doi:10.3969/j.issn 0253-9608.2012.01.001

气候变化对黄河径流以及源区生态和冻土环境的影响*

黄荣辉① 周德刚②

①中国科学院院士,②助理研究员,中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心,北京 100190

*国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2009CB421405);国家公益性行业(海洋)专项(GYHY201005192);国家自然科学基金委员会重大国际合作基金项目(40810059005/D0507)

关键词 气候变化 黄河 径流 生态 冻土

本文综述了关于黄河源区和上游地区气候变化及其对黄河径流影响的研究及其他有关研究,并进一步讨论了气候变化对黄河源区和上游径流以及源区生态和环境的影响。研究表明:从 20 世纪 90 年代初起黄河源区和上游年径流量锐减,它严重影响了黄河中、下游年径流量,并引起黄河下游在 20 世纪 90 年代断流天数的增加;并且还指出,黄河上游和源区从 20 世纪 90 年代初到新世纪初降水的减少可能是导致黄河源区和上游径流锐减的主要原因,而黄河源区降水强度的减弱对于黄河源区径流在 20 世纪 90 年代的锐减也有一定影响;此外,本文还表明了从 20 世纪 80～90 年代到新世纪初黄河源区气温的明显上升并没有导致此区域蒸发量的太大变化,它对径流变化影响不大,但对此地区植被和冻土退化有重要影响。

1 引言

黄河流域是中华民族的摇篮地,黄河是中华民族的母亲河。黄河流经青海、甘肃、宁夏、内蒙、陕西、山西、河南、河北和山东等九省。她不仅灌溉着这九省的农田,而且供给这九省和北京、天津两市部分城乡居民的用水。虽然黄河年总径流量不大,大约只有 580 亿 m^3,只相当于长江年流量的 1/16,但她的流程很长,达 5 486 km。承担着全国 15%耕地面积和 12%人口的供水任务(引自人民政协报,2010)。由于黄河又长,水流又细,故她受降水的影响很大。

受全球气候变暖的影响,从 20 世纪 80 年代以后中国东北、华北、西北气温普遍升高。黄荣辉等[1-4]的研究表明:中国西北自从 20 世纪 70 年代中后期到 21 世纪初夏季降水增加,气温升高,而华北地区降水减少,气温升高。并且,施雅风[5]的研究也表明了从 20 世纪 80 年代起中国西北气候从暖干变暖湿。由于气候的年代际变化,从 20 世纪 70 年代中后期开始西北地区夏季降水增加,气温升高。

与西北地区气候变化相关联,黄河上游气候也发生很明显的年代际变化,这导致了从 20 世纪 90 年代起黄河源区和上游的径流量大幅减少[6-10],严重影响着黄河中、下游的径流量,致使在 90 年代黄河下游发生断流(图 1),从而严重影响华北地区的水资源。华北水资源缺乏不仅影响着此地区的工农业生产,而且也影响此地区的城乡人民用水。为此,国家不得不花费巨资实施南水北调工程,从长江调水到华北地区,以缓和华北地区水资源的缺乏。

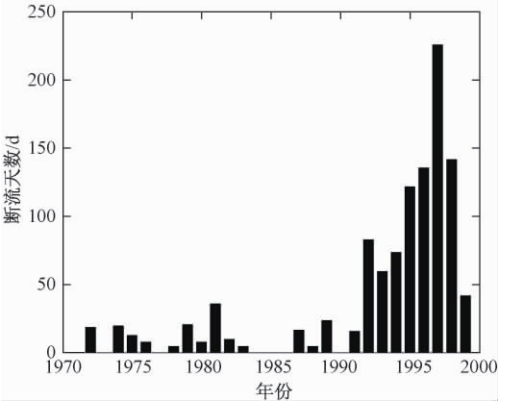


图 1　黄河下游利津站黄河断流天数的年际变化(资料来源于黄河水利委员会)

上述的研究中有两个问题值得进一步关注:一是从 20 世纪 90 年代初以来黄河上游(特别是源区)径流大幅度减少的原因是什么,关于这个问题,有的学者认为黄河上游径流的减少可能是由于上游气温上升所导致的蒸发增强而引起的[11];而有的学者认为,黄河上游降水

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

减少是导致黄河径流减少的直接原因[6-8,12]，因此，黄河源区和上游流域夏季降水和气温的变化如何影响此河段的径流，这是值得进一步关注的科学问题；二是黄河源区和上游不仅径流锐减，而且源区生态和冻土退化严重，这与此区域的气候变化有何联系？为此，在以前研究的基础上，本文进一步讨论中国黄河源区和上游地区降水和气温的年代际变化对黄河源区和上游径流量以及源区的生态和环境的影响，并且还探讨了黄河源区和上游径流量的年代际变化对黄河下游径流量和华北水资源的影响。

2 黄河上游地区和源区气候的年代际变化特征及其与西北地区气候变化的差异

如图 2 所示，黄河上游地区系指兰州以上的黄河流域，此流域涉及范围广，它包括了半干旱区和高原的高寒半湿润地区，年均降水量 200～600 mm；并且，此流域处于高海拔地区，气温偏低，年平均气温只有 2.6 ℃。由于此流域处于高海拔地区，气温又低，故蒸发量不大，加上降水又不算太少，这为黄河提供了比较稳定的基流。本节利用黄河上游和源区气象观测站 1960～2008 年的观测资料的分析结果，讨论黄河上游地区和源区降水和气温的年代际变化。



图 2　黄河上游地区气象观测站分布图

2.1 黄河上游地区降水的年代际变化特征及其与西北地区降水变化的差异

黄荣辉等[8]利用中国各测站 1951～2000 年降水和气温的月平均资料分析了中国各区域年平均和夏季降水和气温各年代的变化特征。结果表明：中国西北地区夏季降水量有很明显的年代际变化，它经历了 20 世纪 60～70 年代的降水偏少期之后，从 80 年代起到 90 年代末降水量增加，在新世纪初北疆地区降水继续增加，但西北东部降水开始减少。

黄河上游地区虽处于中国西北地区，但此地区降水的年代际变化特征与西北地区降水变化有一些不同。为了更好地讨论黄河上游地区降水的变化特征，本文利用黄河上游地区红原、若尔盖、玛多、达日、兴海、贵德和兰州等测站 1960～2008 年的降水观测资料，分析了黄河上游地区平均的年降水量年际和年代际变化，见图 3(a)。从图 3(a)可以看到：黄河上游地区气候平均的年降水量约 490 mm，大约与现在华北平原北部的年降水量相当；并且，它有一定的年际和年代际变化，年际变率可达±100 mm，大约为年降水量的±20%左右，比中国东部年降水量的年际变率略小。此外，从图 3(a)还可以看到，黄河上游 1960～2008 年期间降水经历了 3 个年代际变化阶段，这 3 个阶段是：从 20 世纪 60 年代初经 70 年代初到 80 年代后期是降水相对偏多期，此时期平均年降水量可达 495.5 mm；从 90 年代到 2002 年此地区的降水又变为相对偏少，平均年降水量只有 462.5 mm，约减少了 33.00 mm；从 2003 年到 2008 年黄河上游年降水量又呈增多趋势，平均年降水量可达 514.9 mm。

上述结果表明了黄河上游地区降水的年代际变化不同于西北地区，西北地区的北部无论年降水量或者夏季降水量在 20 世纪 90 年代仍继续偏多，而黄河上游地区从 90 年代到新世纪初降水量偏少；并且，黄河上游地

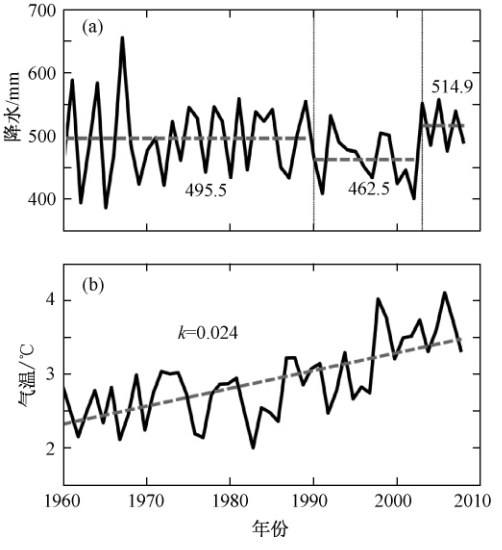


图 3　1960～2008 年黄河上游地区平均的年降水量(a)和年平均气温(b)的年际变化((b)中虚线表示变化趋势)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

区降水的年代际变化不是很明显，降水量的年代际变率大约为±30 mm 左右，相当于气候平均值的 6.1%，它比华北地区降水的年代际变率小得多。并且，如图 3(a)所示，黄河上游地区从 20 世纪 90 年代到 2002 年平均的年降水量相对于 20 世纪 80 年代平均的降水量也仅减少了 7%左右。因此可以说，黄河上游年降水量的年代际变率不是太明显。

2.2 黄河上游地区气温的年代际变化特征及其与西北地区气温变化的差异

黄荣辉等[8]的研究表明了西北和华北地区从 20 世纪 80 年代起到 2008 年气温呈明显的上升趋势，气温的升高对此两地区的蒸发量会产生影响。

由于黄河上游处于高原的高寒地区，这里气温终年很低，但它也有明显的年际和年代际变化。黄河上游地区气温的年代际变化可以从红原、若尔盖、玛多、达日、兴海、贵德和兰州等黄河上游测站的年平均气温变化看出[8]。为了更好地分析黄河上游地区平均气温的变化特征，本文利用上述测站 1960～2008 年的气温观测资料，分析了黄河上游地区年平均气温的年际和年代际变化，见图 3(b)。从图 3(b)可以看到：黄河上游地区年平均气温不仅有较明显的年际变化，而且有很明显的年代际变化。在 1960～2008 年期间，黄河上游地区气温的年代际变化经历了 3 个阶段：20 世纪 60～70 年代为相对偏冷期；从 70 年代末到 80 年代中后期为正常期；从 80 年代中后期到 2008 年为相对偏暖期，此地区的气温从 80 年代后期之后上升非常明显，相对于 60 年代约上升了 1.0 ℃以上。并且，正如图 3(b)中虚线所示，黄河上游地区年平均气温从 20 世纪 60 年代起到新世纪初一直呈上升趋势，每 10 年此区域气温大约上升了 0.24 ℃。气温明显上升有可能使该地区的蒸发量加大，这不利于此流域径流的产生。

上述结果表明了黄河上游地区气温的年代际变化趋势与西北地区气温的变化趋势一致，都经历了 20 世纪 60～70 年代的偏冷期，80～90 年代和新世纪初的偏暖期。然而，黄河上游地区气温偏暖要晚于西北地区气温的变暖，西北地区的部分地区在 80 年代气温已偏暖，90 年代已明显偏暖，而黄河上游地区到 80 年代后期才开始偏暖。

2.3 黄河源区降水和气温的年代际变化特征

黄河源区处于高寒的半湿润区，这里海拔高、降水较多、气温低。图 4(a)和图 4(b)分别利用黄河源区的红原、若尔盖、玛多、达日和兴海五个测站的 1960～2008 年月降水和气温资料所计算的此区域平均的年降水量和年平均气温的年际和年代际变化。如图 4(a)和图 4(b)所示，黄河源区无论年降水或是年平均气温的年代际变化特征基本上与黄河上游地区平均的年降水和年平均气温的年代际变化相一致。从图 4(a)可以看到，黄河源区在 1960～2008 年期间降水也经历了三个年代际变化阶段：从 20 世纪 60 年代经 70 年代到 80 年代末为降水相对偏多期，此时期黄河源区平均年降水量大约可达 524.5 mm；但从 20 世纪 90 年代初到 2002 年，黄河源区平均年降水量只有 491.5 mm，相对于 80 年代，此时期降水大约减少了 33.0 mm；从 2003 年到 2008 年黄河源区年降水量又呈增多趋势，平均年降水量达 538.3 mm。并且，从图 4b 可以看到，在 1960～2008 年期间，黄河源区的气温也经历了三个阶段：在 20 世纪 60～70 年代为相对偏冷期；从 70 年代末到 80 年代中后期为正常期；80 年代中后期到 2008 年为相对偏暖期。正如图 4(b)中虚线所示，黄河源区年平均气温从 20 世纪 60 年代起到新世纪一直呈上升趋势，每 10 年此区域气温大约上升 0.31 ℃。黄河源区气温明显上升将对此区域的生态和冻土带来影响。

比较图 4(a)与图 3(a)，可以看到，黄河源区年降水量与上游地区年降水量的年代际变化趋势相一致，都经历了三个阶段，无论是黄河上游地区或是黄河源区年降水量在 20 世纪 90 年代均呈减少趋势。比较图 4(b)与图 3(b)，同样可以看到，黄河源区平均气温的年代际变化与上游地区平均气温的变化趋势相一致，都从 20 世纪 60 年代起到新世纪初一直呈上升趋势，特别从 80 年代中后期开始气温都呈明显变暖趋势。

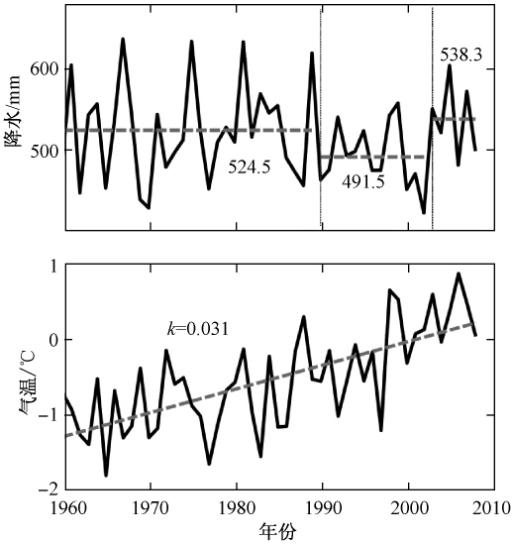


图 4　1960～2008 年黄河源区平均的年降水量(a)和年平均气温(b)的年际变化((b)中虚线表示变化趋势)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3 黄河源区和上游径流量年际和年代际变化及其对下游和华北平原水资源的影响

根据刘昌明等[13]的研究，黄河源区年平均流量大约为204.7亿 m^3，可占到黄河多年平均径流量的35.3%，因此，黄河源区是黄河重要的产流区，并为黄河中、下游提供了较稳定的径流量。

3.1 黄河源区年径流量的变化

受气候变化的影响，黄河上游及源区的径流有很大的年际和年代际变化。图5是1960～2003年期间表征黄河源区径流量的唐乃亥水文站年径流量的年际变化。从图5可以看到：黄河源区的年径流量不仅有很大的年际变化，它大约为准6a周期，而且它有很大的年代际变化。从20世纪60年代到新世纪初，黄河源区年径流量经历了两个阶段的年代际变化：从20世纪60年代中期到80年代后期的相对偏丰期，平均年径流量达220.5亿 m^3；从90年代初到2008年的相对偏枯期，平均年径流量只有170.6亿 m^3，比80年代减少了近50亿 m^3，即减少了23%。

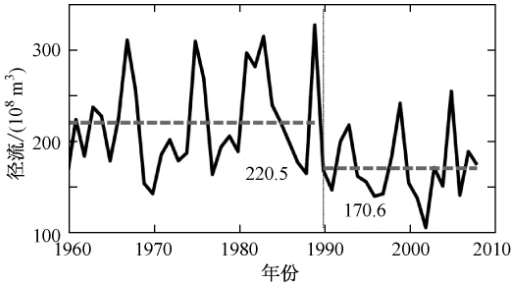


图5　黄河源区出水口唐乃亥水文站观测的黄河年径流量的年际和年代际变化

3.2 黄河上游年径流量的变化

图6是表征黄河上游径流量的兰州水文站年径流量的年际变化。比较图6与图5，可以看到，黄河上游的年径流量与源区的年径流量变化趋势基本相同，它不仅有很大的年际变化，而且有很大的年代际变化。黄河上游年径流量也同样经历了两个阶段的年代际变化：从20世纪60年代初期到80年代后期的相对偏丰期，平均年径流量达到357.7亿 m^3；从90年代初到新世纪初的相对偏枯期，平均年径流量只有256.0亿 m^3，比80年代大约减少了100亿 m^3，即减少了近30%。

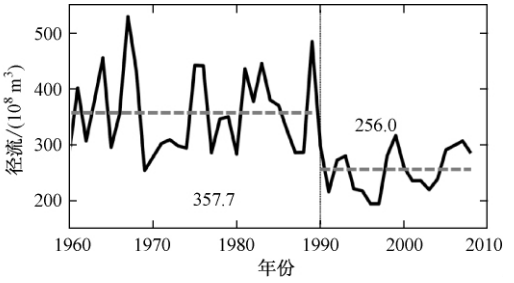


图6　黄河上游出水口兰州水文站观测的年径流量的年际变化

从上面的分析结果可以看到，无论是黄河源区或是上游地区，在20世纪90年代和新世纪初径流量锐减，大约比80年代减少了20%～30%，这势必对黄河中、下游径流产生严重影响。

3.3 黄河上游径流变化对黄河下游和华北水资源的影响

黄河从上游流经甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西等省，从花园口经河南、河北、山东流到渤海，是华北地区重要的水资源来源。黄河河水不仅是位于华北地区的内蒙、山西、河北、河南和山东等省部分地区的工农业生产和生态用水的主要来源，也是上述这些省份部分城乡居民日常生活用水的来源；并且，由于近年来天津和北京两市水资源缺乏，也从黄河调水来补充。因此，从黄河上游来水量的变化将直接影响黄河中游地区以及下游的华北地区水资源的变化。图7是表征黄河中游流量的郑州花园口水文站实测的各年代平均年径流量的变化。从图7可以看到，在20世纪50年代花园口平均天然径流量大约是484亿 m^3，而60年代上升到506.0亿 m^3，70年代又下降到380亿 m^3，80年代又上升到425.1亿 m^3[14]。然而，根据统计[14]，花园口1990～1996年平均的黄河年

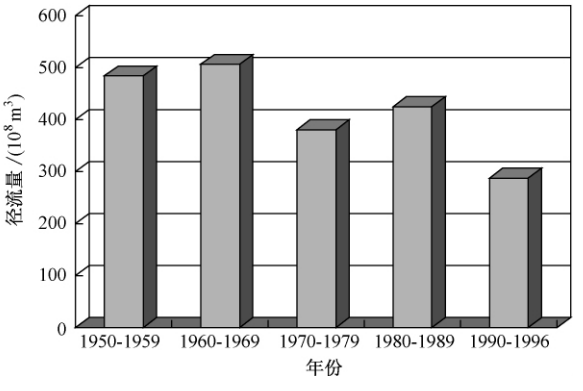


图7　花园口水文站实测黄河年径流量的年代际变化（资料来源于文献[14]和黄河水利委员会）

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

径流量只有 287.2 亿 m^3，比起 80 年代黄河径流量大约减少了 32.4%，这与黄河上游径流量在 90 年代的变化率大约一致。这表明了在 90 年代，从花园口流到黄河下游的径流量比 80 年代减少了 32.4%。

黄河中游径流量在 20 世纪 90 年代的锐减引起了黄河下游在 90 年代流量的锐减，从而导致黄河下游断流的天数增多，最多在 1997 年黄河利津站断流达 226 天(图 1)，而且断流河段变长，达 700 km 之长。黄河下游断流一方面是由于花园口以下的黄河下游地区工农业用水量增加所致，另一方面也是由于上游来水量减少所致。

从上面的分析可以看到，黄河中、下游径流量在 20 世纪 90 年代也呈明显锐减趋势，这与上游来水量的锐减有密切关系。因此，黄河源区和上游径流量的变化对于黄河中、下游径流量的变化有直接影响，特别对于华北地区水资源的变化有着重要影响。黄河下游径流量的锐减以及黄河断流不仅严重影响了华北地区工农业生产和生态用水，而且严重影响华北地区部分城乡居民的用水。

4 黄河源区和上游地区气候变化对黄河源区和上游年径流量的影响

上述分析结果表明了黄河无论源区或是上游年径流量在 20 世纪 90 年代发生了锐减现象，这种现象肯定是与此区域的气候变化密切相关的。正如张士锋等[11]的研究，黄河源区的水循环变化是与此区域的气候变化密切相关的。然而，到底是黄河源区和上游地区的降水变化引起的径流量变化大，还是由于气温变化通过蒸发影响径流量的变化大，这是值得进一步探讨的问题。

4.1 黄河源区和上游地区降水量变化对年径流量的影响

图 8 是唐乃亥测站所观测的 1960～2008 年年径流量标准化距平与黄河源区年降水量标准化距平的年际变化曲线。把图 8 虚线所表示的黄河源区年径流量标准化距平与图 8 中实线所表示的黄河源区年平均降水标准化距平的变化相比较，可以看到，黄河源区的年径流距平的年际变化与此区域年降水距平的年际变化有很好的相关性，它们之间的相关度可达 0.804，通过 99%的显著性检验。这正如张国胜等[12]和蓝永超等[6-7]所指出的黄河上游降水与径流有较好的关系。并且，从图 8 还可以看到，从 20 世纪 90 年代初一直到 2008 年黄河源区的年径流量有显著的减少，相对于 80 年代径流的偏丰期，从 90 年代到 2008 年(除 2005 年外)黄河源区的径流大约减少了 23%。然而，如图 3(a)所示，相对于 60～80 年代的年降水量，在 90 年代到新世纪初黄河源区的年降水量减少才不到 10%。这表明了从 20 世纪 90 年代到新世纪初黄河源区的降水变化对径流的变化产生一定的影响，但不能简单地只从降水量多少来解释黄河源区径流的变化。

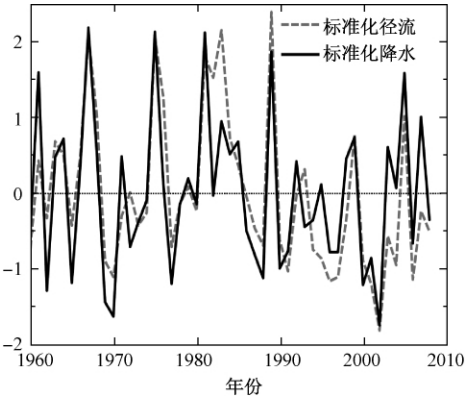


图 8　唐乃亥水文观测站实测 1960～2008 年黄河源区年径流标准化距平(虚线)与黄河源区年降水标准化距平(实线)的年际变化曲线

图 9 是 1960～2008 年表征黄河上游径流量的兰州水文站年径流量标准化距平(虚线)与年降水量标准化距平(实线)的年际变化。把图 9 中的虚线与实线相比较，可以看到，与源区径流和降水之间的关系一样，黄河上游地区的年径流距平变化与年降水距平也有显著的相关，它们之间的相关系数可达 0.64，通过了 99%显著性检验；并且，从图 9 还可以看到，从 20 世纪 90 年代初到 2008 年黄河上游年径流量也锐减，当然，黄河上游径流锐减与源区径流锐减有直接关系。虽然从 2003 年黄河上游年降

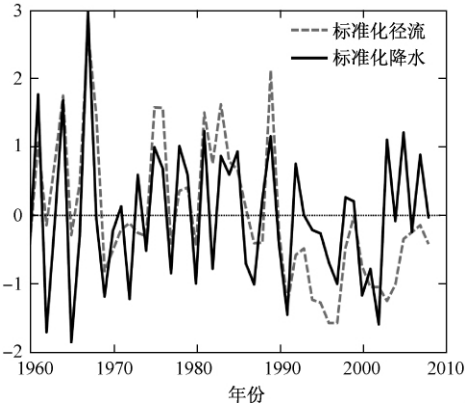


图 9　兰州水文观测站测得 1960～2008 年黄河上游年径流标准化距平(虚线)和年降水量的标准化距平(实线)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

水量已有增多，但年径流量没有显著增加。

从以上分析可以看到，在 20 世纪 90 年代无论是黄河源区或是黄河上游径流量都出现锐减，为何造成黄河源区径流在 90 年代到 21 世纪初出现如此大的锐减？这是一个值得进一步深入探讨的问题。

4.2 黄河源区降水强度变化对径流的影响

在 4.1 部分中已分析了黄河源区和上游地区降水对径流的影响，表明了黄河源区和上游的径流很大程度依赖于源区和上游地区的降水。但是，从 20 世纪 90 年代初到 2002 年，无论黄河源区或是上游地区年降水量减少不到 10%，为何却造成源区和上游径流量减少了 20%～30%之多，它是否与降水强度的变化有一定关系？为此，本小节进一步讨论黄河源区降水强度的变化。

由于考虑到黄河源区冬季降水较少，大部分降水集中在 3～10 月，故把降水的时间选取在每年的 3～10 月，并参照降雨强度的定义，把区域平均降水的强度分为弱降水（日降水量小于 10 mm）、中等强度降水（日降水量在 10～25 mm 之间）和强降水（日降水量大于 25 mm）类。图 10 是 1960～2008 年黄河源区上述三类不同强度降水发生天数的年际变化。从图 10 可以看到，与 80 年代相比，弱降水的天数在 90 年代没有明显的变化，但中等强度降水和强降水的天数从 80 年代后期起均有较大程度的减少，特别是强降水减少更为明显。如果把降水时间选取在 6～9 月，中等强度和强降水的天数从 80 年代后期呈现出更明显减弱的趋势（图略）。因

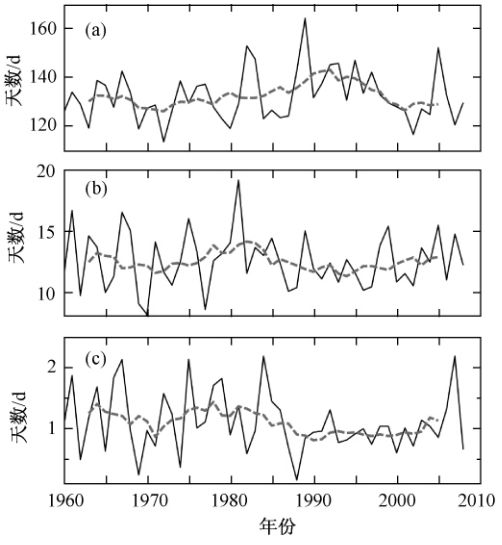


图 10　1960～2008 年黄河源区弱降水（a）、中等强度降水（b）和强降水（c）年发生次数的年际变化（图中虚线表示 7 年滑动平均）

此，无论在夏季或是 3～10 月份，黄河源区降水的强度均有明显的减弱趋势，特别是强降水的发生次数明显减少，这对该区域径流产生不利的影响。

一般来说，在降水过程中，当降水强度减弱时，地表直接径流出现的时间变长，形成地表直接径流的比例也减少，甚至不会形成地表径流，更多的降水将入渗到土壤中去，因此，黄河源区降水强度的减弱对于径流的产生会造成不利的影响。

从以上分析可以看到，黄河源区降水在 90 年代的减少是黄河源区从 90 年代初到 2008 年年径流量明显减少的重要原因，但降水强度的减弱对于径流的减少也有一定的影响。

4.3 黄河源区气温和蒸发变化对年径流量的影响

上述表明了黄河源区和上游地区的年平均气温从 20 世纪 60 年代到 2008 年呈明显上升趋势，相对于 20 世纪 60 年代，在新世纪初黄河源区的年平均气温约上升了 1.0 ℃。黄荣辉等[8]的研究表明了黄河源区的径流变化与年平均气温的年际变化没有显著的相关，它们之间的相关系数仅为－0.16。因此，黄河源区的径流受降水变化的影响要比受气温变化的影响更为显著。

区域气温一般要通过蒸发对区域径流产生影响。蒸发既是水力平衡的重要变量，又是地面能量交换过程中的重要环节，它受气象条件以及下垫面条件的综合作用，是一个复杂的过程。黄河源区气温的变化影响径流也主要通过蒸发作用，但与源区气候和径流变化的研究相比，对源区蒸发的研究相对较少，并且气候变暖对源区蒸散发影响的研究也还存在着较大的分歧，如李林等[15]和张士锋等[11]认为随着黄河源区气候的变化，蒸散量呈现逐年增加的趋势。但根据邱新法等[16]对黄河流域近 40 年蒸发皿的蒸发量（潜在蒸发能力）分析结果，区域蒸发皿蒸发量却呈现下降趋势。由于这两种观点存在着明显的差别，为此，周德刚和黄荣辉[17]利用黄河源区观测的气温、风速、湿度和日照等观测资料，不仅采用 FAO Penman-Monteith 方法对黄河源区的蒸发进行估算，而且还依据黄河源区长波辐射的观测资料对 FAO Penman-Monteith 公式中的长波辐射进行订正，再对黄河源区的蒸发进行计算。虽然利用这两种方法所计算黄河源区蒸发量在年代际变化趋势上有较好的一致性，但它们都比实际蒸发量偏大。最近，Yang 等[18]对 SiB2 陆面过程模式进行改进，并利用此改进模式对青藏高原的蒸发进行计算，利用此模式所计算的青藏高原的蒸发与实际蒸发比较接近，为此，本文采用 Yang 等[18]改进的 SiB2 陆面过程模式（即 ITPSiB2 模式）对黄河源

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

区各气象站点蒸发进行模拟，并对各站点进行加权平均得到黄河源区的蒸发距平。

图 11 是利用 ITPSiB2 陆面过程模式计算所得到的 1960～2006 年黄河源区蒸发距平的年际变化。从图 11 可以看到：黄河源区的蒸发在 20 世纪 60～70 年代还比较小；在 80 年代此区域蒸发处于相对平稳的变化；从 90 年代初到 21 世纪初黄河源区蒸发有所增加，但不太明显。并且，从图 11 中虚线可以看到，黄河源区蒸发从 20 世纪 60 年代起随着气温的上升而有所增加，但增加不是很明显，区域平均的蒸发量每年大约只增加了 0.75 mm。虽然黄河源区气温在 20 世纪 90 年代明显上升，这利于蒸发的增加，但源区的风速在减弱，它又不利于蒸发，这两者变化的抵消作用使得此区域的蒸发变化不大，因而径流变化与气温变化之间的关系并不是很好，而是主要依赖于降水量和降水强度的变化。

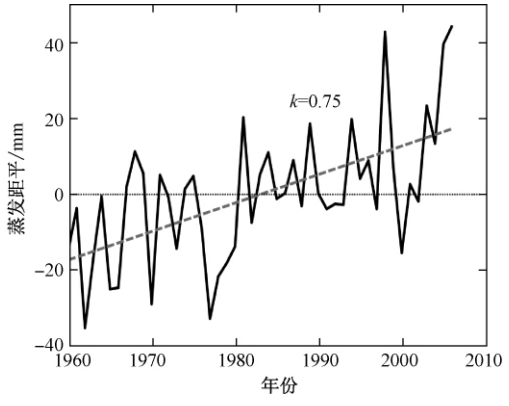


图 11　利用 ITPSiB2 陆面过程模式所估算的 1960～2006 年黄河源区平均的年蒸发量距平的年际变化（图中虚线为变化趋势）

以上分析可以看到，黄河源区的蒸发从 20 世纪 90 年代到 21 世纪初并没有明显增强，因此，气温上升所导致的蒸发变化并不是黄河源区径流减少的重要原因。

5 黄河源区气候变化对源区生态和冻土环境的影响

上述分析表明了黄河源区气温从 20 世纪 60 年代到 21 世纪初一直呈上升趋势，虽然它对此区域的蒸发影响不大，但气温上升势必影响此区域的植被和冻土。为此，本节讨论黄河源区气候变化对植被和冻土环境的影响。

5.1 气候变化对黄河源区植被变化的影响

黄河源区气候变化对此区域的植被有重要影响，近几年通过卫星遥感影像资料对比研究，表明了近十多年来黄河源区高寒草地生态系统已严重退化[19]。NDVI 是表征植被生长状态和植被空间分布密度的指示因子，杨建平等[20]利用归一化植被指数（NDVI）资料分析了达日以上黄河源区的区域植被变化，指出在源区 NDVI 也显著减小，在达日植被活动性增加明显。为了分析植被在时间上的连续变化，周德刚和黄荣辉[17]选取 1982～2001 年期间 8 km 分辨率 Pathfinder NOAA2AVHRR/NDVI 数据，对 20 世纪 80～90 年代黄河源区植被的变化进行分析。

根据牧业气象观测和 NDVI 数值变化，把植被的生长期定义在每年的 5～10 月，对于 1994 年 9～10 月缺损的数据用前后两年的值平均来代替，这样可得 20 年来 NDVI 平均值的分布。如图 12(a)所示，近 20 年黄河源区 NDVI 在东南方向值较大，最大值在玛曲、若尔盖和久治一带，而在源头区 NDVI 值很小。如果用 1997～2001 年的 NDVI 平均值减去 1982～1986 年的 NDVI 的平均值来表示植被的变化状况，则可得黄河源区植被的变化趋势，如图 12(b)所示，在黄河源头区以及在源区的东北方向兴海和唐乃亥一带植被呈退化趋势，而在达日以下的东南大部分区域植被活动性有增加的趋势。由于在黄河源区 NDVI 值很小，NDVI 的减小意味着在黄河源区植被呈现明显的退化趋势，在达日以下的区域 NDVI 值较大，但此区域 NDVI 增加的趋势相对来说没有源区植被退化的速度明显。此外，图 12(c)表示黄河源区平均 NDVI 的年际变化，从图 12(c)同样可以看到，黄河源区 NDVI 除在 1993 和 1994 年较大外，在 1994 年之后呈现出减小的趋势，这表明黄河源区的植被从区域平均看呈现退化趋势。

上述结果表明黄河源区从 20 世纪 90 年代初起呈现出明显退化的趋势，这一方面可能是由于源区降水减少，另一方面也可能是由于过度放牧和气温上升所导致的鼢鼠大量增加所致。

5.2 气候变化对黄河源区冻土层变化的影响

上面分析已表明黄河源区气温的明显上升对此区域植被退化有重要影响，同样，气温上升对区域的冻土层也会产生重要影响。为此，本小节讨论黄河源区增暖对源区冻土层变化的影响。图 13(a)和图 13(b)分别表示黄河源区达日和玛曲站冻土层上下限的年际变化及年代际变化趋势。从图 13(a)和图 13(b)可以看到：自 20 世纪 80 年代以来，达日和玛曲最大冻土层深度正在不断变浅，其中以 1～3 月的变化最为明显，平均冻土层深度每 10 年变浅了 11 cm 左右；并且，在 4 月份，玛曲

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

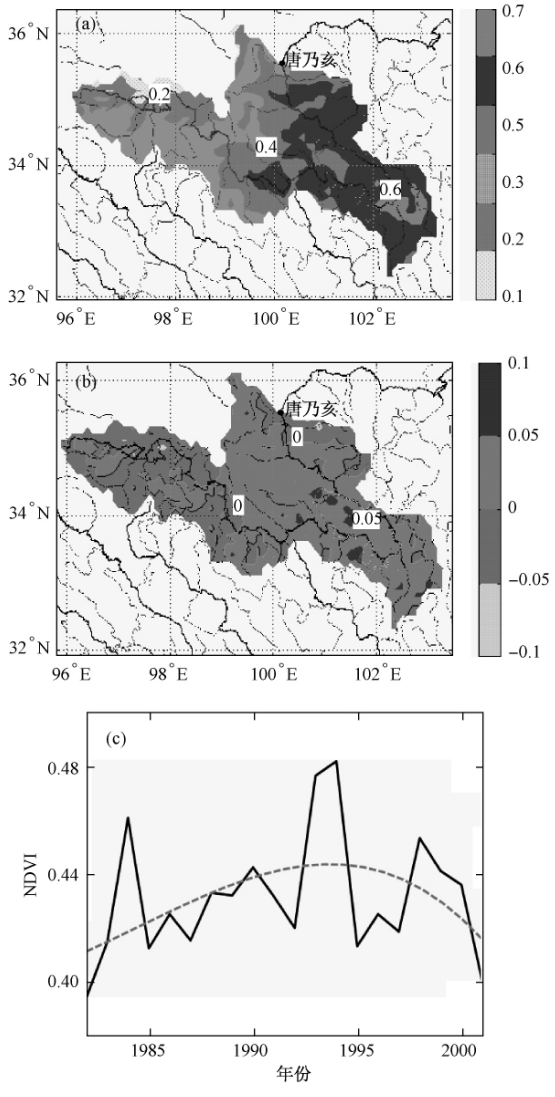


图 12　黄河源区近 20 年平均的 NDVI 分布(a)和 1997～2001 年平均的 NDVI 相对 1982～1986 年平均的变化(b)以及区域平均的 NDVI 近 20 年的变化(c)，其中(c)中虚线表示 3 次样条拟合

站的冻土上层的位置也存在明显下移的趋势，见图 13(c)，此站周围冻土上层每 10 年下移 6.7 cm。由于黄河源区的气温明显上升，使得冻土深度的不断变浅和冻土上层位置的下移，从而导致了多年冻土层变薄，甚至个别小范围的多年冻土层消失，而季节性冻土层变厚。由于冻土层上层位置的下移，这就使得冻结层上方的水位也下移。

上述分析结果表明了由于黄河源区气温升高，使得此区域冬春季冻土层明显变薄，冻土层上层下移。冻土层变薄的结果是：一方面可以造成土壤水从上层向土壤深处渗漏，从而导致径流减弱；另一方面，原来冻结层之上埋藏较浅的沼泽草甸区由于水位的下移而露现，造成了土壤蒸发能力的增加，这种变化也可以导致径流减少。

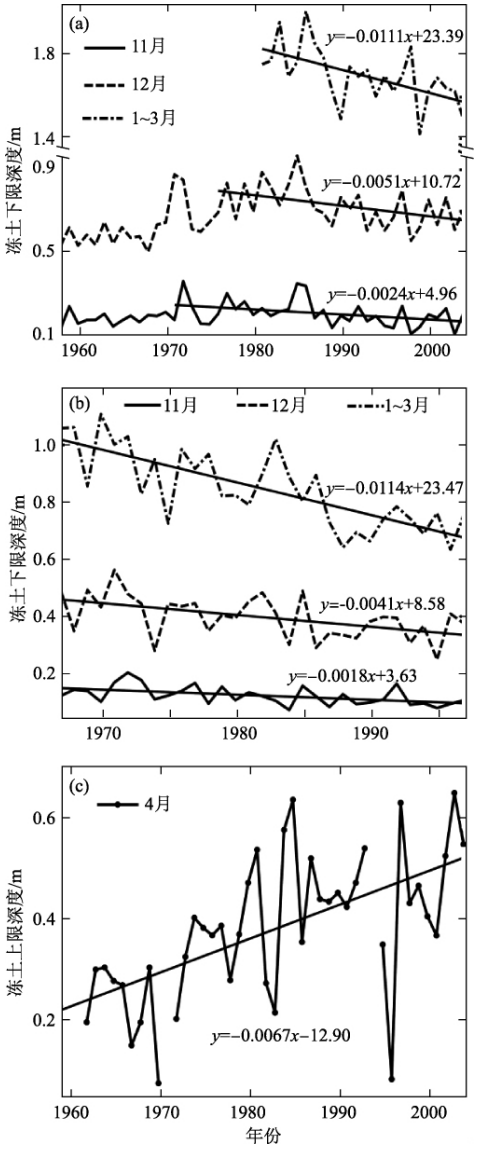


图 13　黄河源区达日(a)和玛曲(b)站冻土下限的变化趋势以及玛曲在 4 月冻土上限的变化趋势(c)(图中粗斜线表示变化趋势)

6 结论和讨论

本文综述了我们最近关于黄河源区和上游地区的气候变化对黄河源区和上游径流以及源区植被和冻土环境影响的研究及其他有关研究，表明了无论黄河源区或是黄河上游径流从 20 世纪 90 年代初到新世纪初发生了明显减少的现象，黄河上游径流的锐减严重影响了黄河中、下游的径流量，并引起了 90 年代黄河下游断流天数的增加和华北水资源的缺乏。并且，研究还进一步

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表明了黄河源区和上游地区径流量从 90 年代起到 21 世纪初的锐减不仅与此流域在 90 年代降水量减少密切相关，而且与此流域降水强度减弱也有一定关系。此外，研究还表明了黄河源区气候变化也严重影响了源区的植被和冻土层，从 90 年代起黄河源区的明显升温使得此地区的植被和冻土层发生了明显退化。

最近，夏军等[21]分析了黄河流域气候变化对黄河流域水资源的变化，指出了降水和气温是影响黄河流域径流量的重要气候因子。然而，依据我们的研究结果，黄河源区和上游流域降水从 20 世纪 90 年代初到新世纪初虽有一定减少，但不太明显，相对于 80 年代降水减少不到 10%左右，而在此时期黄河源区和上游径流减少了近 30%，这是一个值得深入探讨的问题。降水减少无疑是黄河源区和上游径流锐减的一个很重要原因，但从我们的研究结果看：黄河源区和上游在 90 年代年降水量的减少只能说明黄河源区和上游在 90 年代年径流减少的一部分，还不能完全说明此流域径流的减少；并且，黄河源区和上游从 80 年代到新世纪初虽气温明显上升，但由于黄河源区处于高寒地区，蒸发量不大，气温的上升没有导致蒸发量太大的改变。因此，黄河源区和上游地区的年径流量在 90 年代锐减原因是多方面的，如本文所指出的黄河源区降水强度的减弱也对此区域径流的锐减有一定作用。因此，关于黄河源区年径流量在 20 世纪 90 年代锐减的成因中许多问题值得进一步深入探讨。

（2012 年 1 月 5 日收到）

[1] 黄荣辉，徐予红，周连童. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势 [J]. 高原气象，1999，18：465-476.
[2] 黄荣辉，周连童. 我国重大气候灾害特征、形成机理和预测研究 [J]. 自然灾害学报，2002，11(1)：1-9.
[3] 周连童，黄荣辉. 关于我国夏季气候年代际变化特征及其可能成因的研究 [J]. 气候与环境研究，2003，8：274-290.
[4] 周连童，黄荣辉. 中国西北干旱、半干旱区春季地气温差的年代际变化特征及其对华北夏季降水年代际变化的影响 [J]. 气候与环境研究，2006，11：1-13.
[5] 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，2002，24：219-226.
[6] 蓝永超，康尔泗，金会军，等. 黄河上游径流特征及变化趋势的分析 [J]. 地球科学进展，1998，13：112-120.
[7] 蓝永超，丁永建，沈永平，等. 气候变化对黄河上游水资源系统影响的研究进展 [J]. 气候变化研究进展，2005，1：122-125.
[8] 黄荣辉，韦志刚，李锁锁，等. 黄河上游和源区气候、水文的年代际变化及其对华北水资源的影响 [J]. 气候与环境研究，2006，11(3)：1-14.
[9] 韩添丁，叶柏生，丁永健. 近 40a 来黄河上游径流变化特征研究 [J]. 干旱区地理，2004，27：553-557.
[10] 钱云平，林银平，金双彦，等. 黄河河源区水资源变化分析 [J]. 水利水电技术，2004，35：8-10.
[11] 张士锋，贾绍凤，刘昌明，等. 黄河源区水循环变化规律及其影响 [J]. 中国科学(E 辑)，2004，34：117-125.
[12] 张国胜，李林，时兴合，等. 黄河上游地区气候变化及其对黄河水资源的影响 [J]. 水科学进展，2000，11：277-283.
[13] 刘昌明，陈利群，郝芳华，等. 黄河源区径流与基流变化分析 [M]//黄河研究会，编. 黄河源区径流及生态变化研讨会交流材料汇编. 2004：6-15.
[14] 李桂忱，马振骅. 从实测径流看华北地区水资源 [J]. 高原气象，1999，18：613-617.
[15] 李林，张国胜，汪青春，等. 黄河上游流域蒸散量及其影响因子研究 [J]. 气象，2000，26：6-10.
[16] 邱新法，刘昌明，曾燕. 黄河流域近 40 年蒸发皿蒸发量的气候变化特征 [J]. 自然资源学报，2003，18：437-442.
[17] 周德刚，黄荣辉. 黄河源区径流减少的原因探讨 [J]. 气候与环境研究，2006，11：302-309.
[18] YANG K，CHEN Y Y，QIN J. Some practical notes on the land surface modeling in the Tibetan Plateau [J]. Hydrol Earth Syst Sci，2009，13：687-701.
[19] 李道峰，刘昌明. 黄河河源区近 10 年来土地覆被变化研究 [J]. 北京师范大学学报（自然科学版），2004，40：269-275.
[20] 杨建平，丁永建，陈仁升. 长江黄河源区高寒植被变化的 NDVI 记录 [J]. 地理学报，2005，60：467-478.
[21] 夏军，刘昌明，丁永建，等. 中国水问题观察，第一卷，气候变化对我国北方典型区域水资源影响及适应对策 [M]. 北京：科学出版社，2011：311.

The Impact of Climate Change on the Runoff of the Yellow River and Ecosystem and Frozen Soil in Its Source Area

HUANG Rong-hui①，ZHOU De-gang②

①*CAS Member*，②*Research Assistant*，*Center for Monsoon System Research*，*Institute of Atmospheric Physics*，*Chinese Academy of Sciences*（*CAS*），*Beijing* 100190，*China*

Abstract　The climate change in the source area and the upper reach of the Yellow River and its impact on the Yellow River runoff are reviewed. The impacts of climate change on the ecosystem and frozen soil in its source area are discussed further. It is shown that the annual runoff amount of the source area and the upper reach of the Yellow River significantly decreased from the early 1990s，which seriously affected the annual runoff amount of the middle and lower reaches of the Yellow River and caused the increase of drying-up days of the lower reach of the Yellow River during the 1990s. Moreover，the decrease of the precipitation amount in the source area and the upper reach of the Yellow River from the early 1990s to the early 21th century may be a main reason led to the significant decrease of the runoff in the sources area and the upper reach of the Yellow River，and the weakening of the rainfall intensity in these areas during this period has an important impact on the significant decrease of the runoff in these areas. The obvious warming in the source area of this river from the 1980s to the early 21th century did not lead to a large change of the evaporation in this area. Thus，it maybe explain that the increase of air-temperature in the source area of the Yellow River slightly affect the runoff in this area. Besides，this obvious warming has an important impact on the degeneration of vegetation and frozen soil in the source area of the Yellow River.

Key words　climate change，Yellow River，runoff，ecosystem，frozen soil

（编辑：方守狮）

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net