

文章编号: 1001-4675(2011)03-0499-10

新疆气候变化研究进展^{*}

贺晋云¹, 张明军^{1,2}, 王 鹏¹, 辛 宏¹, 黄小燕¹

(1. 西北师范大学 地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070;
2. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 通过对 1990 年以来新疆气候变化研究的国内外文献资料的归纳总结, 将新疆气候变化事实、影响、应对措施及预测等方面的最新研究进展进行了概括。结果表明: 整体上, 新疆的气候正在向暖湿化方向转变, 这一变化事实导致了该区域水热的重新配置, 对水资源和农业等都产生了较大的影响。

关键词: 气候变化; 应对措施; 农业; 变化预测; 新疆
中图分类号: P467 **文献标识码:** A

近 40 年来, 我国西北地区气候出现由暖干向暖湿转变的事实⁽¹⁻⁷⁾, 而新疆在整个西北地区最为突出⁽⁸⁾。新疆独特的地理位置, 脆弱的生态, 使其对气候变化反映十分敏感⁽⁹⁾, 所以新疆在气候变化方面的研究受到国内外学者广泛关注⁽¹⁰⁾。此项研究不仅对于深入了解我国干旱区气候变化规律具有十分重大的意义, 更为重要的是对新疆环境变化有着直接的影响, 与新疆经济的发展有着密切的联系⁽¹¹⁾。国内对新疆气候变化的研究比较深入全面, 主要集中在气候变化事实、影响、应对措施、预测等四个方面。

1 气候变化事实

气候变化传统的衡量指标主要是: 气温、降水、蒸发、日照、太阳辐射和风速, 也有学者进行了不同方面的探索研究, 如湿润指数、干旱指数、空气中的水汽含量、气候极值等。施雅风等⁽¹⁾研究指出, 中国西北从 1987 年起, 以新疆天山西部为主的地区出现了气候由暖干向暖湿转型的强劲信号, 引发了众多学者对新疆气候变化研究的强烈兴趣。胡汝骥等⁽¹¹⁾认为, 新疆气候变化与全球和全国气候变化趋势基本一致, 但又具有明显的区域性特点: 变暖脚步渐缓, 增湿势头不减。

1.1 气温

新疆与全国的气温变化较为一致⁽⁹⁾, 主要表现

在年际、季节、年代际和空间 4 个方面:

(1) 新疆近 50 年来气温呈上升趋势⁽¹²⁾, 平均增长率为 $0.27\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ⁽¹³⁻¹⁴⁾, 最低气温上升明显, 而最高气温的变化具有区域差异: 奇台县⁽¹⁵⁾呈下降趋势, 哈密⁽¹⁶⁾、吐鲁番⁽¹⁷⁾和博州⁽¹⁸⁾呈升高趋势, 但升高幅度相对于最低气温较小。1987 年以后, 新疆地区年平均气温较 1986 年以前有明显升高, 徐贵青⁽⁹⁾等认为, 1980 年是新疆气温的突变点。

(2) 各季平均气温的变幅以冬季为最大, 夏季最小, 但总体上均呈上升趋势^(2,11,14,19), 增温现象主要出现在冬季⁽²⁰⁻²¹⁾, 这与近几十年来, 全国乃至北半球的增温主要出现在冬季相一致⁽²²⁾。但哈密地区夏季气温增幅最大⁽¹⁶⁾。

(3) 新疆气温从 20 世纪 50 年代以来基本上呈上升趋势, 90 年代以来的气温明显高于平均值, 为正距平⁽²³⁾。

(4) 新疆气温平均增幅较大的地区是北疆西部、北部和东疆, 且呈现出山区高、平原低的特征⁽¹³⁻¹⁴⁾, 北疆变暖最为明显⁽²⁾, 增长率为 $0.36\sim 0.37\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ^(9,14), 其中, 阿勒泰地区为 $0.38\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ⁽²⁴⁾。

此外, 袁玉江等研究了天山山区近 40 年年气温、夏季和秋季气温变化特征⁽²⁵⁻²⁷⁾, 并从气温冷暖变化阶段、空间分布的同步变化性、空间分布的反向

^{*} 收稿日期: 2010-03-31; 修订日期: 2010-09-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(40701035, 40631001, 40571033); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0019); 陇原青年创新人才扶持计划; 西北师范大学知识与科技创新工程创新团队项目(NWNU-KJCXGC-03-66)和科研骨干培育项目(NWNU-KJCXGC-03-78); 西北师范大学自然地理学省级重点学科资助

作者简介: 贺晋云(1986-), 女, 山西晋城人, 在读硕士研究生, 主要从事全球环境变化方面的研究。E-mail: hejinyun300@163.com
通讯作者: 张明军。E-mail: mjzhang2004@163.com

变化性和年代际变化等方面与南北疆进行比较,得出一些重要结论,对新疆地区的农业生产具有一定的指导意义。

1.2 降水

新疆的降水变化主要表现在年际、季节、年代际和空间 4 个方面:

(1) 近 50 年来新疆年降水量总体呈增加的变化趋势^[28],平均增幅为 0.67 mm/a ,其中天山山区增幅最大,石河子^[29]增加率为 1.06 mm/a ,轮台^[30]增加率为 1.07 mm/a 。从 20 世纪 80 年代开始,新疆降水量明显增加,1987 年为新疆降水突变的转折点^[4,9,12]。

(2) 张家宝^[5]和丁一汇^[31]等分析指出,新疆气候变湿在季节上存在明显差异,尤以夏季降水量变化最为显著,如奇台县^[15]。而在不同地区也存在差异,阿克苏地区^[21]降水量就以冬季增加为主。

(3) 新疆降水的年际变化较为复杂,20 世纪上半叶降水较多,以 1946 年降水量最大,50-60 年代下降趋势非常明显,60 年代中期至 80 年代末期,降水比平均值偏少,90 年代以后,降水持续增加^[4]。

(4) 新疆降水量变化在地区分布上各有差异,南疆降水量增加最多^[2],增加的幅度大于北疆^[11,28]。降水量呈减少趋势的地区集中在北疆,并以阿尔泰山西部减少趋势最为明显,减率为 $1.5 \sim 2 \text{ mm/a}$ ^[13],吐鲁番地区^[17]冬、春、夏季降水均呈减少趋势,年降水量的变化趋势不明显。

袁玉江等研究天山山区近 40 年年降水^[32]、夏季^[33]、秋季^[27]和冬季降水^[34]变化特征,并与南北疆进行比较,得出一些结论。

1.3 蒸发

蒸发是影响地区水资源及环境和反映气候变化的重要因素,蒸发量与气温关系密切。苏宏超等^[14]通过分析 20 cm 水面蒸发的观测资料,认为新疆年蒸发量的变化总体呈下降趋势,反映出气候转湿的信号。刘敏^[35]也认为,中国蒸发皿蒸发量存在减少趋势,新疆是减少趋势最为显著的地区。但另有一些学者就蒸发皿蒸发和模拟的实际蒸发进行了比较^[36],认为在新疆,蒸发皿蒸发和模拟的实际蒸发之间存在相反的变化关系。这与 Brntsart W 等^[37]提出的蒸发皿蒸发和实际蒸散之间具有互补相关关系(变化趋势相反)的理论相一致。刘波等^[36]指出,严格意义上,蒸发皿蒸发是代表一个地区接受太阳能量多少的指标,而不能代表水分变化,这一点在

干旱和半干旱地区表现尤为明显,而陆地表面的实际蒸发才是衡量水分变化的客观变量,两者有联系但不能相互替代。潜在蒸发是评价气候干旱程度变化和作物耗水的最重要指标之一,通常由气象要素计算得出^[38],对区域气候干湿变化有很好的表征,引起学者们的广泛关注。张明军等^[39]探讨了天山山区潜在蒸发量的时空变化,认为其年潜在蒸发量总体上呈减小趋势,并将其归因于风速的变化,同时提出影响秋季潜在蒸发量增加的因素是气温的增加。

1.4 太阳辐射和日照

地表太阳辐射是地球能量的主要来源^[40],太阳辐射的研究对了解地表能量的分布和合理利用能源有重要意义。吕宁^[41]和李晓文^[42]等研究认为,近年来中国大部分地区太阳总辐射和直接辐射呈减少趋势,并指出地面大气悬浮粒子浓度的增加对太阳直接辐射的减少有较大影响。陈志华等^[43]的研究表明,新疆地面太阳总辐射和直接辐射总体呈下降趋势。同时,有学者对乌鲁木齐市进行分析指出,乌鲁木齐市太阳辐射在 20 世纪 90 年代前下降趋势明显,之后下降趋势减慢,并将此与煤烟型污染物含量的变化联系起来,认为乌鲁木齐市的大气环境有所改善^[44]。以上研究表明,新疆太阳辐射的变化趋势与全国相一致。

日照时数是表征太阳辐射强弱的气象要素之一^[45]。由于不同地区日照时数差异较大,新疆日照时数的研究主要是针对具体地区展开的。有关研究表明,近 55 年来乌鲁木齐市^[45]、喀什市^[46]与石河子市^[29]年日照时数呈减少趋势,其中乌鲁木齐市减少幅度最大,倾向率达 -88.7 h/10 a ,并一致将年降水日数、雾日数和总云量的增加作为年日照时数减少的主要原因。只有阿克苏地区^[47]呈增多趋势,但增加趋势不显著,变化倾向率为 3.9 h/10 a 。

1.5 风速

王遵姪^[48]的研究表明,全球气候变化背景下,我国的风速呈下降趋势,全国平均风速约减小了 16%,最显著的西北地区减少约 29%,减少速率为 $-1.7 \text{ m/(s} \cdot 100 \text{ a)}$,并认为近 50 年来,大气环流变化引起亚洲冬季风和夏季风减弱,从而导致了我国平均风速的减小。刘敏^[35]指出,城市化发展导致大多数建在城镇周边气象站点附近的粗糙度增加,这可能是引起风速下降的一个不可忽视的因素。最近有研究认为^[49],新疆东部地区近 50 年平均风速

下降了 0.94 m/s , 减弱速率 $> -0.2 \text{ m}/(\text{s} \cdot 10 \text{ a})$, 其中哈密市风速变化最大, 速率为 $-0.46 \text{ m}/(\text{s} \cdot 10 \text{ a})$, 且这些变化与强冷空气、寒潮、沙尘暴等发生日数和强度明显减弱有关, 但从总体上看, 新疆的风速变化也与全国的平均风速变化相一致。

1.6 湿润与干旱指数

地表湿润指数是判断某一地区气候干旱与湿润状况的良好指标^[50]。对地表湿润指数的研究主要集中在我国较湿润地区^[51], 而对新疆干旱半干旱地区的关注才刚刚开始, 邢文渊等^[50-51]就南、北疆的地表湿润指数变化进行了分析, 结果表明: 南、北疆的地表湿润指数时空分布不均, 春季湿润指数较低, 较干旱, 对春耕不利。南疆夏季湿润指数有所回升, 有利于植物生长。

干旱指数可以反映气候干湿状况。苏宏超等^[14]认为, 新疆干旱指数呈下降趋势, 1987 年以来气候出现了转湿的信号。王劲松等^[52]利用 K 干旱指数研究西北地区春旱后指出, 新疆大部分地区为春旱的高发区。姜大膀等^[53]用改进的 Palmer 干旱指数(PDSI 指数)对新疆干湿变化分析认为, 近 40 年来新疆的 PDSI 指数在上升, 说明气候在向暖湿化方向发展, 并将此归因于同期降水量的增加。

1.7 空气中水汽含量

刘国伟等^[54]对中国陆地-大气系统水分循环进行研究后发现, 西北地区年总降水量中 92.8% 是由境外输入水汽形成的, 7.2% 是由当地蒸发的水汽形成的。新疆的水汽主要来源于纬向西风环流, 所以形成了新疆水汽北疆多于南疆, 西部多于东部的特征^[55]。随着全球变暖, 新疆水汽分布也发生了变化, 引起了学者的关注。俞亚勋^[56]分析了西北地区空中水汽的时空分布, 认为从年代际变化趋势看, 20 世纪 60-70 年代西北大部分地区空中水汽呈现减少趋势, 而 80-90 年代全区普遍呈现增多的趋势, 并以新疆水汽增多趋势最为显著, 全年水汽增加最明显的是新疆北部和西南部。

1.8 气候极值

在全球变暖背景下, 新疆气候存在着变暖增湿的趋势, 光热资源变幅增大, 暴雨、暴雪、低温和局部冰雹等天气增多, 产生气候极值的天气气候事件频频出现^[11]。杨连梅^[6]对近 40 年来新疆极端降水变化进行分析, 指出新疆的极端降水强度无显著变化, 而年极端降水量于 1980 年发生了突变, 造成年降水量的变化, 并认为这种气候变化是由夏半年极端降

水量和频次增多导致的。

2 气候变化的影响

2.1 对水资源的影响

全球气候持续变暖使全球水循环发生了显著的变化^[57], 如降水时空的重新分布、冰川和积雪的积累与融化、地表水和地下水相互转化等^[58]。新疆是典型的干旱气候区, 水资源是生态系统的核心^[5]。气候变化对新疆水资源的影响主要表现在: 冰川、冻土、积雪和地表径流。

2.1.1 冰川 冰川是新疆水循环的重要因素, 对气候、径流都有重要影响^[59]。冰川是气候变化敏感的指示器, 其生长和退缩影响气温和降水量的变化^[20]。谢自楚等^[60]预测, 如果出现极端的持续升温, 升温率为 0.05 K/a , 到 21 世纪末, 中国冰川储量损失将达 57%。乌鲁木齐河源 1 号冰川的观测信息也显示, 近年来 1 号冰川以负物质平衡为主, 且温度是影响冰川物质平衡的决定性因素^[59,61]。高晓清等^[62]通过理论分析也认为: 百年以上的冰川进退基本上取决于温度变化, 与降水的关系不大; 对于 10 年以内的冰川波动, 总体上取决于温度变化。李忠勤等^[63]通过对新疆天山乌鲁木齐河源 1 号冰川的研究, 认为近 50 年来冰川在表面粒雪特征、成冰带、冰川温度、面积、厚度及末端位置等方面发生了显著变化, 而这些变化均与气温的升高有着密切的联系。由于温度持续上升, 全疆的冰川正大量消融, 冰川处于变薄后退过程中, 并自 20 世纪 80 年代后期, 尤其是近 10 年来出现了加速趋势。

2.1.2 冻土 气候变暖对冻土的影响主要表现在高山多年冻土。多年冻土是一个巨大的碳库, 由于气候严寒, 多年冻土带中的碳在不断积累, 导致其土壤含碳量比其他区域高出数十倍^[20]。新疆气候变暖使多年冻土融化, 释放出冻土中的碳, 这将进一步加速气候变暖; 同时会释放出其中的水分^[64], 对区域水资源有一定影响。据澳大利亚科学家观察, 全球变暖将导致高山冻土地带发生季节性融化, 而且这种融化会使冻土带变得越来越薄, 在夏季易发生滑坡、泥石流等地质灾害^[65]。

2.1.3 积雪 人类面临全球变暖及其对大陆积雪产生巨大影响的科学预言^[66], 使积雪对全球变暖响应研究成为全球变化研究中的热点。大范围积雪作为气候变化的指示器之一, 对全球变暖具有明显的

反馈响应^[67]。新疆是中国季节积雪水资源最为丰富的地区^[68]，其积雪对气候变暖的响应引起了一些学者的关注。李培基^[68]认为，20 世纪下半叶虽然新疆冬季变暖显著，但积雪并未出现持续减少的现象，这是冬季气温和降水共同作用的结果，且研究表明，处于严寒干燥气候下的积雪对降雪量变化十分敏感，而对气温变化不够敏感，所以新疆积雪稳定状况并未受到破坏。同时，杨青等^[69]对天山积雪的变化进行分析后认为，天山山区最大积雪深度具有明显的增加趋势，倾向率为 1.15 cm/10 a，最大积雪深度在 1977 年前后发生了突变。

2.1.4 地表径流 随着新疆气候变化，地表径流量及其时空分布也发生了巨大变化^[5]。径流是地球表面水循环过程中的重要环节。研究认为^[28]新疆大气降水与河川总径流量、地表水资源量均具有较好的对应关系，故降水的增加有助于地表径流量的增加。而雪冰融水与温度有密切的关系，刘景时^[70]等通过对比认为，在新疆引起局部地区地表径流显著增加的主要因素是冰川加速消融，尤其是在水资源以冰川积雪融水补给为主的地区^[48,71]，如天山山区，这些地区形成河川径流的机制对冬季气温的上升极为敏感^[20]。所以，新疆气候变暖引起天山地区的河流径流增加比较明显，其中又以天山南坡增幅最为显著^[59,72]。同时也有研究表明^[73]，天山北坡的中小型河流的夏季径流量呈减少趋势，并将此归因于夏季降水的减少和温度的明显升高。

2.2 对环境的影响

随着新疆气候发生转型，生态与环境亦发生着显著的变化，如植被覆盖度增加、河川径流量增大、平原湖泊面积扩大、极端降水和洪水增多、大风与沙尘暴日数减少等^[74]。

2.2.1 土地覆被变化 土地覆被是指陆地某一空间上所存在的植被及其他特质，如森林、草地、作物、水体、土壤等^[75]，气候变化和气候异常可影响土地覆被变化。新疆远离海洋，一些地区气候极端干旱，所以水分条件的变化对植物的生长状况有明显的影响。李克让^[76]研究表明，干旱区植被的生长状况与气候条件的变化有很好的相关性，对气候变化有较高的敏感性。马明国等^[77]利用遥感监测资料证实了这一点：随着 20 世纪 90 年代新疆气候向暖湿化转变，其北部、天山西部、伊犁河流域等地区出现了植被覆盖明显增加的现象。

2.2.2 环境变化趋势 近年来，全球气候变化对干旱和半干旱地区环境的影响，引起了人们的关注，但各家说法不一，甚至完全对立。慈龙骏^[78]采用联合国环境署的环境监测系统的湿润指标和 Thornthwaite 的计算方法，计算和预测了我国干旱区格局的变化，认为在全球变化影响下，我国干旱区、半干旱区将变暖变干，若 CO₂ 倍增，温度上升 1.5℃，我国干旱区总面积扩大 1.88 × 10⁵ km²；若 CO₂ 倍增，温度上升 4.0℃，干旱区面积扩大 8.43 × 10⁵ km²，平均每年增加 9 917.7 km²。但另有学者^[79]认为：全球气候变暖，使我国干旱地区，因降水增多，土壤水分改善，灌溉面积扩大，干旱程度会有所减少，蒸发量和干燥指数在气候变暖后都会降低，环境出现一些可喜的变化，并认为一些干旱区将会演变成半湿润区，干旱区的范围会缩小。最近魏文寿等^[80]采用基于方差分析的周期叠加方法，对天山山区未来 23 年降水演变趋势进行预测，结果也表明：未来 23 年中天山山区气候变化以湿润为主，生态系统总体趋于好转。以上两种预测在今后是需要实践检验的，但从新疆近 50 年气候变化情景来看，由于降水显著增加，不存在气候干旱所导致的荒漠化扩大现象，但这个时间能持续多久还不能确定^[11]。

2.2.3 自然灾害 新疆生态脆弱，自然灾害发生较为频繁^[81]。近年来，气候变化打乱了当地的水平衡，水文气象灾害的频率和强度在不断增加，同时气候的变异性变得越来越极端，极端天气事件的频率和强度也在持续上升^[82]。

由于山区雪冰消融量和径流量连续多年增加，20 世纪 90 年代以来新疆河流洪水灾害频繁发生，尤其在 1987 年以后，洪水灾害发生的频次明显增加^[83-85]，这是对新疆气候变化的很好响应，也与我国及世界其他地区洪、旱灾害增多的趋势相一致^[81]。

沙尘暴的发生频率和强度对气候变化也有响应。何清等^[86]通过研究不同地区沙尘天气对气候变化的响应机制后表明，在南疆春季的沙尘天气与同期的温度、降水有较好的线性相关性，在北疆、天山地区却没有这种相关性。

2.3 气候变化对农业的影响

农业是对气候变化反应最为敏感的部门之一^[87]。新疆气候变化对农业的影响有^[5,11]：

(1) 加重作物病虫害。冬季明显变暖，不但增

加了冬季农田土壤水分蒸发量,影响作物安全越冬,越冬害虫的成虫、卵或蛹的安全越冬提供了有利条件,虫卵蛹死亡率降低,易使病虫害泛滥成灾,增大了防治难度。近些年新疆虫害不断加重与冬季变暖有着一定的关系。

(2) 作物品质下降。在作物生长期气温的升高,缩短了养分积累的时间,降低了作物品质。

(3) 气象灾害频发,降低作物产量。热量年际间急剧变化对农作物的生长极为不利,尤其是冷害已成为对作物生产影响最大的气象灾害。

(4) 农业生产布局 and 结构将出现变动。新疆气候变暖,有利于越冬作物种植北界向北扩展,多熟制向北推移,喜温作物面积扩大,复种指数提高。

气候变暖与农业生产关系十分密切,其影响利弊并存。因此,要掌握、遵循和充分利用气候变化规律,提高人们对气候变暖的应对能力,研究防御对策,趋利避害,使农业生产获取最佳效益。

3 应对气候变化的措施

(1) 加强水资源管理,保证水资源的可持续利用。

新疆大气降水资源十分有限,仅依靠大气降水来缓解新疆水资源短缺问题是不现实的,必须寻求其他途径,如边际水资源开发、咸水利用、人工增雨等与水资源合理配置利用,采用各种类型的节水技术,以节水增效、提高水资源利用效率为主攻目标,增强全社会的节水意识⁽⁸⁸⁾。同时,应加强对水资源的管理,加快水利设施的建设步伐,在丰水期积极蓄水,枯水期合理利用,并做好城乡发展的总体规划,保证用水需求的有效供给,以水资源的可持续利用来支撑社会经济的可持续发展。

(2) 建自然保护区,确保生物多样性的延续。

新疆是全国生态最脆弱的地区之一,但同时也是全国生物多样性最丰富和平均人口密度最小的省区之一。在新疆广大无人居住地区开展流域治理和水土保持的最佳方法就是建立自然保护区。只有生物多样性得以延续,环境才能真正得到保护,水土资源才会得到有效的保持。

(3) 建立突发性天气事件的应急体系,保证农业正常发展和人民健康。

面对极端天气灾害的频繁发生,各级气象部门尤其要加强气候变化和冷害等气象灾害的预报,努

力提高气象预报水平,以充分利用每年的热量资源,趋利避害,保证棉花及其他农作物生产的优质、稳产、高产、高效⁽⁵⁾。同时,在城市建设中应采取一系列措施减缓热浪带来的危害和城市“热岛效应”,如推广屋顶花园,用反射性强的涂料粉刷屋顶等;加强防洪、排水和净水基础设施的建设,这不仅可以增强对洪水的抵抗力,还可以预防过量降雨带来的水污染以及通过水污染带来的疾病⁽⁸²⁾。

4 气候变化预测

新疆气候向暖湿化转变已是不争的事实,一些学者已用不同的预测方法对西北地区不同时间尺度的气候变化进行了预测。赵宗慈等⁽⁸⁹⁻⁹¹⁾引用高学杰等的中国区域气候模式模拟了在 CO₂ 倍增情况下,中国西北部将升温 2.5 ~ 3.0 °C,降水将增加 20% 以上;后来又采用 IPCC 2001 年科学评估报告中的 7 个全球大气耦合海洋环流模式,并考虑到由于人类活动所导致的温室气体和硫化物气溶胶的增加,对 21 世纪西北地区气候变化进行预测,认为西北地区将继续明显变暖,百年变暖趋势平均为 2.79 ~ 4.50 °C,在 21 世纪末变暖幅度将大大超过 20 世纪,未来降水将可能以 48 ~ 60 mm/100 a 的速度增加。Arnell⁽⁹²⁾对气候变化与全球水资源关系有较深入研究,引用 HadCM2 和 HadCM3 模拟气候变化情景,应用 Penman-Monterth 公式计算潜在蒸发量,按水量平衡概念模式推算径流变化,认为新疆降水可增加 5% ~ 20%,潜在蒸发量增加 4% ~ 18%,径流增加 -10% ~ 27%。此外,魏文寿等⁽⁸⁰⁾预测未来 23 年中新疆天山山区气候变化将以湿润为主。

5 展望

目前,对新疆气候变化事实的研究已相当深入,并且得出了较为一致的结论。但在气候变化对新疆的影响方面,尤其是对未来环境影响的预测,缺乏统一的论断,因此,需进一步提高生态系统的预测水平,针对中国具有季风气候及青藏高原地形影响的特点,研究符合中国特殊自然和人文环境的生态系统模型。之前对环境的评价研究以定性为主,定量说明较少,而生态脆弱性评价是一种自然生态系统响应气候变化的脆弱性的定量评价方法⁽⁹³⁾,由于气候变化以及生态系统对其响应和适应的复杂性⁽⁹⁴⁾,

这种评价方法在气候变化研究中进展缓慢,所以,将其用于新疆等干旱半干旱地区环境的评价具有实际意义。

虽然,目前的气候变化模式具有模拟全球、半球和纬向平均气候条件的能力,但模拟区域气候变化的水平还较低,存在较大的不确定性,主要受气溶胶、云以及被怀疑与冰雪有关的水文循环的影响⁽⁹¹⁾,这就要求研究者更好地认识与气候变化相关的物理化学过程,特别是与云、海洋、碳循环相联系的过程,了解地球生物化学与自然气候系统之间的相关特征,不断改进气候模型,提高预测的精度,增强区域预测能力,为国家与地区未来可持续发展提供可靠依据。

参考文献(References):

- (1) 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. (Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China(J). Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(3): 219 - 226.)
- (2) 李栋梁,魏丽,蔡英,等. 中国西北现代气候变化事实与未来趋势展望(J). 冰川冻土,2003,25(2): 128 - 135. (Li Dongliang, Wei Li, Cai Ying, et al. The present facts and the future tendency of the climate change in Northwest China(J). Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(2): 128 - 135.)
- (3) 施雅风,沈永平,李栋梁,等. 中国西北部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. (Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. Discussion on the present climatic change from warm-dry to warm-wet in Northwest China(J). Quaternary Sciences, 2003, 23(2): 152 - 164.)
- (4) 宋连春,张存杰. 20 世纪西北地区降水量变化特征(J). 冰川冻土,2003,25(2): 136 - 141. (Song Lianchun, Zhang Cunjie. Changing features of precipitation over Northwest China during the 20th century(J). Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(2): 136 - 141.)
- (5) 张家宝,史玉光. 新疆气候变化及短期气候预测研究(M). 北京: 气象出版社,2002. (Zhang Jiabao, Shi Yuguang. Study on Climate Change and Short-Term Weather Forecast in Xinjiang(M). Beijing: Meteorological Press, 2002.)
- (6) 杨莲梅. 新疆极端降水的气候变化(J). 地理学报,2003,58(4): 577 - 583. (Yang Lianmei. Climate change of extreme precipitation in Xinjiang(J). Acta Geographica Sinica, 2003, 58(4): 577 - 583.)
- (7) 胡汝骥,姜逢清,王亚俊. 新疆气候由暖干向暖湿转变的信号及其影响(J). 干旱区地理,2002,25(3): 194 - 200. (Hu Ruji, Jiang Fengqing, Wang Yajun. Signal and impact of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Xinjiang(J). Arid Land Geography, 2002, 25(3): 194 - 200.)
- (8) 赵兵科. 新疆夏季变湿的大气环流异常特征(J). 冰川冻土,2006,28(3): 434 - 442. (Zhao Bingke. Atmospheric circulation anomalies during wetting summer over Xinjiang region(J). Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(3): 434 - 442.)
- (9) 胡汝骥,樊自立,王亚俊,等. 近 50 a 新疆气候变化对环境影响评估(J). 干旱区地理,2001,24(2): 97 - 103. (Hu Ruji, Fan Zili, Wang Yajun, et al. Assessment about the impact of climate change on environment in Xinjiang since recent 50 years(J). Arid Land Geography, 2001, 24(2): 97 - 103.)
- (10) 徐国昌. 中国干旱半干旱区气候变化(M). 北京: 气象出版社,1997: 45 - 65. (Xu Gouchang. Climate Change in Arid and Semi-arid Regions of China(M). Beijing: China Meteorological Press, 1997: 45 - 65.)
- (11) 胡汝骥,姜逢清,王亚俊. 新疆雪冰水资源的环境评估(J). 干旱区研究,2003,20(3): 187 - 191. (Hu Ruji, Jiang Fengqing, Wang Yajun. Assessment on the glacial water resources in Xinjiang, China(J). Arid Zone Research, 2003, 20(3): 187 - 191.)
- (12) 邓振镛,张强,尹宪志,等. 干旱灾害对干旱气候变化的响应(J). 冰川冻土,2007,29(1): 114 - 118. (Deng Zhengyong, Zhang Qiang, Yin Xianzhi, et al. Response of drought damage to arid climate change(J). Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(1): 114 - 118.)
- (13) 薛燕,韩萍,冯国华. 半个世纪以来新疆降水和气温的变化趋势(J). 干旱区研究,2003,20(2): 127 - 130. (Xue Yan, Han Ping, Feng Guohua. Change trend of the precipitation and air temperature in Xinjiang since recent 50 years(J). Arid Zone Research, 2003, 20(2): 127 - 130.)
- (14) 苏宏超,魏文寿,韩萍. 新疆近 50 a 来的气温和蒸发变化(J). 冰川冻土,2003,25(2): 174 - 178. (Su Hongchao, Wei Wenshou, Han Ping. Changes in air temperature and evaporation in Xinjiang during recent 50 years(J). Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(2): 174 - 178.)
- (15) 宋文娟,熊黑钢,戚冉. 新疆奇台县近 42 a 气候变化特征分析(J). 干旱区资源与环境,2009,23(4): 100 - 106. (Song Wenjuan, Xiong Heigang, Qi Ran. Climate change in Qitai County in Xinjiang in recent 42 a(J). Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 23(4): 100 - 106.)
- (16) 阿依夏木·尼亚孜,周宁芳,杨贵名. 近 45 年哈密地区温度变化特征(J). 气象,2007,33(7): 89 - 97. (Ayixiamu Niyazhi, Zhou Ningfang, Yang Guiming. Analyses on characteristics of air temperature change in Hami, Xinjiang in recent 45 years(J). Meteorological Monthly, 2007, 33(7): 89 - 97.)
- (17) 张山清,普宗朝,耿芙蓉,等. 近 45 年吐鲁番地区气候变化趋势(J). 新疆气象,2001,24(3): 23 - 25. (Zhang Shanqing, Pu Zhongchao, Geng Furong, et al. Climate change trend in Tulafan in the last 45 years(J). Bimonthly of Xinjiang Meteorology, 2001, 24(3): 23 - 25.)
- (18) 辛渝,张广兴,张新,等. 新疆博州地区近 46 年来的气候变化特征(J). 干旱区地理,2006,29(2): 193 - 200. (Xin Yu, Zhang Guangxing, Zhang Xin, et al. Climate change in Bortala Mongol Autonomous Prefecture, Xinjiang since recent 46 years(J). Arid Land Geography, 2006, 29(2): 193 - 200.)
- (19) 邓振镛,张强,辛吉武,等. 干旱生态环境及水资源对全球气候

- 变暖响应的研究进展 (J). 冰川冻土, 2008, 30(1): 57 - 63. (Deng Zhenyong, Zhang Qiang, Xin Jiwu, et al. Progress in response of arid eco-environment and water resource to global warming (J). Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(1): 57 - 63.)
- (20) 邵春, 沈永平, 张皎. 气候变化对寒区水循环的影响研究进展 (J). 冰川冻土, 2008, 30(1): 72 - 80. (Shao Chun, Shen Yongping, Zhang Jiao. Recently progress in climate change impact on water cycles of cold regions (J). Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(1): 72 - 80.)
- (21) 陈颖, 张俊岚. 近 45 年阿克苏地区干湿程度演变分析 (J). 干旱区研究, 2007, 24(5): 686 - 690. (Chen Ying, Zhang Junlan. Analysis on the evolvement of dryness/wetness in Aksu Prefecture in recent 45 years (J). Arid Zone Research, 2007, 24(5): 686 - 690.)
- (22) 国家科学技术委员会. 中国科学技术蓝皮书第 5 号: 气候 (M). 北京: 科学技术文献出版社, 1990. (Conacyt, Blue Paper on Science and Technology of China: No. 5 Climate (M). Beijing: Science and Technology Literature Press, 1990.)
- (23) 曹丽青, 葛朝霞, 薛梅. 1951 - 2006 年新疆地区气候变化特征及其与水资源的关系 (J). 河海大学学报: 自然科学版, 2009, 37(3): 281 - 283. (Cao Liqing, Ge Zhaoxia, Xue Mei. Climate change and its relationship with water resources in Xinjiang Uygur Autonomous Region from 1951 to 2006 (J). Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2009, 37(3): 281 - 283.)
- (24) 李帅, 李祥余, 何清, 等. 阿勒泰地区近 40 年的气候变化研究 (J). 干旱区研究, 2006, 23(4): 637 - 643. (Li Shuai, Li Xiangyu, He Qing, et al. Study on climate change in Altay Prefecture since recent 40 years (J). Arid Zone Research, 2006, 23(4): 637 - 643.)
- (25) 袁玉江, 何清, 魏文寿, 等. 天山山区与南、北疆近 40 年来的年温度变化特征比较研究 (J). 中国沙漠, 2003, 23(5): 521 - 526. (Yuan Yujiang, He Qing, Wei Wenshou, et al. Comparison of features of annual temperature change in Tianshan Mountainous Area, Southern and Northern Xinjiang for the recent 40 years (J). Journal of Desert Research, 2003, 23(5): 521 - 526.)
- (26) 袁玉江, 谢国辉, 魏文寿, 等. 天山山区与南北疆夏季温度变化对比分析 (J). 气象科技, 2005, 33(2): 152 - 155. (Yuan Yujiang, Xie Guohui, Wei Wenshou, et al. Similarities and differences between summer temperature changes in Tianshan Mountainous region and Southern and Northern Xinjiang (J). Meteorological Science and Technology, 2005, 33(2): 152 - 155.)
- (27) 袁玉江, 魏文寿, 穆桂金. 天山山区近 40 年秋季气候变化特征与南、北疆比较 (J). 地理科学, 2004, 24(6): 674 - 679. (Yuan Yujiang, Wei Wenshou, Mu Guijin. Features of Autumn climate change in Tianshan Mountainous area for the recent 40 years and comparison with those in the Southern and Northern Xinjiang (J). Scientia Geographica Sinica, 2004, 24(6): 674 - 679.)
- (28) 韩萍, 薛燕, 苏宏超. 新疆降水在气候转型中的信号反映 (J). 冰川冻土, 2003, 25(2): 179 - 182. (Han Ping, Xue Yan, Su Hongchao. Precipitation signal of the climatic shift in Xinjiang region (J). Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(2): 179 - 182.)
- (29) 范丽红, 崔彦军, 何清, 等. 新疆石河子地区近 40 年气候变化特征分析 (J). 干旱区研究, 2006, 23(2): 334 - 338. (Fan Lihong, Cui Yanjun, He Qing, et al. Analysis on the climate change characteristics in the Shihezi region Xinjiang in recent 40 years (J). Arid Zone Research, 2006, 23(2): 334 - 338.)
- (30) 隆永兰, 夏新宇. 轮台县 1961 - 2008 年降水变化特征 (J). 沙漠与绿洲气象, 2009, 3(5): 36 - 39. (Long Yonglan, Xia Xinyu. The changing characteristics of precipitation in Luntai area during 1961 - 2008 (J). Desert and Oasis Meteorology, 2009, 3(5): 36 - 39.)
- (31) 丁一汇, 王守荣. 中国西北地区气候与生态环境概论 (M). 北京: 气象出版社, 2001: 25 - 28. (Ding Yihui, Wang Shourong. Generality on Climate and Eco-environment in Northwest Region of China (M). Beijing: Meteorological Press, 2001: 25 - 28.)
- (32) 袁玉江, 何清, 喻树龙. 天山山区近 40 年降水变化特征与南、北疆的比较 (J). 气象科学, 2004, 24(2): 220 - 226. (Yuan Yujiang, He Qing, Yu Shulong. Features of annual precipitation change in Tianshan Mountainous area for the recent 40 years and comparison with those in the Southern and Northern Xinjiang (J). Scientia Meteorologica Sinica, 2004, 24(2): 220 - 226.)
- (33) 袁玉江, 何清, 穆桂金. 天山山区近 40 年夏季降水变化及与南、北疆的比较 (J). 冰川冻土, 2003, 25(3): 331 - 335. (Yuan Yujiang, He Qing, Mu Guijin. Summer precipitation change for recent 40 years in the Tianshan mountains and compared with southern and northern Xinjiang regions (J). Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(3): 331 - 335.)
- (34) 吴纯渊, 袁玉江. 天山山区近 40 年冬季降水变化特征与南、北疆的比较 (J). 干旱区资源与环境, 2005, 19(2): 87 - 90. (Wu Chunyuan, Yuan Yujiang. Comparison of features of winter precipitation change among Tianshan Mountainous area, Southern and Northern Xinjiang in recent 40 years (J). Journal of Arid Land Resources and Environment, 2005, 19(2): 87 - 90.)
- (35) 刘敏, 沈彦俊, 曾燕, 等. 近 50 年中国蒸发皿蒸发量变化趋势及原因 (J). 地理学报, 2009, 64(3): 259 - 269. (Liu Min, Shen Yanjun, Zeng Yan, et al. Changing trend of pan evaporation and its cause over the past 50 years in China (J). Acta Geographica Sinica, 2009, 64(3): 259 - 269.)
- (36) 刘波, 马柱国, 冯锦明, 等. 1960 年以来新疆地区蒸发皿蒸发与实际蒸发之间的关系 (J). 地理学报, 2008, 63(11): 1132 - 1139. (Liu Bo, Ma Zhuguo, Feng Jinming, et al. The relationship between pan evaporation and actual evapotranspiration in Xinjiang since 1960 (J). Acta Geographica Sinica, 2008, 63(11): 1132 - 1139.)
- (37) Brntsart W, Parlange M B. Hydrologic cycle explains the evaporation paradox (J). Nature, 1998, 396: 30.
- (38) 谢贤群, 王菱. 中国北方近 50 年潜在蒸发的变化 (J). 自然资源学报, 2007, 22(5): 683 - 691. (Xie Xianqun, Wang Ling. Changes of potential evaporation in Northern China over the past 50 years (J). Journal of Natural Resources, 2007, 22(5): 683 - 691.)
- (39) 张明军, 李瑞雪, 贾文雄, 等. 中国天山山区潜在蒸发量的时空变化 (J). 地理学报, 2009, 64(7): 798 - 806. (Zhang Mingjun, Li Ruixue, Jia Wenxiong, et al. Temporal and spatial change of the potential evaporation from 1960 to 2006 in Tianshan Mountainous (J). Acta Geographica Sinica, 2009, 64(7): 798 - 806.)

- (40) Pinker R T, Zhang B, Dutton E G. Do satellites detect trends in surface solar radiation? (J). *Science*, 2005, 308: 850 – 854.
- (41) 吕宁, 刘荣高, 刘纪远. 1998 – 2002 年中国地表太阳辐射的时空变化分析 (J). *地球信息科学学报*, 2009, 11 (5): 623 – 630. (Lv Ning, Liu Ronggao, Liu Jiyuan. The spatio-temporal variation of downward shortwave radiation over China from 1998 to 2002 (J). *Journal of Geo-information Science*, 2009, 11 (5): 623 – 630.)
- (42) 李晓文, 李维亮, 周秀骥. 中国近 30 年太阳辐射状况研究 (J). *应用气象学报*, 1998, 9 (1): 24 – 31. (Li Xiaowen, Li Weiliang, Zhou Xiujie. Analysis of the solar radiation variation of China in recent 30 years (J). *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1998, 9 (1): 24 – 31.)
- (43) 陈志华, 石广玉, 车慧正. 近 40 a 来新疆地区太阳辐射状况研究 (J). *干旱区地理*, 2005, 28 (6): 734 – 739. (Chen Zhihua, Shi Guangyu, Che Huizheng. Analysis of the solar radiation of Xinjiang Uygur Autonomous Region in recent 40 years (J). *Arid Land Geography*, 2005, 28 (6): 734 – 739.)
- (44) 张月华, 李景林, 窦新英, 等. 乌鲁木齐市晴天太阳辐射变化特征 (J). *沙漠与绿洲气象*, 2007, 1 (2): 32 – 35. (Zhang Yuehua, Li Jinglin, Dou Xinying, et al. Variation of total solar radiation at the clear day in Urumqi (J). *Desert and Oasis Meteorology*, 2007, 1 (2): 32 – 35.)
- (45) 王晓梅, 田惠平, 刘卫平. 乌鲁木齐市 1955 – 2007 年日照特征变化分析 (J). *沙漠与绿洲气象*, 2008, 2 (5): 38 – 40. (Wang Xiaomei, Tian Huiping, Liu Weiping. Variation of sunshine hours in Urumqi from 1955 to 2007 (J). *Desert and Oasis Meteorology*, 2008, 2 (5): 38 – 40.)
- (46) 阿布都克日木·阿巴司. 喀什市 1952 – 2006 年日照时数时间变化特征 (J). *沙漠与绿洲气象*, 2008, 2 (3): 22 – 24. (Anudoukerimu Abasi. The change characteristics of sunshine hours in 1952 – 2006 in Kashi City (J). *Desert and Oasis Meteorology*, 2008, 2 (3): 22 – 24.)
- (47) 刘卫平, 魏文寿, 唐湘玲. 阿克苏地区近 45 年日照时数变化特征 (J). *干旱区地理*, 2008, 31 (2): 197 – 202. (Liu Weiping, Wei Wenshou, Tang Xianglin. Variation of sunshine hour in recent 45 years in Aksu Prefecture (J). *Arid Land Geography*, 2008, 31 (2): 197 – 202.)
- (48) 王遵娅, 丁一汇, 何金海, 等. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析 (J). *气象学报*, 2004, 62 (2): 228 – 236. (Wang Zunya, Ding Yihui, He Jinhai, et al. An updating analysis of the climate change in China in recent 50 years (J). *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 62 (2): 228 – 236.)
- (49) 道然·加帕依, 车罡. 新疆东部地区风速的年代际变化及其成因 (J). *干旱气象*, 2008, 26 (3): 14 – 21. (Dawran Japay, Che Gang. Inter-decadal variation characteristics of wind speed in East Xinjiang (J). *Arid Meteorology*, 2008, 26 (3): 14 – 21.)
- (50) 邢文渊, 马雷凯, 肖继东, 等. 北疆地区地表湿润指数变化分析 (J). *沙漠与绿洲气象*, 2009, 3 (4): 9 – 12. (Xing Wenyan, Ma Leikai, Xiao Jidong, et al. Analysis of the earth's surface humidity index change in the North of Xinjiang (J). *Desert and Oasis Meteorology*, 2009, 3 (4): 9 – 12.)
- (51) 邢文渊, 刘志军, 肖继东, 等. 南疆地区地表湿润指数变化分析 (J). *新疆师范大学学报: 自然科学版*, 2009, 28 (3): 4 – 7. (Xing Wenyan, Liu Zhijun, Xiao Jidong, et al. The analysis of the earth's surface humidity index change in south of Xinjiang (J). *Journal of Xinjiang Normal University: Natural Sciences Edition*, 2009, 28 (3): 4 – 7.)
- (52) 王劲松, 郭江勇, 倾继祖. 一种 K 干旱指数在西北地区春旱分析中的应用 (J). *自然资源学报*, 2007, 22 (5): 709 – 717. (Wang Jinsong, Guo Jiangyong, Qing Jizu. Application of a kind of K drought index in the spring drought analysis in Northwest China (J). *Journal of Natural Resources*, 2007, 22 (5): 709 – 717.)
- (53) 姜大膀, 苏明峰, 魏荣庆, 等. 新疆气候的干湿变化及其趋势预估 (J). *大气科学*, 2009, 33 (1): 90 – 98. (Jiang Dabang, Su Mingfeng, Wei Rongqing, et al. Variation and projection of drought and wet conditions in Xinjiang (J). *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2009, 33 (1): 90 – 98.)
- (54) 刘国纬, 汪静萍. 中国陆地 – 大气系统水分循环研究 (J). *水科学进展*, 1997, 8 (2): 99 – 107. (Liu Guowei, Wang Jingping. Study on hydrologic cycle of land atmosphere system of China (J). *Advances in Water Science*, 1997, 8 (2): 99 – 107.)
- (55) 周聿超. 新疆河流水文水资源 (M). 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 1999: 1 – 145. (Zhou Yuchao. Hydrology and Water Resources in Xinjiang Rivers (M). Urumqi: Xinjiang Sci-Tech and Public Health Press, 1999: 1 – 145.)
- (56) 俞亚勋, 王劲松, 李青燕. 西北地区空中水汽时空分布及变化趋势分析 (J). *冰川冻土*, 2003, 25 (2): 142 – 149. (Yu Yaxun, Wang Jingsong, Li Qingyan. Spatial and temporal distribution of water vapor and its variation trend in atmosphere over Northwest China (J). *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25 (2): 142 – 149.)
- (57) Loaciga H A, Valdes J B, Vogel R, et al. Global warming and the hydrologic cycle (J). *Journal of Hydrology*, 1996, 174: 83 – 127.
- (58) 刘景时, 魏文寿, 黄玉英, 等. 天山玛纳斯河冬季径流对暖冬和冻土退化的响应 (J). *冰川冻土*, 2006, 28 (5): 656 – 662. (Liu Jingshi, Wei Wenshou, Huang Yuying, et al. Hydrological response of winter stream flow to climate change and permafrost degradation in Manas watershed, Tianshan Mountains (J). *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28 (5): 656 – 662.)
- (59) 冯思, 黄云, 许有鹏. 全球变暖对新疆水循环影响分析 (J). *冰川冻土*, 2006, 28 (4): 500 – 505. (Feng Si, Huang Yun, Xu Youpeng. Impact of global warming on the water cycle in Xinjiang region (J). *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28 (4): 500 – 505.)
- (60) 谢自楚, 王欣, 康尔泗, 等. 中国冰川径流的评估及其未来 50 a 变化趋势预测 (J). *冰川冻土*, 2006, 28 (4): 457 – 466. (Xie Zichu, Wang Xin, Kang Ersi, et al. Glacial runoff in China: An evaluation and prediction for the future 50 years (J). *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28 (4): 457 – 466.)
- (61) 李忠勤, 沈永平, 王飞腾, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川消融对气候变化的响应 (J). *气候变化研究进展*, 2007, 3 (3): 132 – 137. (Li Zhongqin, Shen Yongping, Wang Feiteng, et al. Response of melting ice to climate change in the Glacier No. 1 at the headwaters of Urumqi River, Tianshan Mountain (J). *Advances in Climate Change Research*, 2007, 3 (3): 132 – 137.)
- (62) 高晓清, 汤懋苍, 冯松. 冰川变化与气候变化关系的若干探讨 (J). *高原气象*, 2000, 19 (1): 9 – 16. (Gao Xiaqing, Tang Mao-

- cang, Feng Song. Discussion on the relationship between glacial fluctuation and climate change (J). *Plateau Meteorology*, 2000, 19 (1): 9–16.)
- (63) 李忠勤, 沈永平, 王飞腾, 等. 冰川消融对气候变化的响应: 以乌鲁木齐河源 1 号冰川为例 (J). *冰川冻土*, 2007, 29 (3): 333–342. (Li Zhongqin, Shen Yongping, Wang Feiteng, et al. Response of glacier melting to climate change: Take Urumqi glacier No. 1 as an example (J). *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29 (3): 333–342.)
- (64) Bayard D, Stihli M, Parriaux A, et al. The influence of seasonally frozen soil on the snowmelt runoff at two Alpine sites in southern Switzerland (J). *Journal of Hydrology*, 2005, 309: 66–84.
- (65) 刘永泉, 吴颜. 全球变暖对中国新疆地区的可能影响及对策浅议 (J). *新疆师范大学学报: 自然科学版*, 2007, 26 (3): 214–216. (Liu Yongquan, Wu Yan. The discusses about the possible impact on Xinjiang caused by global warming and the countermeasure (J). *Journal of Xinjiang Normal University: Natural Sciences Edition*, 2007, 26 (3): 214–216.)
- (66) IPCC. *Climate Change 1995: The Science of Climate Change* (M). Cambridge: Cambridge University Press, 1996, 572.
- (67) Fichet T, Morales M M A. Modeling the influence of snow accumulation and snow-ice formation on the seasonal cycle of the Antarctic sea-ice cover (J). *Climate Dynamics*, 1999, 15: 251–268.
- (68) 李培基. 新疆积雪对全球变暖的响应 (J). *气象学报*, 2001, 59 (4): 491–500. (Li Peiji. Response of Xinjiang snow cover to climate change (J). *Acta Meteorologica Sinica*, 2001, 59 (4): 491–500.)
- (69) 杨青, 崔彩霞, 孙除荣, 等. 1959–2003 年中国天山积雪的变化 (J). *气候变化研究进展*, 2007, 3 (2): 80–84. (Yang Qing, Cui Caixia, Sun Churong, et al. Snow cover variation during 1959–2003 in Tianshan Mountains, China (J). *Advances in Climate Change Research*, 2007, 3 (2): 80–84.)
- (70) 刘景时. 气候变化对冰川融水型河流水情的影响: 以玛纳斯河为例 (J). *干旱区资源与环境*, 1994, 8 (2): 40–46. (Liu Jing-shi. Study on influences of climatic changes on meltwater hydrology: Taking Manas river basin as an example (J). *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1994, 8 (2): 40–46.)
- (71) 王建, 李硕. 气候变化对中国内陆干旱区山区融雪径流的影响 (J). *中国科学: D 辑*, 2005, 35 (7): 664–667. (Wang Jian, Li Shuo. Effect of climatic change on snowmelt runoffs in mountainous regions of inland rivers in Northwestern China (J). *Science in China: Series D*, 2005, 35 (7): 664–667.)
- (72) 张国威, 吴素芬, 王志杰. 西北气候环境转型信号在新疆河川径流变化中的反映 (J). *冰川冻土*, 2003, 20 (2): 183–187. (Zhang Gouwei, Wu Sufen, Wang Zhijie. The signal of climatic shift in Northwest China deduced from river runoff change in Xinjiang region (J). *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 20 (2): 183–187.)
- (73) Li Weihong, Chen Yaning, Hao Xingming, et al. Responses of streamflow to climate change in the Northern slope of Tianshan Mountains in Xinjiang—A case study of the Toutun River basin (J). *Science in China: Series D*, 2006, 36 (Supl. 2): 39–44.
- (74) 周自江, 王锡镐, 牛若芸. 近 47 年中国沙尘暴气候特征研究 (J). *应用气象学报*, 2002, 13 (2): 193–200. (Zhou Zijiang, Wang Xiwen, Niu Ruoyun. Climate characteristics of sandstorm in China in recent 47 years (J). *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 2002, 13 (2): 193–200.)
- (75) 李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域: 土地利用/土地覆被变化的国际研究动向 (J). *地理学报*, 1996, 51 (6): 553–558. (Li Xiubin. A review of the international researches on land use/land cover change (J). *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51 (6): 553–558.)
- (76) 李克让, 陈育峰, 黄玫, 等. 气候变化对土地覆被变化的影响及其反馈模型 (J). *地理学报*, 2000, 55 (1): 57–63. (Li Kerang, Chen Yufeng, Huang Mei, et al. Model studies of the impacts of climate change on land cover and its feedback (J). *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55 (1): 57–63.)
- (77) 马明国, 角媛梅, 程国栋. 利用 NOAA-CHAIN 监测近 10 a 来中国西北土地覆盖的变化 (J). *冰川冻土*, 2002, 24 (1): 68–72. (Ma Mingguo, Jiao Yuanmei, Cheng Guodong. Change in land coverage in Northwest China during the past decade monitoring by NOAA-CHAIN (J). *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24 (1): 68–72.)
- (78) 慈龙骏. 全球变化对我国荒漠化影响 (J). *自然资源学报*, 1994, 9 (4): 289–301. (Ci Longjun. Influence of global change on China's desertification (J). *Journal of Natural Disasters*, 1994, 9 (4): 289–301.)
- (79) 赵名茶. 全球气候变化对我国干旱区影响分析 (J). *干旱区资源与环境*, 1993, 7 (3/4): 11–17. (Zhao Mingcha. An analysis of influence of global climatic change on arid region of China (J). *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1993, 7 (3/4): 11–17.)
- (80) 魏文寿, 袁玉江, 喻树龙, 等. 中国天山山区 235 a 气候变化及降水趋势预测 (J). *中国沙漠*, 2008, 28 (5): 803–808. (Wei Wenshou, Yuan Yujiang, Yu Shulong, et al. Climate change in recent 235 years and trend prediction in Tianshan Mountainous area (J). *Journal of Desert Research*, 2008, 28 (5): 803–808.)
- (81) 姜逢清, 朱诚, 穆桂金, 等. 当代新疆洪、旱灾害扩大化: 人类活动的影响分析 (J). *地理学报*, 2002, 57 (1): 57–66. (Jiang Fengqing, Zhu Cheng, Mu Guijin, et al. Recent magnification of flood and drought calamities in Xinjiang: An analysis of anthropogenetic effects (J). *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57 (1): 57–66.)
- (82) 姜逢清, 胡汝驥. 近 50 年来新疆气候变化与洪、旱灾害扩大化 (J). *中国沙漠*, 2004, 24 (1): 35–40. (Jiang Fengqing, Hu Ruji. Climate change and flood and drought disasters in Xinjiang during recent 50 years (J). *Journal of Desert Research*, 2004, 24 (1): 35–40.)
- (83) 李燕. 近 40 a 来新疆河流洪水变化 (J). *冰川冻土*, 2003, 25 (3): 342–346. (Li Yan. Change of river flood and disaster in Xinjiang during past 40 years (J). *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25 (3): 342–346.)
- (84) 姜逢清, 胡汝驥, 杨跃辉. 新疆洪灾时间序列突变及其气候原因分析 (J). *冰川冻土*, 2004, 26 (6): 674–681. (Jiang Fengqing, Hu Ruji, Yang Yuehui. Abrupt change in the time sequences of flood disasters in Xinjiang and its possible climatic reasons (J). *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26 (6): 674–681.)

(85) 姜逢清,胡汝骥,王亚俊,等. 突出洪灾事件对新疆潜在气候转型的响应 (J). 自然资源学报,2003,12(2): 140 - 146. (Jiang Fengqing,Hu Ruji,Wang Yajun,et al. Response of extreme flood events to potential climate change from warm-dry to warm-wet in Xinjiang (J). Journal of Natural Disasters,2003,12(2): 140 - 146.)

(86) 何清,杨青,李红军. 新疆 40 a 来气温、降水和沙尘天气变化 (J). 冰川冻土,2003,25(4): 423 - 427. (He Qing,Yang Qing,Li Hongjun. Variations of air temperature,precipitation and sand-dust weather in Xinjiang in past 40 years (J). Journal of Glaciology and Geocryology,2003,25(4): 423 - 427.)

(87) 林而达,杨修. 全球变化对农业的影响评价及适应对策 (J). 地球科学进展,1995,10(6): 597 - 604. (Lin Erda,Yang Xiu. Global change impacts on agriculture and its adaptation (J). Advance in Earth Sciences,1995,10(6): 597 - 604.)

(88) 苏宏超,沈永平,韩萍,等. 新疆降水特征及其对水资源和生态环境的影响 (J). 冰川冻土,2007,29(3): 343 - 350. (Su Hongchao,Shen Yongping,Han Ping,et al. Precipitation and its impact on water resources and ecological environment in Xinjiang region (J). Journal of Glaciology and Geocryology,2007,29(3): 343 - 350.)

(89) Gao Xuejie,Zhao Zongci,Ding Yihui,et al. Climate change due to greenhouse effects in China as simulated by regional climate model (J). Advance in Atmosphere Science,2001,18: 1 224 - 1 230.)

(90) 赵宗慈,丁一汇,徐影,等. 人类活动对 20 世纪中国西北地区气候变化影响检测和 21 世纪预测 (J). 气候与环境研究,2003,8(1): 26 - 34. (Zhao Zongci,Ding Yihui,Xu Ying,et al. Detection and prediction of climate change for the 20th and 21st century due to human activity in Northwest China (J). Climatic and Environmental Research,2003,8(1): 26 - 34.)

(91) 丁一汇. 中国西部环境变化的预测 (C) //秦大河. 中国西部环境演变评估: 第二卷 (M). 北京: 科学出版社,2002: 16 - 46. (Ding Yihui. Prediction of environmental change in western China (C) //Qin Dahe. Assessment on Environment of Western China: Vol. 2 (M). Beijing: Science Press,2002: 16 - 46.)

(92) Arnell N W. Climate change and global water resources (J). Global Environmental Change,1999,9(5): 31 - 49.

(93) 赵慧霞,吴绍洪,姜鲁光. 自然生态系统响应气候变化的脆弱性评价研究进展 (J). 应用生态学报,2007,8(2): 445 - 450. (Zhao Huixia,Wu Shaohong,Jiang Luguang. Research advances in vulnerability assessment of natural ecosystem response to climate change (J). Chinese Journal of Applied Ecology,2007,8(2): 445 - 450.)

(94) 於琨,曹明奎,李克让. 全球气候变化背景下生态系统的脆弱性评价 (J). 地理科学进展,2005,24(1): 61 - 69. (Yu Li,Cao Mingkui,Li Kerang. An overview of assessment of ecosystem vulnerability to climate change (J). Progress in Geography,2005,24(1): 61 - 69.)

New Progress of the Study on Climate Change in Xinjiang

HE Jin-yun¹, ZHANG Ming-jun^{1,2}, WANG Peng¹, XIN Hong¹, HUANG Xiao-yan¹
(1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;
2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Global warming has attracted much more attention all over the world. In this paper, the new progress of the studies on climate change in Xinjiang since the 1990s is reviewed from the aspects of fact, impact, counter-measure and prediction of climate change. The results are as follows: (1) Holistically, both temperature and precipitation in Xinjiang have been increased, and climate in Xinjiang has trended towards warming-wetting type since recent 50 years; (2) Such climate change results in a redistribution of water and heat resources in Xinjiang and brings about a tremendous effect on water resources, ecological environment, agriculture, etc.; (3) The ecosystem vulnerability assessment is a quantitative evaluation on ecological environment. The studies on it, however, are so insufficient and need to be further explored. Moreover, there is a big uncertainty of predicting climate change, and all the models of predicting climate change are need to be improved so as to increase the prediction accuracy.

Key words: climate change; countermeasure; agriculture; variation prediction; Xinjiang