existing limitations of the current study which Qinghai-Tibetan Plateau vegetation response to climate change, and made prospect for future research.

Key words Alpine vegetation system; Vegetation greenness; Phenology; Vegetation productivity; Carbon source/sink; Evapotranspiration

素有“世界第三极”之称的青藏高原是地球上海拔最高、面积最大、最年轻的高原, 占中国陆地总面积 26.8%^[1], 80% 以上的区域海拔大于 4 000 m, 具有独特的高原气候特点。高海拔环境和特殊生态环境要素共同对高原植被生态系统的结构功能产生显著的生态效应, 这使得高寒植被生态系统在极端的生态环境中对全球变化的响应更为敏感^[2-3]。青藏高原天然草地资源丰富, 草地覆盖面积可达 $14 \times 10^8 \text{ hm}^2$, 占青藏高原总面积的 60%^[4]。受西南季风和西风环流的强烈影响, 加上地貌类型复杂, 青藏高原植被表现出明显的水平分布规律和独特的垂直带性分布特征^[5]。高寒生态系统极大改变的同时也会通过影响气候变化、能量交换、水热通量等生态过程对全球气候产生影响。

在该地区开展气候变化研究对理解全球气候变化对植被的影响具有重要的作用。目前有关青藏高原气候和植被变化的综述, 多数是针对某一类气候因素对植被生理过程的影响或对某一区域的植被影响, 如王鸽等研究概括了气温和降水 2 个气候因子对植被的影响^[6-7], 武建双等^[8]概括了青藏高原局部地区——藏北地区生态系统的研究进展, 目前缺少对多种气候因素和植被响应较全面的归纳概述。笔者对

青藏高原 5 个主要气候因子的变化特征以及植被参数对气候变化响应的规律进行归纳, 并针对 4 个热点区域的植被变化特征进行讨论, 对于推进青藏高原气候变化和植被研究具有一定的参考价值。

1 气候特征及其变化

气候要素是表征某一特定地点和时段内的气候特征或状态参量, 具体包括气温、湿度、降水、日照、气压、风、云、雾以及具有能量意义的参量(如太阳辐射、地表蒸散发、大气稳定度、大气透明度等)。其中, 气温和降水是影响青藏高原植被生长的直接因素, 而日照辐射、地表蒸散发以及积雪融水又会通过对地表温度和水分的作用而对植被的生长产生间接影响。笔者选取对青藏高原植被影响比较大的气候要素, 包括气温、降水、积雪、日照辐射、水热通量进行讨论。

1.1 气温 地球的年均气温和地表温度在 19 世纪 80 年代开始呈现上升趋势, 而青藏高原气候变暖要早于全球气候变暖 30 a 左右, 且气温上升速率约为全球的 3 倍^[9]。青藏地区 20 世纪 20 年代为较暖期, 20~50 年代次之, 之后气温一直下降, 80 年代再度回升^[10], 直到 20 世纪末期达到近百年的最暖期^[11]。其中 1918 年和 1971 年前后为高原的“暖突变年”^[11-12]。青藏高原温度变化有一定的空间特征, 水平方向上从东南向西北逐渐由暖湿变为干冷, 北部的变暖幅度比南部大^[13], 西部比东部大, 且冬季变暖的趋势更加明显; 垂直方向上, 高海拔地区的气候变化幅度要大于低海拔地区, 变

基金项目 海南省科技合作专项资金项目(KJHZ2015-14); 国家自然科学基金项目(41271372)。

作者简介 侯小丽(1990-), 女, 山东莱芜人, 硕士研究生, 研究方向: 植被遥感应用。

收稿日期 2016-04-25

暖幅度随海拔升高而增大^[14],而温度变化与海拔之间是否存在线性关系尚存争议^[11]。总体而言,青藏高原温度变化的突出特征是变暖,出现了时间长度不等的冷、暖变化,但整体上呈波动上升趋势。

1.2 降水 19世纪80年代以来,青藏高原总体降水呈逐渐增加的趋势,同时也存在明显的地域性和季节性差异。对气象资料分析发现,19世纪70年代至今,青藏高原年降水整体趋于增加、大多数地区有变湿的趋势^[15],但年际变化率较小^[16],且季节降水变化也不同,春季增湿现象最显著,而夏季相对于其他季节有减湿现象^[17]。受到地形和季风的影响,降水又表现出明显的南北地域差异,北部降水呈明显增加趋势,南部有减小趋势,整体上西北仍比东南干^[18]。垂直方向上,以3 000 m海拔为界,海拔3 000 m以上青藏高原的西部有变干趋势,北部及南部有变湿趋势,3 000 m以下青藏高原的东南部地区有变干趋势^[19],可见在高原地区,干湿趋势随海拔变化也有差异。总体而言,高原西部和北部有暖湿趋势,而高原东部和南部降水虽有减少,但整体仍表现为暖湿。有学者对高原气候未来的变化趋势进行了预估,认为2000~2100年高原增温变湿的趋势显著^[15],如《青藏高原环境变化科学评估》^[20]报告的观点认为青藏高原近期(现今~2050年)和远期(2051~2100年)气候仍以变暖和变湿为主要特征。

1.3 积雪 较厚的积雪可以通过隔离土壤免受低温和寒风的作用而保护植被生长,也可以通过改变温度和植被的光合有效辐射强度来影响植被的返青期和物候变化。青藏高原的积雪面积以增加趋势为主,与北半球积雪面积减少趋势相反^[21-22]。总体上看,20世纪60年代中到80年代末随着温度的升高,降水增加,积雪面积明显增加^[23],90年代,当温度继续升高时,积雪面积又表现为减少趋势^[24]。

1.4 日照辐射 日照强度通过影响植被的光合有效辐射和土壤的热通量来影响植物的生长。由于青藏高原海拔较高,太阳辐射较强,长波辐射在地表辐射平衡中分量很重,日照时数高于全国平均水平。马耀明等^[25]发现青藏高原向下的太阳总辐射和净辐射比我国其他地区强,且夏季的净辐射通量、土壤热通量及潜热通量远大于冬季和春季,藏北地区各个辐射量的日变化都非常明显。高原生长季太阳总辐射虽然强,但其中的光合有效辐射所占比例并不比低海拔地区高^[26],19世纪70年代末期至2006年,青藏高原地区日照辐射有由强变弱的趋势^[27],对植物的光合作用强弱和地表的热通量产生了影响。

1.5 水热通量 水通量与植被生态系统的蒸散量有密切关系,而蒸散量是表征陆地生态系统水分状况的重要指标,是水循环过程中的重要因子,实际蒸散和潜在蒸散受降水、气温、下垫面、太阳辐射、风速等因子的综合影响,增温趋势下,降水量增加有助于加大蒸散量。近年来研究发现青藏高原整体表现为实际蒸散量增加,潜在蒸散量减少。尹云鹤等^[28]利用遥感数据和LPJ模型对青藏高原实际蒸散量进行模拟,发现在1981~2010年间青藏高原的实际蒸散受降水

增加的影响,整体呈增加趋势,并且发现潜在蒸散变化的区域差异呈西北增加、东南减少的特征。整个青藏高原约有75%的地区在1961~2006年间显示潜在蒸散量减少趋势^[29],特别是2000年以前减少趋势显著,其中以2003~2011年海北地区蒸散量的季节变化最为明显^[30]。

热通量反映生态系统获得能量的强弱以及生态区域温度的变化特征和气候特征。高原热源受到下垫面的影响发生变化,进而导致区域气候的变化。热通量在地表具有水平空间分布的差异,研究表明,青藏高原春季地一气温差分布呈“南高北低”的特征,而干旱年间,热通量的分布为“北高南低”^[31]。早在20世纪50年代,就有针对青藏高原上空的热力结构对大气环流的影响研究,分析得出夏季高原上空表现为热源^[32]。时间序列上,大气热量源汇年均值在20世纪60年代呈下降趋势,70年代表现为上升^[33],而70年代为青藏高原热源的高值区^[34],80年代为低值区,90年代又有所回升,这与青海省的云雨状况和全球火山喷发事件有关系。

2 植被对气候变化的响应

由于青藏高原特殊的地理位置、寒冷干旱的气候特点以及高寒植被的脆弱性等,使得该区域植被对气候影响比较敏感,易受到外界因素的干扰而引起植被功能如绿度、物候、生产力等不同程度的变化。在青藏高原地区,气候因素和植被的主要关系如图1所示。

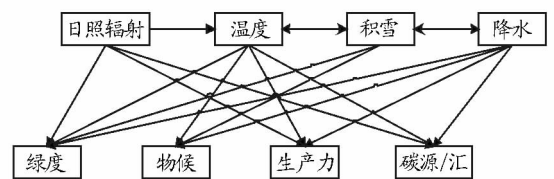


图1 气候因素和植被的关系

Fig. 1 Relationships between climatic factors and vegetation parameters

2.1 植被绿度 植被绿度与覆盖度有直接关系,可表征植被的生长状况,植被覆盖度越高,其长势越好。19世纪80年代至今青藏高原植被覆盖度总体呈现变好的趋势^[35],但局部呈退化趋势^[36]。其中,植被状况相对较好的南部地区植被覆盖度增加不太明显,而植被较差的中、北部地区植被覆盖度增加较显著。青藏高原植被变化在水平方向上存在明显异质性,表现在青藏高原东南部与西北部的植被覆盖度变化差异上。Zhang等^[37]利用GIMMS遥感数据,发现1982~2006年青藏高原植被绿度对增温有积极响应,18%的植被区域有增加趋势,东部和西南部在时间顺序上最先表现为增加趋势。Li等^[38]利用分段线性方法对1982~2006年的AVHRR NDVI数据进行分析,以1989年为分界点,1982~1989年间增加趋势主要发生在青藏高原的中部、西南部、东北部,减少趋势发生在东南部;而1990~2006年间增加趋势主要发生在青藏高原的北部和东部,减少趋势发生在中部、西北部以及东南部。植被覆盖度变化的空间异质性不仅表现在水平方向上,还表现在垂直方向上,如较低海拔(4 400~4 600 m)的高寒草甸与高寒沼泽草甸地带植被退化最为

强烈,而较高海拔(4 600~4 800 m)地区植被退化程度最小,植被覆盖面积最大^[39]。

植被覆盖度变化的差异除了表现在空间上,还表现在季节变化差异和不同植被群落中。季节变化方面,多数研究认为春夏两季 NDVI 显著增加^[35-40],增加量和增加率最大的季节为春季。植被覆盖度的变化趋势因植被类型的不同也略有差异,除针叶林、阔叶林受采伐影响覆盖度下降外,其他植被覆盖度均呈不同程度的上升趋势^[41];不同植被类型对水热条件的响应程度也存在差异,敏感程度由高到低依次是草甸、草原、灌丛、高寒垫状植被,最后是森林^[42]。

相对于我国其他地区而言,青藏高原植被对气候变化的响应最为明显^[2]。多数研究认为,降水是决定高原地区植被覆盖整体变化的重要因素之一^[43-44],尤其是拉萨地区^[45]和青藏高原东北部地区^[46]。温度也会对高原地区植被变化产生影响,近年青藏高原草地植被活动明显增强,并且与温度上升密切相关^[35]。还有研究发现积雪也会影响植被的绿度,如 Wang 等^[47]利用 2001~2010 年 MODIS 数据发现青藏高原积雪覆盖的时间影响了植被的绿度,积雪融化的时间影响了植物的返青期。除降水和气温之外,还存在其他的气候影响因素,包括太阳辐射、热通量^[48]、水汽压、日照时间和风速^[49]等。人类活动也是影响植被变化的重要原因,过度放牧会导致草产量下降,加速草地的退化,如地处海拔 4 400~4 600 m 的高寒草甸与高寒沼泽草甸地带的退化与过度放牧相关性较大^[39];黄河源地区草地退化也与人类活动影响有关^[50]。

2.2 植被物候 物候期变化可能是生态系统中物种对于气候变化响应最直接的方式^[51]。青藏高原春季物候主要受温度的影响,变化趋势一般是提前的,随着不同物种和不同地区而不同^[52]。如 Yu 等^[53]发现返青期在 20 世纪 90 年代中期有提前现象,之后又表现为推迟,并且认为冬季升温可能是物候期提前的主要原因;Piao 等^[54]发现 1982~1999 年青藏高原的返青期有提前的趋势,而 1999~2006 年间返青期有推迟现象;Wang 等^[52]基于 MODIS 数据发现,青藏高原东部草原返青期提前,西部返青期延迟;Piao 等^[54]和 Liu 等^[55]研究发现青藏高原高海拔地区的草地春季物候对温度的响应比低海拔的草地更为敏感,且变化幅度也有地域性差异。多数研究表明返青期的变化与冬春两季温度和降水有关,也有研究认为春季降温是影响物候变化的原因^[54,56],还有研究认为冬春季降水的减少是影响物候变化的原因^[57]。Shen 等^[58]发现物候期的变化并不始终与冬季增温保持一致。目前对春季物候的变化特征以及响应因素尚未有一致的结论,仍需通过实测站点数据的支持和验证对物候变化开展进一步研究和探讨。

2.3 植被生产力 植被净初级生产力(NPP, Net Primary Production)是表征植被活动的关键变量,作为全球碳循环的重要组成部分,必然会对全球变化起到反馈作用。青藏高原地区植被 NPP 整体增加,其分布总体表现为自东南至西北递减,这与该地区的水热条件和植被类型的地带性分布规律一

致^[59]。张懿铨等^[60]基于遥感数据和站点数据通过 CASA 模型对 1982~2009 年青藏高原 NPP 进行估算,发现高寒草地 NPP 多年均值的空间分布表现为由东南向西北逐渐递减且呈波动上升的趋势;年均 NPP 增加面积比随着海拔升高呈现升高(海拔 3.5 km 以下)—稳定(海拔 3.5~6.0 km)—降低(海拔 6.0 km 以上)的特点,而降低面积比呈现降低(海拔 3.5 km 以下)—稳定(海拔 3.5~5.5 km)—升高(海拔 5.5 km 以上)的特点。孙云晓等^[62]也发现 1983~2012 年青藏高原 NPP 总量在时间上的波动呈现缓慢增加(1983~1992 年)—缓慢减少(1993~2002 年)—快速增加(2003~2012 年)的趋势。

影响植被生产力的因素主要为温度和降水。年均温度增加对 NPP 的变异有显著影响^[61];Xu 等^[62]研究发现增温在湿润区增加群落生物量,而在干旱区降低群落生物量。除了温度,降水也会对生产力产生很大影响,Yang 等^[63]和李晓东等^[64]认为生长季的降水量是影响植被生产力的主要因素。1990~2010 年间,高原由于受增温影响而增加的蒸散量,抵消甚至超过降水增加的速度,导致气候暖干化,使植被生长主要受到水分胁迫的影响,从而影响植被生产力。陈卓奇等^[65]研究发现降水在 450 mm 之内的区域,影响植被生产力的主要因素是降水,而在降水大于 450 mm 的地区,其主要影响因素是气温。Klein 等^[66]研究发现在青藏高原地区,如果降水量相对于温度只是较小幅度的增加,那么增温可能会降低生产力。

2.4 植被碳源/汇 在高纬度或高海拔地区,植物通常具有极高的根/茎比,其凋落物和地下死根等由于低温作用难以分解,植物通过光合作用所同化的有机碳可以较长时间地储存于地下根系和土壤中^[67]。因此,高寒地区的天然草地生态系统被认为可能是全球非常重要的碳汇^[68]。多数研究认为,由于气候变暖在一定程度上提高了高寒草地生态系统的植被初级生产力,从而补偿了气候变暖导致的土壤有机碳分解释放量,使青藏高原草地植被仍然发挥着碳汇的功能^[68-69]。张宪洲等^[68]对高原高山草地系统土壤呼吸进行测定,发现 1999~2001 年高山草地系统表现为碳汇;徐玲玲等^[69]对当雄草甸系统的研究表明,其具有碳吸收功能,潜能大小需要进一步研究;Wang 等^[70]对青藏高原土壤有机碳库的研究发现,1970~2000 年间高原草地约排放 3.02 PgC。但也有人认为增温可能会削弱高寒草地生态系统的碳汇潜能,如裴志永等^[71]认为,高寒草地土壤由于具有呼吸释放更大量 CO₂ 的潜力,加之土壤碳库对全球变暖较为敏感,因此当高寒草甸的固碳能力随温度升高而增大时,土壤呼吸和枯落物的分解速度也会相应加大,最终导致土壤碳库中的碳释放到大气中,增加碳的排放。也有研究认为高寒草地生态系统与大气间的净碳交换不一定会因增温而发生大的变化^[72],尽管增温和放牧对生长季生态系统平均呼吸速率的影响不大,但改变了其季节排放模式^[73],增温导致 NPP 增加的同时,也会提高土壤碳排放的速度,从而维持碳吸收和碳排放的平衡。目前增温对未来碳源/汇的影响尚未有一致结论。

影响碳循环的气候因子主要是温度,如 Chang 等^[74]发现高寒草甸碳循环过程对于温度变化的响应更为敏感;Lin 等^[73]认为生态系统的 CO₂ 排放量均表现为随温度升高而增加。也有人认为影响碳循环的主要因素是降水,如闫巍等^[75]对当雄 2003 ~ 2005 年间高寒草甸生态系统进行了研究,发现高寒草甸在生长季具有碳汇功能,且与降水呈正相

关;Peng 等^[76]发现,相对于温度而言,高寒草原碳循环过程对降水变化的响应更敏感。

3 热点区域对气候变化的响应研究

近年来,围绕一些环境脆弱和变化剧烈地区的研究日益增多,如三江源地区、藏北地区、环青海湖地区、林芝地区等(图2)。表1针对这些热点地区的植被生态系统响应特点

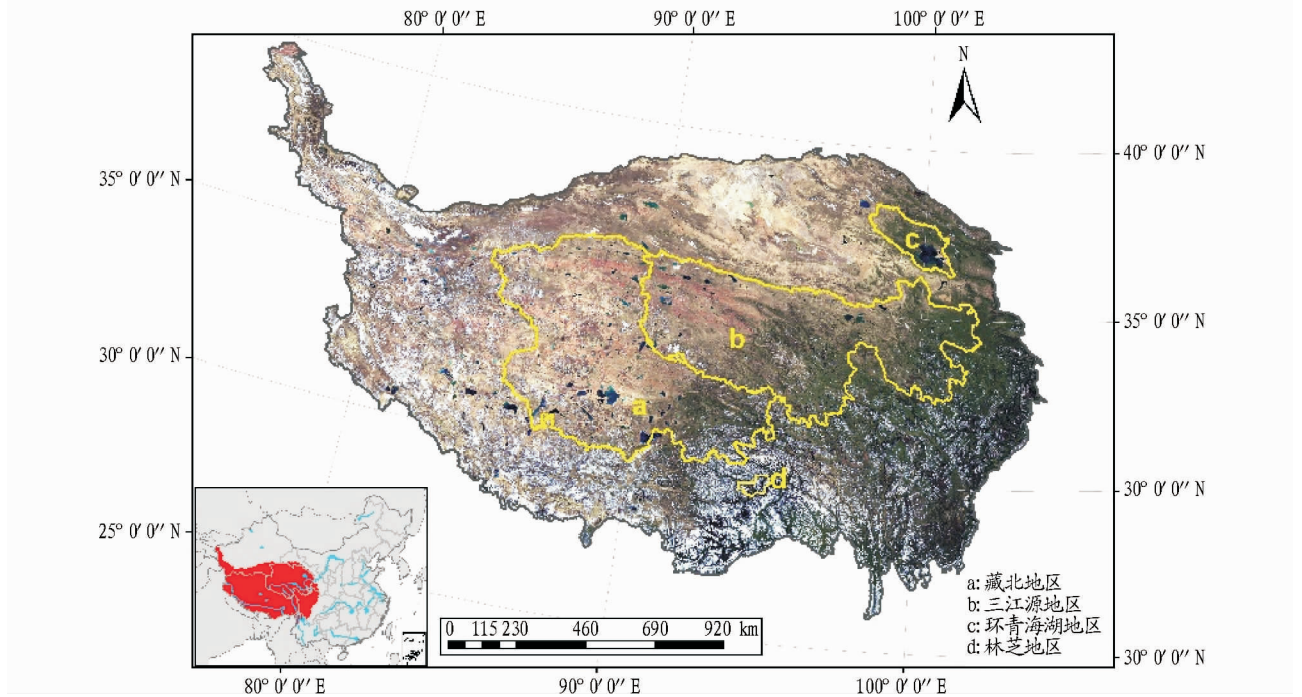


图2 青藏高原及热点研究区分布

Fig. 2 Locations of hot research area

表1 热点区域及其特点

Table 1 Hot research areas and their characteristics

热点区域 Hot research areas	区域特点 Regional characteristics	植被变化特征 Vegetation change characteristics	气候影响 Climatic influence	人类活动影响 Influence of human activities
藏北地区 Northern Tibet	我国主要江河源地	在冰川活跃区、人类活动较多的区域,植被总体退化显著	高寒地区的增温、降水在一定程度上对藏北植被生长有抑制作用;并且夏季高温也会对植被的生长起到抑制作用	过度放牧
三江源地区 The Three Rivers Source	地处青藏高原腹地	2000年前退化趋势明显,其中黄河源地区最为显著;2000年后植被生长有变好的趋势;有黑土滩景观	暖干化不利于植被生长,鼠虫危害、风水侵蚀对植被的危害较大	天然草地超载过牧是影响植被退化的重要因素;2000年后三江源自然保护区的建立缓解了三江源地区植被退化
环青海湖地区 Area around Qinghai Lake	环中国最大的内陆湖泊以及咸水湖	整体呈现轻微的退化趋势;有黑土滩景观	暖干化趋势,气候灾害日渐频繁,一定程度上引起植被退化	耕地、建设用地、面积逐渐增加,加剧了青海湖周围草地的退化、荒漠化、盐碱化
林芝地区 Linzhi Area	森林资源相当丰富,植被的垂直地带性完整	植被生长较好,植被覆盖度存在波动变化	增温有利于该地区植被的生长	尚未遭到人类活动的破坏性影响

及主导因素进行了概括。

3.1 藏北地区 藏北地区是我国主要江河源地^[69],该地区草地生态系统对全球气候变化有着独特的响应过程^[8]。近年来,针对藏北草地的研究多集中在草地生态系统退化的时空特征、驱动因素、发展趋势及恢复重建等方面。藏北地区严重退化的草原占该地区的8.0%,极度及重度退化草原占1.7%^[77]。藏北草地退化有一定的空间分布特征:中部、东部和北部的草地退化具有恶化趋势,在冰川雪山敏感区和人类

因素干扰较大的交通道路沿线退化现象相对严重^[78];海拔4 750 ~ 5 250 m 范围内草地退化趋势显著^[79]。

多数学者认为导致藏北草地退化的主要原因是自然因素和人类活动共同作用的结果^[80-81]。自然环境的变化是藏北草地退化的根本原因,而人为因素是退化产生空间差异的决定因素^[82]。气象因子对该地区草地的影响是复杂的,增温和降水虽然在一定程度上可以促进植被的生长,但在高寒地区降水也可能对植被的生长起到抑制作用,而夏季过高的

温度也会对植被生长起抑制作用^[83]。太阳辐射也是导致该地区草地退化的因素之一^[77]。针对藏北草地严重超载的现实,大多数学者都提出建立人工草地以解决草畜矛盾问题,有学者还提出“南草北调”^[84]措施,将南部优质的牧草运送到藏北,以缓解藏北牧区牧草供求紧张的关系。

3.2 三江源地区 地处青藏高原腹地的三江源,是高原的重要组成部分。针对三江源地区的研究主要集中在草地退化和生物多样性方面。20世纪60年代至20世纪末,三江源总体偏暖干化^[85],不利于植被生长,三江源地区的高寒草地退化显著^[86-87],土地荒漠化面积增加;其中,退化范围下降率最大的区域主要分布在黄河源,退化面积占三江源地区总面积的32.1%^[87]。研究发现,虽然三江源地区植被生长呈现退化趋势,但是近年来退化趋势有所缓解,部分地区植被退化情况有所遏制,特别是2000年后,三江源自然保护区的成立对缓解该地区植被退化的现象起到了积极作用^[88]。

除温度和降水外,由于天然草地超载过牧,鼠虫危害、风水侵蚀等自然和人为因素的影响,使三江源地区局部草地退化严重,形成严重威胁三江源区中下游生态安全的次生裸地黑土滩。韩立辉等^[89]对黑土滩的群落演替进行了研究,建议对黑土滩加强干扰来减弱次生毒杂草群落的稳定性,从而达到治理黑土滩的目的。

3.3 环青海湖地区 位于青海省西北部青海湖盆地内的青海湖,是中国最大的内陆湖泊以及咸水湖。由于受全球气候变化的影响,该地区气候有暖干化趋势,气候灾害日渐频繁,加上人类活动导致该地区的生态环境逐渐趋于恶化,导致草地退化、荒漠化、盐碱化加剧,对该地区的植被生态系统造成了很大的影响。胡梦珺等^[90]发现1976~2006年,青海湖地区土地沙漠化加重;1987~2004年,环青海湖地区牧草地上生物量、覆盖度下降,黑土滩面积不断扩大^[91];1999~2007年,青海湖地区的植被NDVI呈现减少的趋势^[92]。由于受气候变化的影响,青海湖区周围的土地覆盖类型发生了变化,1977~2010年,青海湖地区草地、林地、水体等面积总体减少^[93],耕地、建设用地、未利用地面积逐渐增加^[94]。然而近期研究发现,受气温暖湿化趋势、入湖径流增加以及人类生产活动的影响,青海湖的面积呈现上升趋势^[64,95],这可能会进一步引起周围植被生态系统的变化。

3.4 林芝地区(雅鲁藏布江流域) 位于青藏高原西南部雅鲁藏布江中下游的林芝地区,有“西藏江南”之称。森林资源丰富,林地和灌木林地面积、疏林地面积分别占西藏自治区的42.4%和34.0%^[96],且山地植被的垂直地带性完整^[97]。研究该地区对于保护该地区植被生态多样性有着重要的意义。有研究发现在增温的影响下该区域的植被整体变好,近年来林芝地区植被总体生长趋势较好,植被覆盖度呈现显著增加的趋势,尤其是夏季和秋季^[97]。1982~2010年,雅鲁藏布江流域草地NDVI年际变化呈现波动增长的趋势^[98],即先增加后减少的趋势^[99],中下游部分地区的草地覆盖未遭到破坏性影响^[100]。

基于以上对典型区域研究的归纳整理,发现4个热点区

域的共同点是近期的生态环境恶化问题都有所控制,植被退化现象有所缓解,甚至有好转的趋势。针对不同区域特有的环境问题,如藏北因牧区超载造成的草地退化、三江源的黑土滩等,应该采取更有针对性的措施加以保护和治理。

4 存在的问题与展望

众多研究分析了青藏高原植被对气候要素的响应,对推进该区域的气候研究具有重要意义。但是,由于青藏高原具有较复杂的陆气循环系统,应考虑多种气候因素对植被的综合影响,而不仅是将影响植被响应的因素简单归因于某一类或某两类气候因素,同时也要综合考虑高原植被变化与冰川、冻土、雪盖、湖泊以及人类活动方面的交互影响。目前,关于植被对气候响应特征的结论存在不一致性,主要是由于不同研究采用了不同的数据类型、不同研究时间段以及不同的参数,这些数据和方法的不一致均会对结论产生影响,如植被物候的变化特征与气候因子间的关系尚存在争议,还需通过实测站点数据的支持和验证进一步研究和探讨。青藏高原台站布局密度稀少,实测站点数据贫乏,无法满足遥感参数反演的误差验证需要,使得大范围参数反演精度较低,从而影响植被与气候因子间关系的分析。在倡导数据共享的基础上,亟待在高原地区形成空间布局更为合理的观测网。另外,受不同地理位置和人文环境影响,各个地区植被系统对气候和人文产生了不同特色的响应,建议针对典型区进行较为系统和详尽的研究。

参考文献

- [1] 于伯华,吕昌河. 青藏高原高寒区生态脆弱性评价[J]. 地理研究,2011(12):2289-2295.
- [2] 朴世龙,方精云. 1982-1999年我国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异[J]. 地理学报,2003(1):119-125.
- [3] 张宪洲,张谊光,石培礼,等. 西藏高原生态系统研究的进展与展望:纪念拉萨高原生态试验站建站十周年[J]. 资源科学,2003(5):89-95.
- [4] 布仁巴音,徐广平,段吉闯,等. 青藏高原高寒草甸初级生产力及其主要影响因素[J]. 广西植物,2010(6):760-769.
- [5] 郑度,张荣祖,杨勤业. 试论青藏高原的自然地带[J]. 地理学报,1979(1):1-11.
- [6] 王鸽,韩琳. 气候变化对青藏高原陆地生态系统的影响研究进展[J]. 安徽农业科学,2012(7):4274-4276.
- [7] 于海英,许建初. 气候变化对青藏高原植被影响研究综述[J]. 生态学杂志,2009(4):747-754.
- [8] 武建双,沈振西,张宪洲. 藏北高原草地生态系统研究进展[J]. 安徽农业科学,2009(14):148-152.
- [9] PAULI H, GOTTFRIED M, REITER K, et al. Signals of range expansions and contractions of vascular plants in the high Alps: Observations (1994-2004) at the GLORIA master site Schrankogel, Tyrol, Austria[J]. Global change biology, 2007, 13(1):147-156.
- [10] 王绍武,叶瑾琳,龚道溢,等. 近百年中国年气温序列的建立[J]. 应用气象学报,1998(4):392-401.
- [11] 韦志刚,黄荣辉,董文杰. 青藏高原气温和降水的年际和年代际变化[J]. 大气科学,2003(2):157-170.
- [12] 刘晓东,侯萍. 青藏高原及其邻近地区近30年气候变暖与海拔高度的关系[J]. 高原气象,1998,17(3):245-249.
- [13] KANG S, LI J J, YAO T D, et al. A study of the climate variation in the tibetan plateau during the last 50 years[J]. Journal of glaciology and geocryology, 1998(4):15.
- [14] 姚檀栋,刘晓东,王宁练. 青藏高原地区的气候变化幅度问题[J]. 科学通报,2000(1):98-106.
- [15] 吴绍洪,尹云鹤,郑度,等. 青藏高原近30年气候变化趋势[J]. 地理学报,2005(1):3-11.
- [16] 姚莉,吴庆梅. 青藏高原气候变化特征[J]. 气象科技,2002(3):163-164.
- [17] 徐宗学,张玲,黄俊雄,等. 西藏地区气温、降水及相对湿度的趋势分析

- [J]. 气象, 2007(7): 84-90.
- [18] 王敏, 周才平, 吴良, 等. 近 10a 青藏高原干湿状况及其与植被变化的关系研究[J]. 干旱区地理, 2013(1): 49-56.
- [19] 邹燕, 赵平. 青藏高原年代际气候变化研究进展[J]. 气象科技, 2008(2): 168-173.
- [20] 姚檀栋, 戴玉凤. 青藏高原环境变化科学评估[N]. 光明日报, 2015-05-08.
- [21] 柯长青, 李培基. 青藏高原积雪分布与变化特征[J]. 地理学报, 1998(3): 209-215.
- [22] 韦志刚, 黄荣辉, 陈文, 等. 青藏高原地面站积雪的空间分布和年代际变化特征[J]. 大气科学, 2002(4): 496-508.
- [23] ZHANG Y S, LI T, WANG B. Decadal change of the spring snow depth over the tibetan plateau: The associated circulation and influence on the east asian summer monsoon[J]. J Climate, 2004, 14(17): 2780-2793.
- [24] 高荣, 韦志刚, 董文杰, 等. 20 世纪后期青藏高原积雪和冻土变化及其与气候变化的关系[J]. 高原气象, 2003(2): 191-196.
- [25] 马耀明, 姚檀栋, 王介民, 等. 青藏高原复杂地表能量通量研究[J]. 地球科学进展, 2006(12): 1215-1223.
- [26] 张宪洲, 王其冬, 张谊光. 青藏高原 4-10 月太阳总辐射的分光测量[J]. 气象学报, 2003(5): 89-95.
- [27] TANG W J, YANG K, QIN J, et al. Solar radiation trend across China in recent decades: A revisit with quality-controlled data[J]. Atmospheric chemistry and physics, 2011, 11(1): 393-406.
- [28] 尹云鹤, 吴绍洪, 赵东升, 等. 1981-2010 年气候变化对青藏高原实际蒸散的影响[J]. 地理学报, 2012, 67(11): 1471-1481.
- [29] 毛飞, 唐世浩, 孙涵, 等. 近 46 年青藏高原干湿气候区动态变化研究[J]. 大气科学, 2008(3): 499-507.
- [30] 郑涵, 王秋凤, 李英年, 等. 海北高寒灌丛草甸蒸散量特征[J]. 应用生态学报, 2013(11): 3221-3228.
- [31] 柏崧瑜, 徐祥德, 周玉淑, 等. 春季青藏高原感热异常对长江中下游夏季降水影响的初步研究[J]. 应用气象学报, 2003, 14(3): 363-368.
- [32] FLOHN H. Large-scale aspects of the "summer monsoon" in South and East Asia[J]. J Meteor Soc Japan, 1957, 75: 180-186.
- [33] 赵平, 陈隆勋. 35 年来青藏高原大气热源气候特征及其与中国降水的关系[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2001(4): 327-332.
- [34] 陈芳, 马英芳, 李维强. 青海高原太阳辐射时空分布特征[J]. 气象科技, 2005(3): 231-234.
- [35] 杨元合, 朴世龙. 青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系[J]. 植物生态学报, 2006(1): 1-8.
- [36] 王一博, 王根绪, 常娟. 人类活动对青藏高原冻土环境的影响[J]. 冰川冻土, 2014, 72(6): 1827-1841.
- [37] ZHANG L, GUO H D, WANG C Z, et al. The long-term trends (1982-2006) in vegetation greenness of the alpine ecosystem in the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Environmental earth sciences, 2014, 72(6): 1827-1841.
- [38] LI B, ZHANG L, YAN Q, et al. Application of piecewise linear regression in the detection of vegetation greenness trends on the Tibetan Plateau [J]. International journal of remote sensing, 2014, 35(4): 1526-1539.
- [39] 陈婷, 梁四海, 钱开铸, 等. 近 22 年长江源区植被覆盖变化规律与成因[J]. 地学前沿, 2008(6): 323-331.
- [40] 王青霞, 吕世华, 鲍艳, 等. 青藏高原不同时间尺度植被变化特征及其与气候因子的关系分析[C]// 创新驱动发展 提高气象灾害防御能力: S18 第四届研究生年会. 南京: 中国气象学会, 2013: 1-11.
- [41] 刘军会, 高吉喜, 王文杰. 青藏高原植被覆盖变化及其与气候变化的关系[J]. 山地学报, 2013(2): 234-242.
- [42] 丁明军, 张镱铨, 刘林山, 等. 青藏高原植被覆盖对水热条件年内变化的响应及其空间特征[J]. 地理科学进展, 2010, 29(4): 507-512.
- [43] 向波, 缪启龙, 高庆先. 青藏高原气候变化与植被指数的关系研究[J]. 四川气象, 2001(1): 29-36.
- [44] 范广洲, 华维, 黄先伦, 等. 青藏高原植被变化对区域气候影响研究进展[J]. 高原山地气象研究, 2008(1): 72-80.
- [45] 除多. 基于 NOAA AVHRR NDVI 的西藏拉萨地区植被季节变化[J]. 高原气象, 2003(S1): 145-151.
- [46] ZHANG L, GUO H D, JI L, et al. Vegetation greenness trend (2000 to 2009) and the climate controls in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Journal of applied remote sensing, 2013, 7(4): 469-482.
- [47] WANG K, ZHANG L, QIU Y B, et al. Snow effects on alpine vegetation in the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. International journal of digital earth, 2015, 8(1): 58-75.
- [48] 华维, 范广洲, 周定文, 等. 青藏高原植被变化与地表热源及中国降水关系的初步分析[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2008(6): 732-740.
- [49] MCVICAR T R, RODERICK M L, DONOHUE R J, et al. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation [J]. Journal of hydrology, 2012, 416/417: 182-205.
- [50] 张镱铨, 刘林山, 摆万奇, 等. 黄河源地区草地退化空间特征[J]. 地理学报, 2006(1): 3-14.
- [51] WALTHER G R, POST E, CONVEY P, et al. Ecological responses to recent climate change[J]. Nature, 2002, 416(6879): 389-395.
- [52] WANG C Z, GUO H D, ZHANG L, et al. Assessing phenological change and climatic control of alpine grasslands in the Tibetan Plateau with MODIS time series[J]. International journal of biometeorology, 2015, 59(1): 11-23.
- [53] YU H Y, LUEDELING E, XU J C. Winter and spring warming result in delayed spring phenology on the Tibetan Plateau [J]. Proceedings of the national academy of sciences, 2010, 107(51): 22151-22156.
- [54] PIAO S L, CUI M D, CHEN A P, et al. Altitude and temperature dependence of change in the spring vegetation green-up date from 1982 to 2006 in the Qinghai-Xizang Plateau [J]. Agricultural and forest meteorology, 2011, 151(12): 1599-1608.
- [55] LIU L L, LIU L Y, LIANG L, et al. Effects of elevation on spring phenological sensitivity to temperature in Tibetan Plateau grasslands [J]. Chinese science bulletin, 2014, 59(34): 4856-4863.
- [56] PIAO S L, WANG X H, CIAIS P, et al. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006 [J]. Global change biology, 2011, 17(10): 3228-3239.
- [57] 曾彪. 青藏高原植被对气候变化的响应研究(1982-2003) [Z]. 兰州大学, 2008: 158.
- [58] SHEN M. Spring phenology was not consistently related to winter warming on the Tibetan Plateau [J]. Proceedings of the national academy of sciences, 2011, 108(19): 91-92.
- [59] 程志刚, 刘晓东, 范广洲, 等. 21 世纪青藏高原气候时空变化评估[J]. 干旱区研究, 2011(4): 669-676.
- [60] 张镱铨, 祁斌, 周才平, 等. 青藏高原高寒草地净初级生产力(NPP)时空分异[J]. 地理学报: 英文版, 2014, 24(2): 269-287.
- [61] 孙云晓, 王思远, 常清, 等. 青藏高原近 30 年植被净初级生产力时空演变研究[J]. 广东农业科学, 2014(13): 160-166.
- [62] XU X, CHEN H, LEVY J K. Spatiotemporal vegetation cover variations in the Qinghai-Tibet Plateau under global climate change [J]. Chinese science bulletin, 2008, 53(6): 915-922.
- [63] YANG Y H, FANG J Y, PAN Y D, et al. Aboveground biomass in Tibetan grasslands [J]. Journal of arid environment, 2009(1): 91-95.
- [64] 李晓东, 李凤霞, 周秉荣, 等. 青藏高原典型高寒草地水热条件及地上生物量变化研究[J]. 高原气象, 2012(4): 1053-1058.
- [65] 陈卓奇, 邵全琴, 刘纪远, 等. 基于 MODIS 的青藏高原植被净初级生产力研究[J]. 中国科学(地球科学), 2012(3): 402-410.
- [66] KLEIN J A, HARTE J, ZHAO X. Experimental warming causes large and rapid species loss, dampened by simulated grazing, on the Tibetan Plateau [J]. Ecology letters, 2004, 7(12): 1170-1179.
- [67] 石培礼, 孙晓敏, 徐玲玲, 等. 青藏高原草原化蒿草草甸生态系统 CO₂ 净交换及其影响因子[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2006, 36(1): 194-203.
- [68] ZHANG X Z, SHI P L, LIU Y F, et al. Experimental study on soil CO₂ emission in the alpine grassland ecosystem on Tibetan Plateau [J]. Science in china series earth sciences, 2005, 48: 218-224.
- [69] 徐玲玲, 张宪洲, 石培礼, 等. 青藏高原高寒草甸生态系统净二氧化碳交换量特征[J]. 生态学报, 2005(8): 1948-1952.
- [70] WANG G X, QIAN J, CHENG G D, et al. Soil organic carbon pool of grassland soils on the Qinghai-Tibetan Plateau and its global implication [J]. Science of the total environment, 2002, 291(1/2/3): 207-217.
- [71] 裴志永, 周才平, 欧阳华, 等. 青藏高原高寒草原区碳库估测[J]. 地理研究, 2010(1): 102-110.
- [72] WANG X, PIAO S, CIAIS P, et al. Spring temperature change and its implication in the change of vegetation growth in North America from 1982 to 2006 [J]. Proceedings of the national academy of sciences, 2011, 108(4): 1240-1245.
- [73] LIN X W, ZHANG Z H, WANG S P, et al. Response of ecosystem respiration to warming and grazing during the growing seasons in the alpine meadow on the Tibetan plateau [J]. Agricultural and forest meteorology, 2011, 151(7): 792-802.

壳核桃、大五星枇杷、油橄榄、琯溪蜜柚、红阳猕猴桃等优良的品种,取得了较好的经济效益。今后仍需加强优异品种的筛选和试种研究,多增加一些优异品种,为整个西南喀斯特地区提供更多的经济来源。

(4)海石公园在喀斯特园林生态景观重建方面取得了很好的效果,作为国家“AAA”级风景公园,又是打造重庆100所特色森林公园之一,其旅游方面的经验可以为今后在西南喀斯特地区开展特色旅游提供借鉴。我国西南喀斯特地区拥有丰富的旅游资源,如洞穴、峡谷、石林等自然景观,加之西南地区多姿多彩的少数民族风情,可以大力发展如洞穴探险、峡谷漂流、民风民俗游等旅游项目。

上述海石公园喀斯特石漠化区生态经济治理模式的所有宝贵经验相互促进、相互依存。要彻底遏制我国西南地区的石漠化过程、重建石漠化地区的秀美山川,必须对过去石漠化治理的传统生态治理模式进行创新,树立“以人为本”的观念,高度关注石漠化地区的民生,从生产(技术)、生活、生态与发展等方面对石漠化进行综合治理,才有可能取得石漠化治理的最终胜利。

参考文献

- [1] 袁道先. 袁道先院士1981年在美国科技促进会(AAAS)上的学术报告[R]. 1981.
- [2] 曹建华,袁道先,章程,等. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统[J]. 地球与环境,2004,32(1):1-8.

- [3] 李阳兵,王世杰,容丽. 关于喀斯特石漠化和石漠化概念的讨论[J]. 中国沙漠,2004,24(6):689-695.
- [4] 王世杰. 喀斯特石漠化概念及其科学内涵的探讨[J]. 中国岩溶,2002,21(2):101-105.
- [5] 曹建华,袁道先,童立强. 中国西南岩溶生态系统特征与石漠化综合治理对策[J]. 草业科学,2008,25(9):40-50.
- [6] 袁道先. 对南方岩溶石山地区地下水资源及生态环境地质调查的一些意见[J]. 中国岩溶,2000,19(2):103-108.
- [7] 蒋忠诚,袁道先. 西南岩溶区的石漠化及其综合治理综述[M]//中国岩溶地下水与石漠化研究. 南宁:广西科学技术出版社,2003:13-19.
- [8] 蔡运龙. 中国西南喀斯特山区的生态重建与农林牧业发展:研究现状与趋势[J]. 资源科学,1999,21(5):37-41.
- [9] 苏维词,朱文孝,滕建珍. 喀斯特峡谷石漠化地区生态重建模式及其效应[J]. 生态环境,2004,13(1):57-60.
- [10] 曹建华,袁道先,潘根兴. 岩溶生态系统的土壤[J]. 地球科学进展,2003,18(1):37-44.
- [11] 苏维词. 中国西南岩溶山区石漠化治理的优化模式及对策[J]. 水土保持学报,2002,16(5):24-27.
- [12] 朱章雄,张治伟,蒋勇军. 重庆典型岩溶区石漠化现状及综合治理初步探讨[J]. 人民长江,2006,31(11):90-92.
- [13] 范文武,陈晓德,李加海,等. 重庆中梁山海石公园石灰岩山地植物多样性研究[J]. 西南大学学报(自然科学版),2009,31(5):106-110.
- [14] 四川植被协作组. 四川植被[M]. 成都:四川人民出版社,1980:84-201.
- [15] 朱守谦. 喀斯特森林生态研究(III)[M]. 贵阳:贵州科技出版社,2003.
- [16] 何跃军,杜照奎,吴长榜,等. 喀斯特土壤接种AM菌剂对光皮树幼苗形态特征和生物量分配的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版),2012,34(10):35-40.
- [17] 马璐璐,陈晓德,何琴. 重庆中梁山石漠化地区生态恢复重建模式初步研究[J]. 景观研究,2010,2(1):46-50.
- [18] 刘宏伟,王微,左娟,等. 中梁山石灰岩山地30种主要植物叶片性状研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版),2014,39(9):50-55.

(上接第235页)

- [74] CHANG X F, ZHU X X, WANG S P, et al. Temperature and moisture effects on soil respiration in alpine grasslands[J]. Soil science, 2012, 177(9):554-560.
- [75] 闫巍,张宪洲,石培礼,等. 青藏高原高寒草甸生态系统CO₂通量及其水分利用效率特征[J]. 自然资源学报,2006,21(5):756-767.
- [76] PENG S S, PIAO S L, WANG T, et al. Temperature sensitivity of soil respiration in different ecosystems in China[J]. Soil biology and biochemistry, 2009, 41(5):1008-1014.
- [77] GAO Q Z, WAN Y F, XU H M, et al. Alpine grassland degradation index and its response to recent climate variability in Northern Tibet, China[J]. Quaternary international, 2010, 226(1/2):143-150.
- [78] 高清竹,李玉娥,林而达,等. 藏北地区草地退化的时空分布特征[J]. 地理学报,2005(6):87-95.
- [79] 杨凯,高清竹,李玉娥,等. 藏北地区草地退化空间特征及其趋势分析[J]. 地球科学进展,2007(4):410-416.
- [80] 李才,翟庆国,徐锋,等. 藏北草地资源及其演化趋势:以申扎地区为例[J]. 地质通报,2003(21):991-998.
- [81] 王秀红,郑度. 青藏高原高寒草甸资源的可持续利用[J]. 资源科学,1999(6):38-42.
- [82] 李辉霞,刘淑珍. 西藏自治区北部草地退化驱动力系统分析:西藏自治区那曲县试验区[J]. 水土保持研究,2005(6):219-221.
- [83] 李亚楠,张丽,廖静娟,等. 藏北中部地区草地退化遥感监测[J]. 遥感技术与应用,2013,28(6):1069-1075.
- [84] 杨富裕,张蕴薇,苗彦军,等. 藏北高寒退化草地植被恢复过程的障碍因子初探[J]. 水土保持通报,2003(4):17-20.
- [85] 王根绪,李琪,程国栋,等. 40a来江河源区的气候变化特征及其生态环境效应[J]. 冰川冻土,2001(4):346-352.
- [86] 王根绪,丁永建,王建,等. 近15年来长江黄河源区的土地覆被变化

- [J]. 地理学报,2004,59(2):163-173.
- [87] 张德铨,丁明军,张伟,等. 三江源地区植被指数下降趋势的空间特征及其地理背景[J]. 地理研究,2007(3):500-507.
- [88] 吴志丰,李芬,张林波,等. 三江源区草地参照覆盖度提取及草地退化研究[J]. 自然灾害学报,2014(6):334-339.
- [89] 韩立辉,尚占环,任国华,等. 青藏高原“黑土滩”退化草地植物和土壤对秃斑面积变化的响应[J]. 草业学报,2011(1):1-6.
- [90] 胡梦琪,田丽慧,张登山,等. 遥感与GIS支持下近30a来青海湖环湖区土地沙漠化动态变化研究[J]. 中国沙漠,2012(4):19-27.
- [91] 伏洋,李凤霞,张国胜,等. 青海省天然草地退化及其环境影响分析[J]. 冰川冻土,2007(4):525-535.
- [92] 骆成凤,许长军,游浩妍,等. 2000-2010年青海湖流域草地退化状况时空分析[J]. 生态学报,2013(14):4450-4459.
- [93] 张金龙,陈英,葛劲松,等. 1977-2010年青海湖环湖区土地利用/覆盖变化与土地资源管理[J]. 中国沙漠,2013(4):1256-1266. [94] 李广泳,李小雁,赵国琴,等. 青海湖流域草地植被动态变化趋势下的物候时空特征[J]. 生态学报,2014(11):3038-3047.
- [95] 刘宝康,卫旭丽,杜玉娥,等. 基于环境减灾卫星数据的青海湖面积动态[J]. 草业科学,2013(2):178-184.
- [96] 曾加芹. 西藏地区景观格局变化及生态安全评价[D]. 北京:北京林业大学,2007:95.
- [97] 朱源,彭光雄,王志,等. 西藏林芝地区近30a来的NDVI变化趋势研究[J]. 西北林学院学报,2011(4):69-74.
- [98] 李海东,沈渭寿,蔡博峰,等. 雅鲁藏布江流域NDVI变化与风沙化土地演变的耦合关系[J]. 生态学报,2013(24):7729-7738.
- [99] 丁明军,张德铨,刘林山,等. 1982-2009年青藏高原草地覆盖度时空变化特征[J]. 自然资源学报,2010(12):2114-2122.
- [100] 王涛,沈渭寿,欧阳琰,等. 1982-2010年西藏草地生长期NDVI时空变化特征[J]. 草地学报,2014(1):46-51.