

陈云,李玉强,王旭洋,等.中国生态脆弱区全球变化风险及应对技术途径和主要措施[J].中国沙漠,2022,42(3):148-158.

中国生态脆弱区全球变化风险及 应对技术途径和主要措施

陈云^{1,2},李玉强^{1,2,3},王旭洋¹,姚彩萍⁴,牛亚毅^{1,2}

(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; 3.自然资源部黄河上游战略性矿产资源重点实验室,甘肃 兰州 730046; 4.兰州交通大学环境与市政工程学院,甘肃 兰州 730070)

摘要:自工业革命以来,全球环境发生深刻变化。生态脆弱区生态系统稳定性差、抗干扰和自我恢复能力弱,在全球变化背景下,自然资源供给能力下降、土地退化、生物多样性减少、灾害频发,生态系统面临巨大风险,亟需开展生态脆弱区全球变化风险应对研究。本文重点对中国典型生态脆弱区全球变化风险来源、全球变化对生态脆弱区的影响、全球变化风险应对等研究进行总结,并提出未来全球变化应对策略,以期促进中国典型生态脆弱区生态系统对全球变化响应的深入理解,提高生态脆弱区应对全球变化的能力。生态脆弱区全球变化风险源于环境变化对自然、社会、经济复杂系统的影响。全球变化对生态脆弱区的影响是显著的,以气候变化为主要标志,人类活动为主要驱动力,引起极端气候事件、灾害频发、土地退化、植被生产力降低、生物多样性减少、冰川冻土消融和水资源格局改变等环境问题,并在未来全球变化持续影响下可能加剧,而生态建设工程的实施显著改善了生态环境。今后应加强自然、社会、经济系统耦合,加强资源环境要素监测和全球变化风险评估与预警等方面的研究。

关键词:全球变化;环境响应;驱动因素;风险应对;生态脆弱区

文章编号: 1000-694X(2022)03-148-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00145

中图分类号: P3

文献标志码: A

0 引言

自工业革命以来,在人类活动强烈作用下,全球环境发生着深刻变化。气候变化是全球变化的核心,人类活动是全球变化的主要诱因。以全球气候变化、大气组成变化、氮沉降增加和土地利用/覆盖变化为主要特征的全球变化^[1-2]和由此导致的极端气候事件频发^[2-3]、自然灾害^[3]、生物多样性丧失^[4]等生态问题正严重威胁人类社会经济可持续性和生态安全。这些变化也会对生态系统产生广泛而深刻的影响,尤其是在人类活动干扰下已发生强烈退化或正在快速发生退化的脆弱生态系统。

生态脆弱区也称生态交错区(Ecotone),是不同生态系统交界过渡区域^[5]。中国生态脆弱区分布广泛、类型多样、表现突出^[6],由于过牧、过垦、水资源

过度开发利用、植被破坏等人类活动加剧,中国生态脆弱区广泛发生着荒漠化、水土流失、生物多样性减少和自然灾害频发等生态问题^[7]。在全球变化背景下,生态脆弱区人地关系矛盾日益突出,加速了生态系统退化,严重制约了这些地区社会、经济和生态的可持续发展。“全球变化及应对”重点专项“全球变化对生态脆弱区资源环境承载力的影响研究”^[6,8]参考中国气候区划、《全国生态脆弱区保护规划纲要》^[5]等将中国典型生态脆弱区划分为林草交错带、农牧交错带、干旱半干旱区、黄土高原生态脆弱区、青藏高原生态脆弱区和西南岩溶山区(图1)。基于此,本文重点针对这些生态脆弱区生态系统全球变化风险相关研究进行总结,以期促进全球变化风险研究和提高生态脆弱区应对全球变化的能力。

收稿日期:2021-07-19; 改回日期:2021-12-13

资助项目:国家重点研发计划项目(2017YFA0604803);国家自然科学基金项目(31971466)

作者简介:陈云(1994—),男,重庆大足人,博士研究生,主要从事恢复生态学研究。E-mail: cqchenyun@126.com

通信作者:李玉强(E-mail: liyq@lzb.ac.cn)

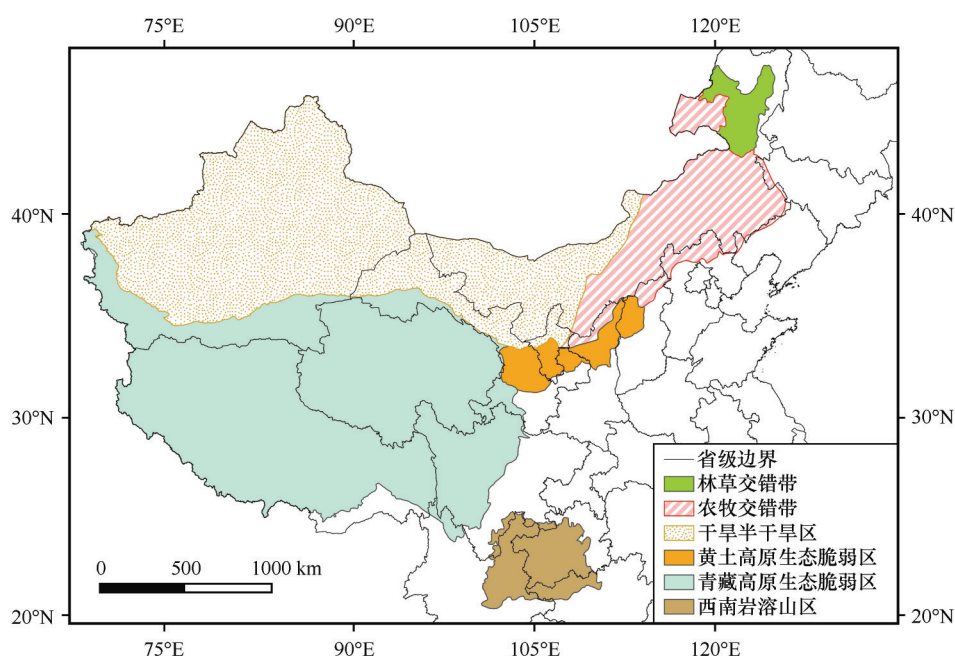


图1 中国典型生态脆弱区地理位置

Fig.1 Geographical location of typically and ecologically vulnerable regions of China

1 生态脆弱区全球变化风险来源

全球变化是自然和人为因素驱动的地表环境和地球系统功能的全球性变化,生态脆弱区全球变化风险来源可分为自然风险源和人为风险源。

对于自然风险源,首先是太阳辐射、地球轨道及构造运动等的变化^[9]。太阳辐射是地球最基本的能量来源,太阳活动本身与地球环境密切相关,并且在地球接收太阳辐射的同时,地球偏心率、黄赤交角和岁差等的周期性变化导致太阳辐射变化可能引起全球环境变化。而板块漂移、构造抬升对地球系统具有不可逆的作用,又如火山活动向大气释放火山灰和火山气体等物质,可能改变区域局部气候。其次,全球气候系统本身是不稳定的,存在周期性变化,且其变化具有突变性^[9]。生态脆弱有特殊的自然环境条件,是影响这些区域环境变化重要的自然风险源。中国西南地区,是山地丘陵区,又有位于断裂带的横断山脉,地质构造极不稳定,容易引发洪涝、滑坡、泥石流和地震等自然灾害^[10]。喀斯特地区碳酸盐岩广泛分布,土壤发育缓慢,在充沛的水热条件及人类活动作用下,极易发生石漠化^[5,10]。位于中国北方及西北地区的生态脆弱区,普遍植被覆盖度低、土壤贫瘠、土质疏松,且干旱缺水,风沙活动强烈,极易发生风蚀、水蚀,导致荒漠化。而在青藏高原生态脆弱区,高寒气候使生态系

统十分脆弱,除风蚀、水蚀,还易发生冻蚀^[5]。这些风险源不仅可能导致区域环境变化,而且环境变化又反过来可能加强这些风险源的作用。但是这些自然风险源对环境变化的作用较小,不足以引起近百年来生态脆弱区环境的大幅变化。因为生态系统具有自我调控机制,使其在变化环境中维持自身稳定。

与自然风险源相比,人为风险源对全球环境变化的作用更强烈,人类活动加强使环境变化超出了生态系统可调控范围而发生崩溃,是全球变化的主要风险源。首先是人口快速增长。据现有人口普查资料,中国典型生态脆弱区主要涉及的12个省、自治区(河北、山西、陕西、内蒙古、四川、贵州、云南、西藏、新疆、青海、甘肃、宁夏)的常住人口由1953年的1.73亿人增加到2020年的4.14亿人,增加了约1.4倍,巨大的人口压力迫使这些地区过度开发利用资源。在中国北方土地荒漠化的成因中,占比由高到低分别为过度樵采(32.7%)、过度放牧(30.1%)、过度开垦(26.9%)、水资源利用不当(9.6%)和不重视环境保护的工矿交通建设(0.7%),环境脆弱性叠加不合理的人类经营活动是导致荒漠化的根本原因^[11]。其次是经济活动风险源,主要体现在排放增加(温室气体、大气酸性物质、污染物排放量增加)。人口快速增长和快速城镇化也对自然资源造成巨大压力,一方面人口快速增长和城市

扩张对土地资源的需求增加,另一方面经济增长依赖于自然资源要素投入,资源环境容量过载将增加生态系统退化的风险。最后是技术进步带来的风险源,如现代技术进步会加强人类活动对生态环境、社会经济活动的干预,增加了生态脆弱地区环境破坏的风险;合成技术的进步则会增加生态系统纳污的风险。

2 全球变化对生态脆弱区的影响

2.1 农牧交错带

农牧交错带是中国北方荒漠和南方地区之间重要的生态屏障^[12]。在全球变化背景下,农牧交错带气候呈“暖干化”变化,气温每10年约增加0.32℃,降水量每10年约减少7.35 mm^[13]。以20世纪80年代末期为重要转折点,区域干旱灾害发生频率和干旱程度明显增加,科尔沁沙地至毛乌素沙地东部干旱较严重^[13-14]。气温、降水和蒸散发等条件是植被生长的重要影响因素,气温上升和降水减少导致农牧交错带土地退化,植被生产力下降^[15-16]。在全球变化背景下,1989—2000年农牧交错带单位面积植被净初级生产力(NPP)下降速率为35 gC·m⁻²·a⁻¹^[17-18]。气温上升还将导致玉米产量下降^[18]。在内蒙古草原,气候变暖导致持续干旱,使牲畜数量减少,对当地牧民生计产生影响,包括生产支出增加但收入减少;气候变暖使作物病虫害增加和动物防疫行为更加频繁,并可能增加人类心脑血管疾病和呼吸系统疾病^[19]。全球变化还引起农牧交错带土壤碳库储量减少^[20],一是通过影响植被生长、凋落物输入影响土壤碳输入来源,二是气候变化加速土壤有机碳分解^[21]。研究表明,20世纪80年代至2018年农牧交错带表层(0—30 cm)土壤有机碳储量由于土地利用/覆盖变化减少速率为27.74 gC·m⁻²·a⁻¹^[20]。农牧交错带土地利用由草地向耕地和建设用地转化的过程中,生态系统服务价值大幅减少,在20世纪90年代尤为突出^[22]。气温、降水量、有效灌溉率、单位面积化肥施用量每增加1%,单位粮食产量将分别增加0.28%、0.51%、0.33%、0.15%^[23]。但降水量、单位种植业产值的能量投入、种植业人均纯收入每增加一个单位,耕地面积分别减少0.683、1.253、0.591个单位^[24]。此外,气候变化可能导致农牧交错带范围扩张^[25],而持续气候变化将加剧农牧交错带的脆弱性^[26]。

2.2 林草交错带

自20世纪60年代以来,林草交错带气温呈增加趋势,而降水量则减少,气候呈“暖干化”变化;气温升高加速水分蒸发,而降水量减少补给能力减弱,区域干旱程度加深,可利用水分减少限制了植物生长,导致草原区和森林草原区NPP呈减少趋势^[27-28]。也有研究者认为,增温使生长季延长,有利于北部森林区NPP的增加^[28]。总体上,“暖干化”使草原区发生干旱尤其严重干旱的频率显著增高^[29],而在森林区发生旱涝的频率增加,并有向极端干旱和极端降水发展的趋势^[30]。人口增加、城镇化发展、放牧等人为因素和气候变化导致草地不断退化^[31],煤矿开采破坏含水层、耕地扩张灌溉增加等导致区域湖泊显著萎缩^[32],农业旅游开发也对生境造成不同程度的破坏^[33]。由于人类活动加强,林草交错带景观异质性提高,景观破碎化趋势明显^[34]。1990—2000年,森林资源质量和数量都明显下降,森林资源变化导致人口迁出和以森工产业为主的第二产业产值下降^[35]。在农业生产方面,气候变暖使作物发育加快、生育期缩短、地力下降和病虫害范围扩大,导致农作物产量下降,但施肥量和农药施用量将增加^[36]。

2.3 黄土高原生态脆弱区

黄土高原生态脆弱区是中国土壤侵蚀、水土流失的严重地区,又是黄河泥沙的主要来源地。20世纪60年代以来,黄土高原生态脆弱区气温显著上升(每10年升温0.4—0.6℃),增加速率由东南向西北增加;降水量则有所下降,特别是降水量较大的东南部下降幅度较大^[37-38]。也有研究表明本区域在20世纪90年代以前,降水量显著减少,而从20世纪90年代中后期开始降水量略有增加^[39-40]。但现有证据表明气候变化将导致本区域极端气候风险上升。旱情将更加严重,在西北部和东南部连续干旱日数呈上升趋势^[38];发生大面积极端降水事件的风险较高,特别是东南部出现高频、高强度极端降水的可能性增加^[41]。“暖干化”和极端气候风险增加将加剧黄土高原生态脆弱区风沙活动、土地沙化和黄土沟壑区水土流失以及降低作物气候生产力^[42-43]。对于本区雨养旱作农业而言,气候变化使0—200 cm土壤含水量显著减少,土壤干旱加重,使适宜农作物生长的时间缩短,作物气候产量呈下降趋势^[44]。气温升高使春小麦、玉米生长加快,全生育期缩短,加

之降水减少,特别是生长季干旱程度加深,对区域小麦生产造成不利影响^[45-46]。但也有研究认为,气候变化有利于本区域玉米产量的形成,因为绝大多数年份降水量能满足玉米生长,且热量资源增加^[47]。气温上升和降水量减少还可能导致黄河流域水资源减少^[39],径流量下降^[48]。但越来越多的证据表明径流量变化受土地利用/覆盖变化的影响大于气候变化,如坡耕地向梯田的变化、耕地向草地和林地的变化^[49-50]。不可否认,退耕还林、还草等土地恢复措施在黄土高原的成功实施显著提高植被覆盖水平和改善水土流失状况^[50-52]。

2.4 青藏高原生态脆弱区

自20世纪60年代以来,青藏高原气温和降水量都呈增加趋势,增加速率分别为每10年0.37℃和6.95 mm,提高了植被NPP和促进土地沙漠化逆转^[53-54]。同时,降水量增加使当前河流径流量呈增长趋势^[55]。但气候变暖加速冰川退缩和冻土消融。据报道,从20世纪70年代至21世纪初,全国冰川面积减少了18%,而青藏高原冰川面积以每年0.04%—0.76%的速度萎缩^[56],并在2000年以后加快退缩^[57],升温使冰川储量大幅降低^[58]。气候变暖还使多年冻土活动层厚度增加,冻土面积减少^[59-60],尤其是青藏高原冬季变暖加剧了多年冻土的退化^[61]。Luo等^[62]研究表明1986—2015年北麓河流域多年冻土面积减少了26%。尽管降水量增加和冰川、冻土消融在短期内将增加河川径流量和湖泊蓄水量^[55-56],在一定程度上有利于水资源利用和植被恢复,但这种变化是不可持续的。多年冻土消融将影响区域水文过程使地下水位下降、径流改变、地面沉降,并对区域基础设施产生不利影响^[63-64]。有研究指出当前冰川融水径流已经或即将达到峰值^[56],冰川、冻土持续萎缩可能降低未来径流的补给能力。未来极端气候事件发生概率增加^[65],也会加剧青藏高原生态脆弱区生态系统的脆弱性。增温增湿有利于牧草产量增加和提高幼畜成活率,但增加了牲畜致病的可能性^[66-67]。也有研究指出,在青藏高原东北缘,气温呈“暖干化”趋势,使牧草产量和品质下降,劣草、杂草、毒草比例增加,导致草场承载力下降;而增温延长生长季,有利于作物生长,但病虫害也随之增加^[68]。人口增长则可能引起农业种植结构的变化,如在西藏的研究表明人口快速增

长使农业种植结构从重粮食作物向重经济作物转变,但粮食播种面积和人均总农作物播种面积不断下降^[69]。

2.5 干旱半干旱区

干旱半干旱区是典型的荒漠绿洲交错区,降水稀少,自然条件较恶劣,绿洲人口又相对集中,植被覆盖度低、草地退化、水资源短缺和次生盐渍化等问题突出。在内蒙古西部、甘肃西北部、新疆大部分区域等干旱半干旱地区,广泛观察到了“暖湿化”气候变化^[70-72]。如南疆气温每10年增加约0.074℃,1986—2000年降水量比1957—1985年多27.1%,而东疆气温和降水量增加速率分别为每10年0.33℃和9.02%^[73]。然而,在西北地区,特别是天山北部、塔里木河流域、河西走廊等地,水资源利用的脆弱性和风险程度较高^[74]。“暖湿化”在短期内将丰富区域水资源,如降水和冰川融水增加使湖泊面积扩张、径流量增加^[73,75]。但如前所述,这种水资源的增加是不可持续的,气候变化还将加剧冰川洪水、泥石流等灾害^[76]和极端气候事件^[77]。气温升高可能限制植被生长,但降水增加则有利于提高植被覆盖度,且北疆地区对降水的敏感性高于南疆地区^[78-79]。同时,北疆也是人口增加、土地利用/覆盖变化、温室气体排放和畜牧业发展等人类活动更强烈的地区^[80]。由于人口增加、城镇化发展等人类活动加剧,在这些地区耕地和建设用地急剧增加,而林地、草地、水域等面积大幅减少,使生态系统服务价值明显下降^[81]。在农业生产上,相比于雨养旱作农业区,绿洲灌溉农业区由于人工灌溉仅表层0—20 cm土壤含水量下降,但深层含水量变化不明显,灌溉促进作物的气候生产力^[44]。气候变暖还使中国西北地区春播作物播种期提前,生长季延长,但全生育期缩短,冬播物种播种期延后,生育期缩短,且变暖使部分病虫害增加,但总体而言气候变暖促进灌溉农业区作物气候产量提高^[44]。然而,耕地质量和数量减少、灌溉压力增加使绿洲农户生计活动由单一的传统型农户向多样性发展,但农户对环境变化的适应效果较差^[82]。

2.6 西南岩溶山区

西南岩溶山区自然环境复杂,变化也相对复杂。张勇荣等^[83]报道了1999—2010年贵州西部六

盘水市气候呈“冷干化”趋势。Lian等^[84]认为1950—2006年贵州贵阳、毕节、威宁的降水量显著减少,气温在贵阳呈降低趋势,在威宁、毕节呈升高趋势,但气温变化均不显著,而云南昆明气温和降水量均显著增加。Xu等^[85]在贵州南部典型岩溶区流域的研究则表明1968—2013年气温略有增加,但不显著,而年降水量则显著下降。与此同时,区域植被变化也存在区域差异,但总体上区域植被覆盖呈趋好发展^[83,86-87]。在区域水文循环方面,受气候变化和人类活动的干扰,流域年径流量呈波动下降^[85]。但就整个西南岩溶地区而言,温度总体呈升高趋势,降水量变化则存在差异。气候变化引起水文循环改变可能导致该区域严重的旱涝灾害,如广西西部、贵州南部、云南东部等岩溶地区旱情将加剧^[88-90],广西大部分地区降水将更加集中,发生洪涝、泥石流的可能性也将增大^[91]。降水特别是集中强降水的增加将加剧水土流失和石漠化过程^[92]。此外,人为土地利用变化导致土地质量下降,如开垦导致土壤有机碳和总氮储量下降^[93],耕地和城市建设用地面积增加使生态系统服务价值减少^[94]。在西南喀斯特地区,气候变暖和降水变化,使水稻、玉米、小麦等农作物苗期病虫害加重^[95]。气候变暖改善了云贵高原高海拔地区热量资源,特别是冬季,使作物种植结构也发生改变,一年多熟制地区面积增加,并向北和高海拔地区扩张^[96]。而干旱加剧又可能增加区域经济损失风险,特别是对花卉、蔬菜、烟草等经济作物的影响,气候变化、物种灭绝等甚至会影响旅游大省云南省部分地区的旅游业^[97]。

除此之外,还有一些全球或区域尺度的变化对整个生态脆弱区产生影响,如气候变化加上大规模人口迁移引起了人们对于公共卫生健康的担忧,因为可能促进传染病的发生、传播^[98],而环境变化也可能使更多的人暴露在诸如通过蚊虫传播的疾病中^[99]。气候变暖使寒冷地区供暖能耗减少,温暖地区制冷能耗增加,且增加量大于减少量,在控制碳排放应对全球变暖背景下促使生态脆弱区进行产业结构调整^[100]。总体上,生态脆弱区环境变化趋势存在一定的差异,环境变化对区域生态、社会、经济的影响因区域特点而不同,但对区域极端气候事件与灾害频率增加、水循环与水资源利用、土地肥力、植被生产力、碳与养分循环、荒漠化过程以及社会—经济活动等产生深刻影响。

3 生态脆弱区应对全球变化风险研究

3.1 全球变化风险驱动力研究

揭示全球变化风险的驱动机制对于采取针对性应对措施具有重要意义。大量研究结果表明气候变化和人类活动强烈干扰是造成生态脆弱区全球变化风险的主要驱动力^[15,84,87]。在高海拔和高纬度地区升温使植被生长季延长和光合作用加强,促进植被生长^[28,86-87,101]。而干旱和半干旱甚至半湿润地区对水分变化更加敏感,降水量的变化使植物可利用水资源发生改变,进而影响植被生长^[15,28,52]。降水还显著影响河流径流量,Lian等^[84]研究表明岩溶区径流量与降水量呈现较高相关性;Wu等^[102]认为降水对径流变化的贡献率稳定在50%—60%。在人为因素方面,在青藏高原生态脆弱区,土壤侵蚀与牲畜数量和放牧强度存在显著关系,而与气候因子相关性较小^[103]。在农牧交错带,过度放牧、复垦、荒漠化是该区域土壤有机碳储量减少的主要原因,尽管退耕还林、退牧还草等生态恢复工程的实施促进了土壤有机碳积累,但其增量仍不足以补偿因土地退化而造成的损失^[20]。随时间推移,人为因素的驱动作用越来越强烈。在黄土高原,极端降水是造成黄土高原产沙的主要驱动因子,并在耕作活动作用下得到加强,随退耕还林措施的实施,植被恢复减少了产沙量,土地利用/覆盖变化逐渐成为产沙量减少的主要原因,贡献率达92%^[104]。Gao等^[105]认为1961—2015年黄土高原泾河流域气候因子对径流变化影响的贡献率由85.70%下降到42.43%,而人为因素贡献率由14.3%上升到57.57%。在西南岩溶石漠化地区,碳酸盐岩岩性、地质构造、地形地貌、水热条件、土壤性质、植被覆盖等是西南岩溶地区发生石漠化的自然诱因。但清代初、中期以来,人为因素转变为西南岩溶地区石漠化的主要驱动力,人口快速增长,农业人口多,区域土地少、土地地力低,过度开垦、樵采、放牧,土地超负荷开发利用,加速水土流失和土地石漠化^[106]。

3.2 全球变化情景模拟

为了有效预判未来全球变化趋势并制定长期应对策略,开展了大量基于不同情景模式的全球变化模拟研究。表1总结了部分基于不同情景的生态脆弱区未来气候变化趋势模拟结果。全球气候持

表 1 生态脆弱区气候变化模拟与应对途径

Table 1 Climate change simulation and countermeasures in ecologically vulnerable regions

区 域	未来气候变化	应对技术途径
西南岩溶山区	在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下, 贵州夏季气温每 10 年增幅分别为 0.12、0.39 °C ^[107]	(1)水源涵养林建设;(2)生态经济型立体种植模式 ^[108] ;(3)小流域综合治理 ^[109] ;(4)退耕还林-封山育林自然植被恢复 ^[110]
青藏高原生态脆弱区	全球变暖 2 °C 时, RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 情景下气温将分别升高 2.99、3.22、3.28 °C, 年降水量分别增加 8.35%、7.16% 和 7.63% ^[65]	(1)人工草地建植、以草定畜、消灭鼠害、防除杂草、围栏封育的退化草地治理 ^[109,111] ;(2)“黑土滩”草地综合整治 ^[112]
黄土高原生态脆弱区	在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下, 最高气温将分别显著增加 1.8—2.7、2.7—3.6 °C ^[113]	(1)工程防线治理模式、生态经济带模式、水土保持型生态农业治理模式等小流域综合开发治理;(2)工程-生物-农耕水土流失治理技术措施;(3)水土流失治理区划 ^[109]
干旱半干旱区	在 RCP8.5 情景下, 21 世纪末, 新疆年均气温和降水量将分别增加 4.9 °C 和 102 mm ^[114] , 在内蒙古西部气温和降水量也呈增加趋势 ^[115]	(1)天然林草地封育、禁牧休牧, 发展沙产业 ^[109] ;(2)绿洲农业节水技术开发与应用、抗逆品种培育以及发展林果经济 ^[116] ;(3)阻沙固沙带与封沙育林育草带防护模式;(4)盐碱地改良技术 ^[117]
农牧交错带	至 2050 年, 在 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 情景下, 气温每 10 年分别增加 0.30、0.38、0.50 °C, 降水量每 10 年分别增加 6.44、12.74、13.55 mm ^[118]	(1)围栏封育-轮休模式, 人工草地建设;(2)破碎化草地集中连片恢复 ^[117] ;(3)丘陵生态综合治理与合理退耕模式 ^[119]
林草交错带	在 IPCC SRES-A2、B2 两种排放情景下, 到 2050 年增温速率分别为 0.54、0.41 °C/10a, 降水量减少速度分别为 0.30、1.69 mm/10a ^[120]	(1)人工草地培育与打草场合理利用 ^[121] ;(2)天然林保护;(3)矿区植被恢复、地质灾害和废弃物综合治理 ^[122]

续变化, 对未来生态脆弱区生态环境将产生深刻影响。

Zhao 等^[60]预测青藏高原在 RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 情景下, 到 21 世纪末多年冻土活动层厚度平均增量将大于 30 cm。在西北干旱半干旱区、青藏高原、东北等地, 在 RCP8.5 背景下到 2030 年增温 1.5 °C, 极端干旱事件发生风险将增加 1.04—1.22 倍^[123]。到 21 世纪末, 在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下黄土高原气温显著增加, 尽管降水也增加, 但干旱趋势明显, 特别是在黄土高原西南部和中部可能经历更加频繁的干旱和长期高温^[113]。在喀斯特地区, 有预测结果表明, 到 21 世纪末贵州省的径流模数和输沙模数是增加的, 特别是在人口快速增长和经济发展缓慢情况下径流模数变化更加剧烈, 可能增加区域水土流失风险和水资源优化利用的压力^[124–125]。在农牧交错带, Han 等^[18]发现, 在 RCP4.5 情景下, 到 21 世纪末, 考虑和不考虑 CO₂ 的影响下玉米产量将分别下降 10.3% 和 11.7%, RCP8.5 情景下将分别下降 21.2% 和 22.1%, 且气温每升高 1 °C, 玉米产量分别减少 10.8%、11.27%。但也有少数在未来全球变化下生态环境趋好发展的报道, 如在 RCP4.5 情景下, 河西走廊内陆河流、天山北部河塔里木河上游水资源脆弱性和风险性呈下降趋势^[74]。

3.3 应对技术途径

在过去几十年里, 国家相继实施了“三北”防护林体系工程、退耕还林、退牧还草、京津风沙源防治工程、岩溶地区石漠化综合治理工程等一系列重大生态建设工程。而在生态脆弱区, 也针对性地提出和应用了一系列生态恢复与环境变化应对的技术和模式(表 1), 使生态脆弱区生态环境得到有效改善。据估计, 退耕还林还草使黄土高原部分流域在 1981 年至 2015 年输沙量减少了 50% 以上, 径流量减少了 13.8%^[51], 土壤侵蚀模数 2010 年比 1990 年下降了 84.3%^[126], 水土保持面积增加、土地恢复, 使黄土高原径流量每年约减少 0.46 mm^[50]。在农牧交错带, 土壤有机碳储量增加也主要源于林地和草地的恢复^[20]。在喀斯特地区, 林草面积增加使径流量更加稳定, 水土流失面积减少^[85]。退耕还林还草、自然保护区建设等对区域植被恢复作用明显^[127–128]。同时, 生态脆弱区生态系统稳定性差、抗干扰能力弱、易退化, 对环境变化甚为敏感, 在气候变化和人类活动等作用下, 生态脆弱区生态环境的脆弱性和敏感性加剧, 可能对生态建设工程实施效果产生一定的影响。但总体而言, 生态恢复措施的实施对促进植被生产力、防风固沙、水土保持和固碳释氧等生态功能具有积极作用。国家也将继续在青藏高

原生态屏障、黄土高原生态区、长江重点生态区、东北森林带、北方防沙带等重点生态区域布局重要生态系统保护和修复重大工程^[129],将促进生态脆弱区生态恢复和增强生态系统服务功能,为可持续社会经济发展构筑基本保障。

4 生态脆弱区应对全球变化策略

加强自然、社会、经济系统的耦合。全球变化是在自然因素和人文因素共同作用下的结果,且人文因素是全球变化的关键驱动因素。一方面人口快速增加,人类活动加强,如温室气体排放增加、环境污染加剧、土地利用/覆盖变化等人为作用使全球环境发生剧烈变化;另一方面全球变化给自然生态系统、社会经济系统带来风险。全球变化与自然、社会系统几乎以正反馈的形式相互影响。而在生态脆弱区,自然环境相对恶劣,生态系统抗干扰和自我恢复能力弱,社会、经济发展水平也相对落后。生态脆弱区全球变化风险应对中不仅包含脆弱生态系统恢复与重建,还涉及经济增长、消除贫困、生产生活方式、制度法规、人的意识观念和医疗卫生等社会经济发展的可持续性。因此,在未来全球变化应对研究中应加强自然-社会-经济系统的耦合,将全球变化与人类福祉联系起来。

加强生态环境要素监测和区域合作。生态脆弱区生态环境要素监测对应全球变化具有关键作用,通过监测数据可以深刻揭示全球变化的过程和机理。在生态脆弱区,应进一步完善生态环境要素监测技术体系,加强自然资源(土地资源、林草资源、水资源等)、生态过程(碳循环、水循环等)和人为活动(碳排放、污染物排放、农牧活动等)等的标准化调查与监测。同时,加强不同区域和学科领域合作,利用信息技术、大数据等先进技术手段,将生态环境要素监测统一起来,建立全球变化综合数据库。

加强全球变化风险评估与预警机制研究。当前在生态脆弱区开展的全球变化响应研究以中小尺度为主,且研究对象单一,集中于森林、草地生态系统。今后可在生态脆弱区加强不同尺度“山水林田湖草沙”生命共同体系统多要素对全球变化响应的研究,加强全球变化对生态脆弱区生态安全、生态系统服务功能、生物多样性和资源环境承载力等的影响研究,进一步揭示生态脆弱区全球变化风险来源、全球变化过程和机理、全球变化与生态系统

的互馈机制。此外,还应建立未来全球变化预警机制,以快速应对生态脆弱区生态系统可能发生的潜在风险,如未来土地利用变化、大气成分改变和多种极端气候事件对生态系统的潜在影响。

参考文献:

- [1] Vitousek P M. Beyond global warming: ecology and global change[J]. *Ecology*, 1994, 75(7): 1903-1910.
- [2] Karl T R, Trenberth K E. Modern global climate change[J]. *Science*, 2003, 302(5651): 1719-1723.
- [3] 秦大河. 应对全球气候变化 防御极端气候灾害[J]. *求是*, 2007(8): 51-53.
- [4] Hooper D U, Adair E C, Cardinale B J, et al. A global synthesis reveals biodiversity loss as a major driver of ecosystem change[J]. *Nature*, 2012, 486(7401): 105-108.
- [5] 中华人民共和国环境保护部. 全国生态脆弱区保护规划纲要[EB/OL]. (2008.09.27)[2021.05.23]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2009/content_1250928.htm.
- [6] 孙康慧, 曾晓东, 李芳. 1980~2014年中国生态脆弱区气候变化特征分析[J]. *气候与环境研究*, 2019, 24(4): 455-468.
- [7] 中华人民共和国国务院. 全国主体功能区规划[EB/OL]. (2011-06-08)[2021-05-23]. http://www.gov.cn/zw/gk/2011-06/08/content_1879180.htm.
- [8] 于贵瑞, 徐兴良, 王秋风, 等. 全球变化对生态脆弱区资源环境承载力的影响研究[J]. *中国基础科学*, 2017, 19(6): 19-23, 35.
- [9] 张强, 韩永翔, 宋连春. 全球气候变化及其影响因素研究进展综述[J]. *地球科学进展*, 2005(9): 990-998.
- [10] 王慧芳, 饶恩明, 肖焱, 等. 基于多风险源胁迫的西南地区生态风险评价[J]. *生态学报*, 2018, 38(24): 8992-9000.
- [11] 朱震达. 全球变化与荒漠化[J]. *地学前缘*, 1997, 4(1/2): 213-219.
- [12] Wang X, Li Y, Gong X, et al. Storage, pattern and driving factors of soil organic carbon in an ecologically fragile zone of northern China[J]. *Geoderma*, 2019, 343: 155-165.
- [13] 杜华明, 延军平, 王鹏涛. 北方农牧交错带干旱灾害及其对暖干气候的响应[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(1): 124-128.
- [14] 韩晓敏, 延军平. 东北农牧交错带旱涝特征对气候变化的响应[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(2): 257-262.
- [15] 杜金荣, 于德永. 气候变化和人类活动对中国北方农牧交错区草地净初级生产力的影响[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(3): 365-372.
- [16] 刘军会, 高吉喜. 气候和土地利用变化对中国北方农牧交错带植被覆盖变化的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(9): 2016-2022.
- [17] 刘军会, 高吉喜. 气候和土地利用变化对北方农牧交错带植被NPP变化的影响[J]. *资源科学*, 2009, 31(3): 493-500.
- [18] Han Z, Zhang B, Yang L, et al. Assessment of the impact of future climate change on maize yield and water use efficiency in agro-pastoral ecotone of Northwestern China [J]. *Journal of*

- Agronomy and Crop Science, 2021, 207(2): 317–331.
- [19] 娜日苏, 于婧, 朵兰娜. 气候变化对内蒙古草原生态经济的影响评述[J]. 北方经济, 2011(21): 74–75.
- [20] Wang X, Li Y, Gong X, et al. Changes of soil organic carbon stocks from the 1980s to 2018 in northern China's agro-pastoral ecotone[J]. Catena, 2020, 194: 104722.
- [21] 杨红飞, 穆少杰, 李建龙. 气候变化对草地生态系统土壤有机碳储量的影响[J]. 草业科学, 2012, 29(3): 392–400.
- [22] Yang Y, Wang K, Liu D, et al. Effects of land-use conversions on the ecosystem services in the agro-pastoral ecotone of northern China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 249: 119360.
- [23] 吉孟振. 气候变化背景下内蒙古农牧交错带粮食生产及对策研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012.
- [24] 马礼, 唐毅, 牛东宇. 北方农牧交错带耕地面积变化驱动力研究: 以沽源县近15年为例[J]. 人文地理, 2008(5): 17–21.
- [25] 李秋月, 潘学标. 气候变化对我国北方农牧交错带空间位移的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(10): 1–6.
- [26] 周一敏, 张昂, 赵昕奕. 未来气候变化情景下中国北方农牧交错带脆弱性评估[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2017, 53(6): 1099–1107.
- [27] 刘明阳. 呼伦贝尔森林草原交错区气候时空演变及生态系统的响应[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2013.
- [28] 陈艳梅, 高吉喜, 冯朝阳, 等. 1982–2010年呼伦贝尔植被净初级生产力时空格局[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(6): 647–653.
- [29] 张钦, 唐海萍, 崔凤琪, 等. 基于SPEI的呼伦贝尔草原干旱变化特征及趋势分析[J]. 生态学报, 2019(19): 1–14.
- [30] 边玉明, 代海燕, 张秋良, 等. 气温突变下内蒙古大兴安岭林区旱涝演变[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(4): 106–112.
- [31] 张志莉. 呼伦贝尔草原草地退化的影响因素的统计分析[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2020, 51(6): 608–614.
- [32] 耿晓庆, 胡兆民, 赵霞, 等. 内蒙古呼伦贝尔草原湖泊变化研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(2): 400–408.
- [33] 汪洪旭. 农业旅游开发对内蒙呼伦贝尔草原生态环境的影响[J]. 水土保持研究, 2015, 22(2): 290–294.
- [34] 刘立成, 卢欣石, 吕世海, 等. 呼伦贝尔森林-草原交错区景观持续性分析[J]. 草业科学, 2008, 25(3): 119–124.
- [35] 张红新, 胡远满, 段春霞, 等. 大兴安岭地区森林资源变化及其对社会经济的影响[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(30): 15001–15003.
- [36] 吕森, 张昉, 冯世珍. 大兴安岭地区近30年气候变化及其对农业的影响[J]. 内蒙古气象, 2005(3): 35–37.
- [37] Sun Q, Miao C, Duan Q, et al. Temperature and precipitation changes over the Loess Plateau between 1961 and 2011, based on high-density gauge observations[J]. Global and Planetary Change, 2015, 132: 1–10.
- [38] Tang X, Miao C, Xi Y, et al. Analysis of precipitation characteristics on the loess plateau between 1965 and 2014, based on high-density gauge observations[J]. Atmospheric Research, 2018, 213: 264–274.
- [39] 刘吉峰, 王金花, 焦敏辉, 等. 全球气候变化背景下中国黄河流域的响应[J]. 干旱区研究, 2011, 28(5): 860–865.
- [40] Ding W, Wang F, Jin K, et al. Individual rainfall change based on observed hourly precipitation records on the Chinese Loess Plateau from 1983 to 2012[J]. Water, 2020, 12(8): 2268.
- [41] Miao C, Sun Q, Duan Q, et al. Joint analysis of changes in temperature and precipitation on the Loess Plateau during the period 1961–2011[J]. Climate Dynamics, 2016, 47(9/10): 3221–3234.
- [42] 赵昆昆, 周宝同, 王晓喆, 等. 全球气候变化下陕北黄土地貌的环境演变[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(24): 14788–14790.
- [43] 王春娟, 何可杰. 气候变化背景下陕西关中西部作物气候生产潜力变化特征[J]. 中国农学通报, 2016, 32(28): 170–176.
- [44] 张强, 邓振镛, 赵映东, 等. 全球气候变化对我国西北地区农业的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 1210–1218.
- [45] 姚玉璧, 王润元, 杨金虎, 等. 黄土高原半干旱区气候变化对春小麦生长发育的影响: 以甘肃定西为例[J]. 生态学报, 2011, 31(15): 4225–4234.
- [46] 姚玉璧, 王瑞君, 王润元, 等. 黄土高原半湿润区玉米生长发育及产量形成对气候变化的响应[J]. 资源科学, 2013, 35(11): 2273–2280.
- [47] 车向军, 任继帮, 路学勤, 等. 黄土高原庆阳地区春玉米生育期对气候变化的响应[J]. 中国农学通报, 2020, 36(3): 88–92.
- [48] 邓文平, 李海光, 余新晓, 等. 黄土高原吕二沟流域土地利用/覆被和气候变化对径流泥沙的影响[J]. 水土保持研究, 2011, 18(4): 226–231.
- [49] 郑培龙, 李云霞, 赵阳, 等. 黄土高原泾河流域气候和土地利用变化对径流产沙的影响[J]. 水土保持研究, 2015, 22(5): 20–24.
- [50] Chen H, Fleskens L, Baartman J, et al. Impacts of land use change and climatic effects on streamflow in the Chinese Loess Plateau: a meta-analysis[J]. Science of the Total Environment, 2020, 703: 134989.
- [51] Yang K, Lu C. Evaluation of land-use change effects on runoff and soil erosion of a hilly basin: the Yanhe River in the Chinese Loess Plateau[J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(4): 1211–1221.
- [52] 信忠保, 许炯心, 郑伟. 气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2007, 37(11): 1504–1514.
- [53] 李庆, 张春来, 王仁德, 等. 1965–2016年青藏高原关键气象因子变化特征及其对土地沙漠化的影响[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2018, 54(5): 659–665.
- [54] 陈舒婷, 郭兵, 杨飞, 等. 2000–2015年青藏高原植被NPP时空变化格局及其对气候变化的响应[J]. 自然资源学报, 2020, 35(10): 2511–2527.
- [55] 蓝永超, 鲁承阳, 喇承芳, 等. 黄河源区气候向暖湿转变的观测事实及其水文响应[J]. 冰川冻土, 2013, 35(4): 920–928.
- [56] 王宁练, 姚檀栋, 徐柏青, 等. 全球变暖背景下青藏高原及周边地区冰川变化的时空格局与趋势及影响[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1220–1232.
- [57] Ke L, Ding X, Li W, et al. Remote sensing of glacier change in

- the central Qinghai-Tibet Plateau and the relationship with changing climate[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(2): 114.
- [58] 李治国. 近 50 a 气候变化背景下青藏高原冰川和湖泊变化[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(8): 1431–1443.
- [59] 徐晓明, 吴青柏, 张中琼. 青藏高原多年冻土活动层厚度对气候变化的响应[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(1): 1–8.
- [60] Zhao D, Wu S. Projected changes in permafrost active layer thickness over the Qinghai-Tibet Plateau under climate change[J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(9): 7860–7875.
- [61] Zhang G, Nan Z, Wu X, et al. The role of winter warming in permafrost C change over the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(20): 11261–11269.
- [62] Luo J, Yin G, Niu F, et al. High spatial resolution modeling of climate change impacts on permafrost thermal conditions for the Beiluhe basin, Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(11): 1294.
- [63] 赵林, 胡国杰, 邹德富, 等. 青藏高原多年冻土变化对水文过程的影响[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(11): 1233–1246.
- [64] 程国栋, 赵林, 李韧, 等. 青藏高原多年冻土特征、变化及影响[J]. *科学通报*, 2019, 64(27): 2783–2795.
- [65] 李红梅, 李林. 2 °C 全球变暖背景下青藏高原平均气候和极端气候事件变化[J]. *气候变化研究进展*, 2015, 11(3): 157–164.
- [66] 王彦星, 郑群英, 晏兆莉, 等. 气候变化背景下草原产权制度变迁对畜牧业的影响: 以青藏高原东缘牧区为例[J]. *草业科学*, 2015, 32(10): 1687–1694.
- [67] 韩国军, 王玉兰, 房世波. 近 50 年青藏高原气候变化及其对农牧业的影响[J]. *资源科学*, 2011, 33(10): 1969–1975.
- [68] 张秀云, 姚玉璧, 邓振镛, 等. 青藏高原东北边缘牧区气候变化及其对畜牧业的影响[J]. *草业科学*, 2007, 24(6): 66–73.
- [69] 刘合满, 曹丽花. 1980–2010 年西藏农作物播种面积与人口数量变化的相关分析[J]. *中国农业资源与区划*, 2013, 34(3): 84–88.
- [70] Qin F, Qin F, Jia G, et al. Decadal decline of summer precipitation fraction observed in the field and from TRMM satellite data across the Mongolian Plateau[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 137(1): 1105–1115.
- [71] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(2): 152–164.
- [72] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J]. *冰川冻土*, 2002, 24(3): 219–226.
- [73] 陈亚宁, 徐长春, 杨余辉, 等. 新疆水文水资源变化及对区域气候变化的响应[J]. *地理学报*, 2009, 64(11): 1331–1341.
- [74] Xia J, Ning L, Wang Q, et al. Vulnerability of and risk to water resources in arid and semi-arid regions of West China under a scenario of climate change[J]. *Climatic Change*, 2017, 144(3): 549–563.
- [75] Wufu A, Wang H, Chen Y, et al. Lake water volume fluctuations in response to climate change in Xinjiang, China from 2002 to 2018[J]. *PeerJ*, 2020, 8: e9683.
- [76] 沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(II): 灾害效应[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(6): 1355–1370.
- [77] 杨莲梅. 新疆极端降水的气候变化[J]. *地理学报*, 2003, 58(4): 577–583.
- [78] Yu H, Bian Z, Mu S, et al. Effects of climate change on land cover change and vegetation dynamics in Xinjiang, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(13): 4865.
- [79] Luo M, Liu T, Meng F, et al. Identifying climate change impacts on water resources in Xinjiang, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 676: 613–626.
- [80] Wu Z, Zhang H, Krause C M, et al. Climate change and human activities: a case study in Xinjiang, China[J]. *Climatic Change*, 2010, 99(3/4): 457–472.
- [81] Wang X, Dong X, Liu H, et al. Linking land use change, ecosystem services and human well-being: a case study of the Manas River Basin of Xinjiang, China[J]. *Ecosystem Services*, 2017, 27: 113–123.
- [82] 吴孔森, 杨新军, 尹莎. 环境变化影响下农户生计选择与可持续性研究: 以民勤绿洲社区为例[J]. *经济地理*, 2016, 36(9): 141–149.
- [83] 张勇荣, 周忠发, 马士彬, 等. 基于 NDVI 的喀斯特地区植被对气候变化的响应研究: 以贵州省六盘水市为例[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(4): 114–117.
- [84] Lian J, Chen H, Wang F, et al. Separating the relative contributions of climate change and ecological restoration to runoff change in a mesoscale karst basin[J]. *Catena*, 2020, 194: 104705.
- [85] Xu Y, Wang S, Bai X, et al. Runoff response to climate change and human activities in a typical karst watershed, SW China[J]. *PLoS ONE*, 2018, 13(3): e193073.
- [86] 蒙古军, 王钧. 20 世纪 80 年代以来西南喀斯特地区植被变化对气候变化的响应[J]. *地理研究*, 2007, 26(5): 857–865, 1069.
- [87] 许玉凤, 潘网生, 张永雷. 贵州高原 NDVI 变化及其对气候变化的响应[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(8): 1507–1518.
- [88] Lian Y, You G J, Lin K, et al. Characteristics of climate change in southwest China karst region and their potential environmental impacts[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(2): 937–944.
- [89] Liu B, Chen C, Lian Y, et al. Long-term change of wet and dry climatic conditions in the southwest karst area of China[J]. *Global and Planetary Change*, 2015, 127: 1–11.
- [90] 姚玉璧, 张强, 王劲松, 等. 气候变暖背景下中国西南干旱时空分异特征[J]. *资源科学*, 2015, 37(9): 1774–1784.
- [91] 覃卫坚, 王咏青, 覃志年. 全球气候变暖背景下广西降水集中程度的变化特征研究[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(21): 11224–11227.
- [92] 苏维词. 中国西南岩溶山区石漠化的现状成因及治理的优化模式[J]. *水土保持学报*, 2002, 16(2): 29–32.
- [93] 全金辉, 胡业翠, 杜章留, 等. 广西喀斯特移民迁入区土地利用变化对土壤有机碳和全氮储量的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(9): 2890–2896.

- [94] 唐启琳,刘方,刘秀明,等.基于LUCC的喀斯特山区生态系统服务价值评价[J].环境科学与技术,2019,42(1):170-177.
- [95] 孙华,何茂萍,胡明成.全球变化背景下气候变暖对中国农业生产的影响[J].中国农业资源与区划,2015,36(7):51-57.
- [96] 程建刚,王学锋,龙红,等.气候变化对云南主要行业的影响[J].云南师范大学学报(哲学社会科学版),2010,42(3):1-20.
- [97] 李俊梅,李娟.应对全球气候变化云南可持续发展对策研究[J].云南地理环境研究,2013,25(1):77-83.
- [98] 吴晓旭,田怀玉,周森,等.全球变化对人类传染病发生与传播的影响[J].中国科学:地球科学,2013,43(11):1743-1759.
- [99] Ryan S J, Carlson C J, Mordecai E A, et al. Global expansion and redistribution of Aedes-borne virus transmission risk with climate change[J]. PLoS Neglected Tropical Diseases, 2019, 13(3): e7213.
- [100] 冉圣宏,唐国平,薛纪渝.全球变化对我国脆弱生态区经济开发的影响[J].资源科学,2001,23(3):24-28.
- [101] Guo B, Han B, Yang F, et al. Determining the contributions of climate change and human activities to the vegetation NPP dynamics in the Qinghai-Tibet Plateau, China, from 2000 to 2015[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, 192(10):663.
- [102] Wu L, Wang S, Bai X, et al. Quantitative assessment of the impacts of climate change and human activities on runoff change in a typical karst watershed, SW China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 601/602:1449-1465.
- [103] Li Y, Li J, Are K S, et al. Livestock grazing significantly accelerates soil erosion more than climate change in Qinghai-Tibet Plateau: evidenced from ^{137}Cs and ^{210}Pb measurements[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019, 285:106643.
- [104] Zhang J, Gao G, Fu B, et al. Investigation of the relationship between precipitation extremes and sediment discharge production under extensive land cover change in the Chinese Loess Plateau[J]. Geomorphology, 2020, 361:107176.
- [105] Gao X, Yan C, Wang Y, et al. Attribution analysis of climatic and multiple anthropogenic causes of runoff change in the Loess Plateau: a case-study of the Jing River Basin[J]. Land Degradation & Development, 2020, 31(13):1622-1640.
- [106] 李森,魏兴琥,黄金国,等.中国南方岩溶区土地石漠化的成因与过程[J].中国沙漠,2007,27(6):918-926.
- [107] 张娇艳,王玥彤,李扬,等.未来气候变化背景下贵州省夏季旅游气候资源的变化预估[J].气象科技,2021,49(3):399-405.
- [108] 杨宁,彭晚霞,邹冬生,等.贵州喀斯特土石山区水土保持生态经济型植被恢复模式[J].中国人口·资源与环境,2011,21(3):474-477.
- [109] 赵哈林,赵学勇,张铜会,等.恢复生态学通论[M].北京:科学出版社,2009:376-733.
- [110] 彭艳,朱健,朱宇.西南石漠化地区生态恢复及恢复模式浅谈[J].科技创新导报,2010(36):122.
- [111] 彭艳,赵津仪,莽杨丹,等.退化高寒草地生态恢复的研究进展[J].高原农业,2018,2(3):313-320.
- [112] 尚占环,董全民,施建军,等.青藏高原“黑土滩”退化草地及其生态恢复近10年研究进展:兼论三江源生态恢复问题[J].草地学报,2018,26(1):1-21.
- [113] Sun C X, Huang G H, Fan Y, et al. Drought occurring with hot extremes: changes under future climate change on Loess Plateau, China[J]. Earth's Future, 2019, 7(6):587-604.
- [114] 王政琪,高学杰,童尧,等.新疆地区未来气候变化的区域气候模式集合预估[J].大气科学,2021,45(2):407-423.
- [115] 盛文萍,李玉娥,高清竹,等.内蒙古未来气候变化及其对温性草原分布的影响[J].资源科学,2010,32(6):1111-1119.
- [116] 王明亮,徐猛.新疆兵团绿洲农业应对气候变化的形势与科技需求分析[J].中国人口·资源与环境,2015,25(增刊1):584-587.
- [117] 王聪,伍星,傅伯杰,等.重点脆弱生态区生态恢复模式现状与发展方向[J].生态学报,2019,39(20):7333-7343.
- [118] 方梓行,何春阳,刘志锋,等.中国北方农牧交错带气候变化特点及未来趋势:基于观测和模拟资料的综合分析[J].自然资源学报,2020,35(02):358-370.
- [119] 郑大玮,王砚田,潘学标,等.农牧交错带综合治理及生态保护型农业技术体系与模式研究进展[J].中国农业大学学报,2005,10(4):55-61.
- [120] 高永刚,赵慧颖,高峰,等.大兴安岭区域未来气候变化趋势及其对湿地的影响[J].冰川冻土,2016,38(1):47-56.
- [121] 王丽娟,朝克图,王宇.呼伦贝尔草地植被恢复重建人工培育技术的研究[J].中国农业文摘-农业工程,2017,29(2):44-45.
- [122] 马永茂,鞠兴军.呼伦贝尔市矿山地质环境问题及防治措施[J].露天采矿技术,2012(1):85-88.
- [123] 李东欢,邹立维,周天军.全球1.5℃温升背景下中国极端事件变化的区域模式预估[J].地球科学进展,2017,32(4):446-457.
- [124] 熊亚兰,张科利.全球气候变化对贵州省径流模数的潜在影响[J].地理与地理信息科学,2011,27(3):82-85.
- [125] 熊亚兰,张科利.全球气候变化对贵州省输沙模数影响分析[J].泥沙研究,2011(3):23-28.
- [126] Yan R, Zhang X, Yan S, et al. Estimating soil erosion response to land use/cover change in a catchment of the Loess Plateau, China[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2018, 6(1):13-22.
- [127] 张继,周旭,蒋啸,等.生态工程建设背景下贵州高原的植被变化及影响因素分析[J].长江流域资源与环境,2019,28(7):1623-1633.
- [128] Yang H, Mu S, Li J. Effects of ecological restoration projects on land use and land cover change and its influences on territorial NPP in Xinjiang, China[J]. Catena, 2014, 115:85-95.
- [129] 国家发展和改革委员会,自然资源部.全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021-2035年)[EB/OL]. (2020-06-03) [2021-05-23]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202006/t20200611_1231112.html.

Risk and countermeasures of global change in ecologically vulnerable regions of China

Chen Yun^{1,2}, Li Yuqiang^{1,2,3}, Wang Xuyang¹, Yao Caiping⁴, Niu Yayi^{1,2}

(1. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Strategic Mineral Resources

of the Upper Yellow River, Ministry of Natural Resources, Lanzhou 730046, China; 4. School of Environment and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The global environment has undergone profound changes since the industrial revolution. Due to the poor stability, anti-interference and self-recovery abilities of ecosystems, global change has led to the decline of natural resource supply capacity, land degradation, biodiversity reduction, frequent disasters, and increased ecosystem risks in ecologically vulnerable regions. Therefore, it is urgent to implement researches on global change risk in ecologically vulnerable regions. This study mainly summarized the researches on the risk sources and the impact of global change on ecologically vulnerable areas of China, as well as the response to global change. The study then put forward the future strategies for global change to promote the in-depth understanding of the response of ecosystem to global change and improve the ability to cope with global change in typically and ecologically vulnerable regions of China. The risk of global change in ecologically vulnerable regions comes from the impact of environmental change on complex systems of natural, social, and economic. Global change has a great impact on the ecosystem of ecologically vulnerable regions, with climate change as the main symbol and human activities as the main driving force. Global change causes extreme climate events, frequent disasters, land degradation, the reduction of vegetation productivity and biodiversity, the melting of glaciers and frozen soil, and the change of water resources pattern, which may intensify under the continuous impact of global change in the future. However, the implementation of ecological construction project has significantly improved the ecological environment. In the future, we should strengthen the researches on the coupling of natural, social, and economic systems, the monitoring of resources and environmental factors, and the risk assessment and early warning of global change.

Key words: global change; environmental response; driving factors; risk treatment; ecologically vulnerable regions