



论文

中国西北地区典型流域冻土退化对水文过程的影响

牛丽^①, 叶柏生^{①*}, 李静^②, 盛煜^②^① 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000;^② 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 兰州 730000

* 联系人, E-mail: yebs@lzb.ac.cn

收稿日期: 2009-07-19; 接受日期: 2010-07-31

国家重点基础研究发展计划(编号: 2007CB411502)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(编号: KZCX2-YW-301)、水利部公益性行业科研专项项目(编号: 200701046)和中国科学院百人计划项目资助

摘要 本文利用河西走廊疏勒河、黑河、石羊河和黄河上游 50 多年来冬季径流以及气温变化的对比分析, 通过空间和时间的变化认识多年冻土变化对径流的影响. 从径流的时间变化上看, 50 年来, 多年冻土覆盖率较大的河流冬季退水过程有明显的减缓, 这一减缓过程与流域负积温变化较为一致, 但这一影响在多年冻土覆盖率较小的流域则没有表现. 这表明在多年冻土覆盖率较大的河流, 多年冻土退化已经对流域的水文过程产生影响. 多年冻土退化的这一水文效应主要是由于随着多年冻土退化, 冻土的隔水作用减小, 一方面使流域内有更多的地表水入渗变成地下水, 造成流域地下水水库的储水量加大, 导致冬季径流增加; 另一方面, 入渗区域的加大和活动层的加厚, 使流域地下水水库库容增加, 导致流域退水过程更为缓慢. 此外, 多年冻土对气候变暖的响应是一个缓慢的过程, 因此多年冻土退化对径流过程的影响也是一个渐变过程.

关键词水文
冻土
气候变化
影响

全球变暖对多年冻土的影响是全球变化的主要影响之一, 由此引起的冻土变化对径流影响的研究是目前寒区水文研究的一个热点领域^[1,2]. 中国西北干旱区高山区以及青藏高原是众多河流的发源地, 水资源在这一地区对社会经济和生态环境具有重要的意义, 这一地区广泛分布有高山多年冻土^[3]. 过去几十年来的气候变暖已经引起了区域冻土的广泛变化^[4~6], 这种变化已经导致河流冬季径流增加的响应^[7~10]. 因此, 针对这一地区多年冻土变化的水文效应研究对预测未来该地区径流变化具有重要意义.

冻土作为不透水层, 它的存在能够直接对流域

径流过程产生影响, 导致河流径流有较大的地表直接径流和较小的地下径流^[1,11,12], 结果使河流径流峰值较大, 而冬季基流径流较小^[13,14], 表现出流域多年冻土覆盖率与流域最大和最小月径流量比值之间存在较好的关系^[15]. 同时, 多年冻土活动层的变化或消失将直接控制多年冻土区地下水位的变化^[16], 活动层的这一变化会直接影响地表生态过程^[17]. 另外, 流域冻土的存在还在一定程度上抑制了蒸发过程^[18].

气候变暖引起的多年冻土退化已经引起了河流径流的变化. 二十世纪最后 50 多年, 冻土覆盖较大的北极主要河流, 如 Yukon, Lena, Yenisei 和 Ob 河的

冬季径流均不同程度表现出增加趋势^[19~23], 同期的冻土也表现出退化趋势^[24,25], 并推测这一增加过程可能与多年冻土的退化有关^[19,23], 特别是 Yukon 河冬季基流在年径流中比例显著提高^[23]. 中国西部和东北地区的部分有多年冻土分布的河流的冬季径流也表现出增加趋势, 如新疆昆仑山克里雅河^[7]、天山玛纳斯河^[9]、西藏拉萨河^[8]和东北地区松花江上游^[10]的冬季径流均表现出增加趋势. 上述多年冻土分布河流冬季径流的增加趋势可能是由多年冻土退化引起的, 即冻土退化使得多年冻土的隔水作用消失, 从而有更多的地表水补给地下水的结果^[10,15]. 多年冻土变化情景对地下水径流影响的模拟结果也表明, 多年冻土退化将会使连续多年冻土区地下水径流增加^[26].

目前对流域尺度的冻土退化还缺乏有效的监测手段, 因而难以直接给出多年冻土退化对径流的影响. 另一方面, 在这些寒区流域, 冬季降水以固态的形式存在, 没有液态降水直接补给河流, 冬季径流仅仅是秋季径流退水过程的延续. 因此, 夏秋季径流的增加也会导致冬季径流的增加. 上述冬季径流增加的一些河流中, 其年径流, 主要是夏秋季节的径流大多表现出增加趋势^[20,27,28]. 因此, 仅从冬季径流增加

就推测是由多年冻土退化引起的可能存在一定片面性. 多年冻土退化, 即活动层加厚和冻土消失均会导致流域地下水水库库容的增加, 调节能力加强, 其结果必然使冬季径流退水过程减缓. 为此, 本文通过对冬季退水过程, 而不是冬季径流的变化来探讨多年冻土变化对径流过程的影响. 选取中国西北地区人类活动较小且有不同冻土覆盖率的流域, 通过分析冬季径流退水系数的变化过程与流域气候变化的关系, 结合不同流域冻土覆盖率进行对比分析, 探寻冻土退化对水文过程的影响.

1 流域概况和资料

本文主要选取西北地区不同冻土覆盖率且受人类活动影响较小的 4 条典型流域: 黄河上游(唐乃亥站以上)、甘肃河西走廊黑河、疏勒河和石羊河上游山区流域作为研究对象, 流域位置和流域特征参数见图 1 和表 1.

1.1 流域概括

黄河上游位于青藏高原东北地区, 源区控制水文站唐乃亥以上流域面积约 121972 km² (占黄河全流

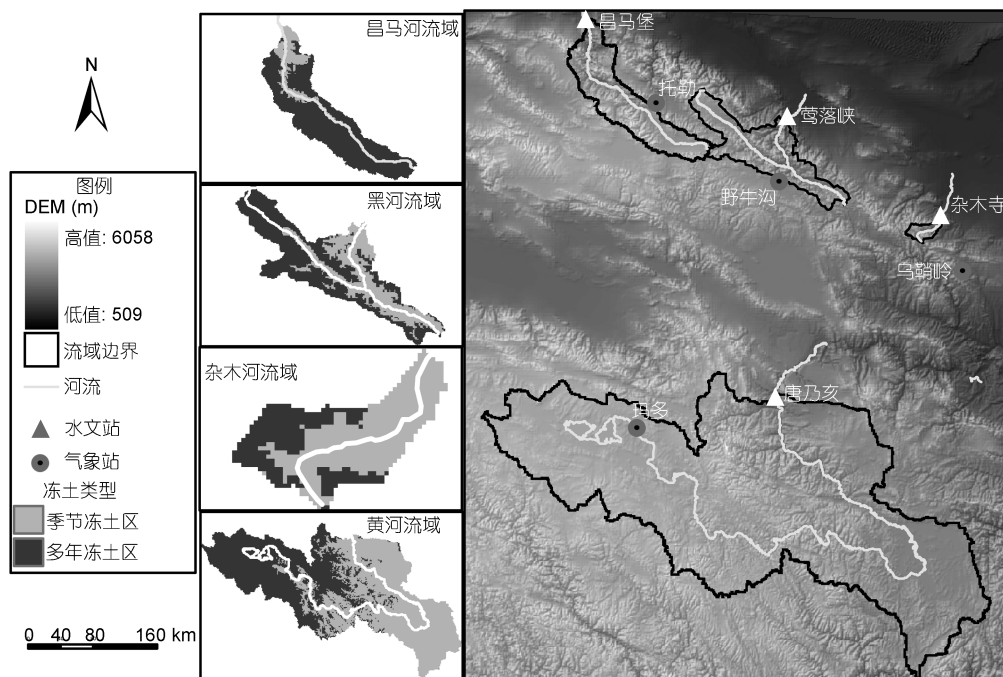


图 1 黄河源、杂木河、黑河和昌马河流域位置、气象站、高程以及多年冻土分布图

表 1 流域水文站和气象站表

	河流	水文站	经度(E)	纬度(N)	流域面积(km ²)	高度(m)	设站时间	资料最新时间
河流及水文站	昌马河	昌马堡	96.85°	39.82°	10961	2112	1953	2005
	黑河	莺落峡	100.18°	38.80°	10009	1674	1944	2005
	杂木河	杂木寺	102.57°	37.70°	851	1495	1952	2005
	黄河	唐乃亥	100.15°	35.50°	121972	3350	1956	2006
河流及流域内或 附近气象站	昌马河	托勒	38.80°	98.42°		3368.3	1956	2007
	黑河	野牛沟	38.42°	99.58°		3320	1959	2007
	杂木河	乌鞘岭	37.20°	102.87°		3043.9	1951	2007
	黄河	玛多	34.92°	98.22°		4273.3	1953	2007

域面积的 15%), 流域内分布有高山多年冻土, 草地面积约占流域总面积的 80%, 冰川面积为 130 km². 流域平均降水量约 500 mm, 平均温度约-4~2℃, 冰川径流约占总径流量的 1%^[29].

杂木河、黑河和昌马河分别是河西走廊石羊河、黑河和疏勒河三大河西内陆河的主要支流. 三条河流均发源于祁连山, 杂木寺、莺落峡和昌马堡水文站是这三条河流出口控制站, 控制流域面积分别为 851, 10000 和 10960 km². 流域上游的人类活动主要以牧业为主, 对径流影响较小. 流域内冰川面积分别为 3.9, 59 和 549 km², 分别占流域面积的 0.5%, 0.6% 和 5%, 冰川径流补给率分别为 1.4%, 3.2% 和 32%^[29].

1.2 水文气象资料

水文站的选取主要考虑流域内人类活动影响较小的流域, 因此, 分别选取黄河上游唐乃亥站、河西走廊疏勒河、黑河和石羊河山区流域的出口站昌马堡、莺落峡和杂木寺站(表 1 和图 1). 这些控制站以上区域主要处于山区, 人类活动主要以牧业为主, 较少有灌溉农业和大型的水利工程, 因而径流的变化主要为气候变化的结果. 为探讨冻土变化对径流的影响, 选取流域内或流域附近气象站代表流域气候变化以及由此引起的多年冻土变化. 分别以托勒、野牛沟、乌鞘岭和玛多站的气候记录代表疏勒河、黑河、石羊河和黄河上游的气候变化(表 1 和图 1), 资料记录从 20 世纪 50 年代开始到 2007 年.

1.3 冻土分布资料

流域多年冻土的分布面积依据程国栋等^[30-32]提出的中国高海拔多年冻土分布的高斯曲线模型计算得来.

$$H = 3650 \exp[-0.003(\phi - 25.37)^2] + 1428,$$

式中, H 为多年冻土下界高度(m), ϕ 为地理纬度(°). 该

式界定了高海拔多年冻土下界的海拔高度, 高于此海拔高度的地区即为多年冻土分布区. 运用此模型计算的结果表明, 疏勒河、黑河、石羊河和黄河上游流域多年冻土覆盖率分别为 73%, 58%, 33% 和 43%(见图 1).

2 流域径流变化与气候和冻土的关系

为了研究径流变化与冻土的关系, 有必要首先了解径流的变化, 并在此基础上分析径流变化与冻土的关系.

2.1 过去 50 年的月径流变化

利用 4 个典型流域水文站建站以来到 2005 年的月径流资料分析其径流变化趋势(图 2). 结果表明, 4 个典型流域的径流变化具有较大差异. 其中, 位置偏西的疏勒河和黑河各月径流量大多表现出增加趋势, 尤其是疏勒河流域各月径流量均为增加趋势; 而位置偏东和南的杂木河和黄河上游流域除黄河上游 6 月份表现为增加趋势外, 其余均表现为减少趋势. 这一差别主要是由降水变化的区域差异引起的^[33], 最主要的是冬季 11~3 月径流作为秋季 9~10 月径流的退水过程, 其变化趋势与秋季径流的变化趋势几乎完全一致.

2.2 过去 50 年最大和最小月径流量的变化

图 3 给出了 4 个典型流域控制站昌马堡、莺落峡、杂木寺和唐乃亥站最大($Q_{\max}$)和最小($Q_{\min}$)月径流量的变化. 这 4 个站最大和最小月径流量的波动和变化趋势基本一致, 这表明冬季退水过程中的最小月径流量主要还是由夏季径流决定. 昌马堡和莺落峡站最小月径流量的相对增加的趋势大于最大月径流量的增加趋势; 而杂木寺和唐乃亥站的最小月径流量相对减小的趋势大于或接近最大月径流量的增加趋势.

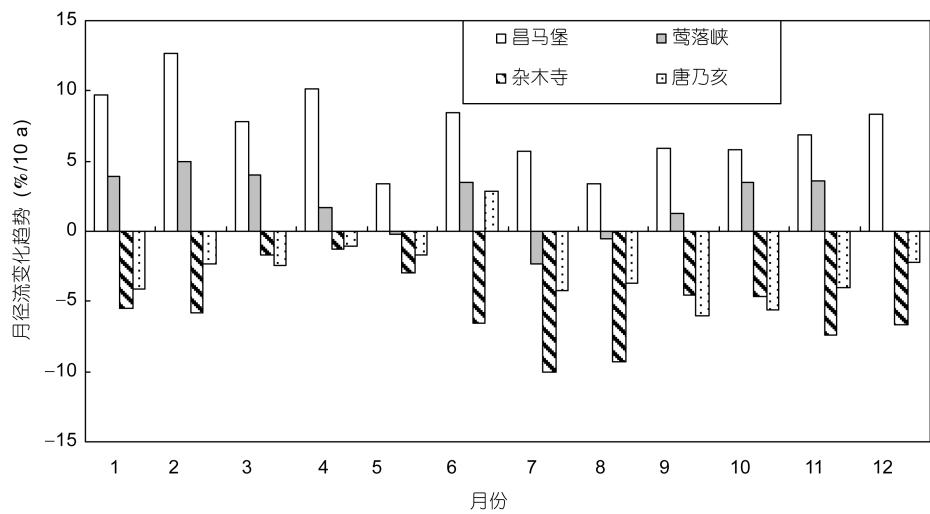


图2 典型流域昌马堡、莺落峡、杂木寺和唐乃亥站逐月经流量变化趋势

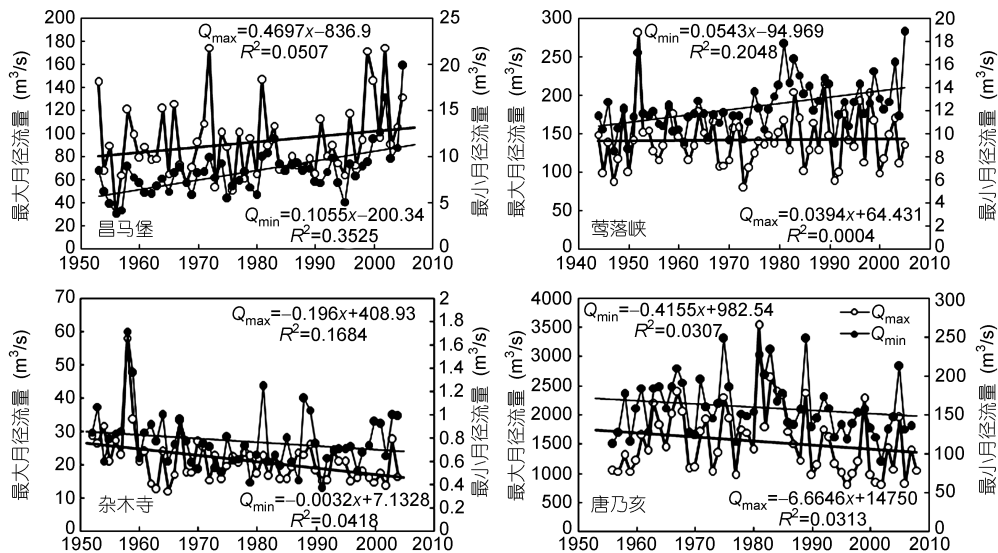


图3 典型流域昌马堡、莺落峡、杂木寺和唐乃亥站最大($Q_{\max}$)及最小($Q_{\min}$)月经流量变化趋势

不同水文站最大和最小月经流量变化趋势的这种差异可能与流域不同冻土覆盖率下的冻土退化有关。

由于冻土的不透水作用使得多年冻土覆盖率较大的河流具有相对较大的径流峰值和相对较小的枯水径流^[14], 多年冻土流域最大和最小月经流量比值与流域冻土覆盖率存在较好的关系^[15], 因此推断多年冻土退化可能会引起这一比值的变化。由于缺乏流域冻土退化或活动层变化的长期观测资料, 在此用流域典型气象台站的年负积温(NDDT)近似代替多年冻土的变化^[3,34]。图4给出了4个流域最大和最小

月经流量比值与气象站年负积温的变化过程。受气候变暖的影响, 4个流域对应典型气象站的负积温均表现出减少趋势。托勒、野牛沟、乌鞘岭和玛多站的减少趋势分别为14.5、6.1、3.8和7.2℃/a。尽管图2和图3中疏勒河和黑河与石羊河和黄河上游年月径流变化存在较大差异, 但最大和最小月经流量比值却均表现出减少趋势。其中, 昌马堡和莺落峡站该比值的减小趋势明显, 而杂木寺和唐乃亥站的减少趋势则不显著, 这主要是由于气候变暖导致多年冻土退化, 进而有更多的地表水能够入渗转为地下水, 使冬季最小

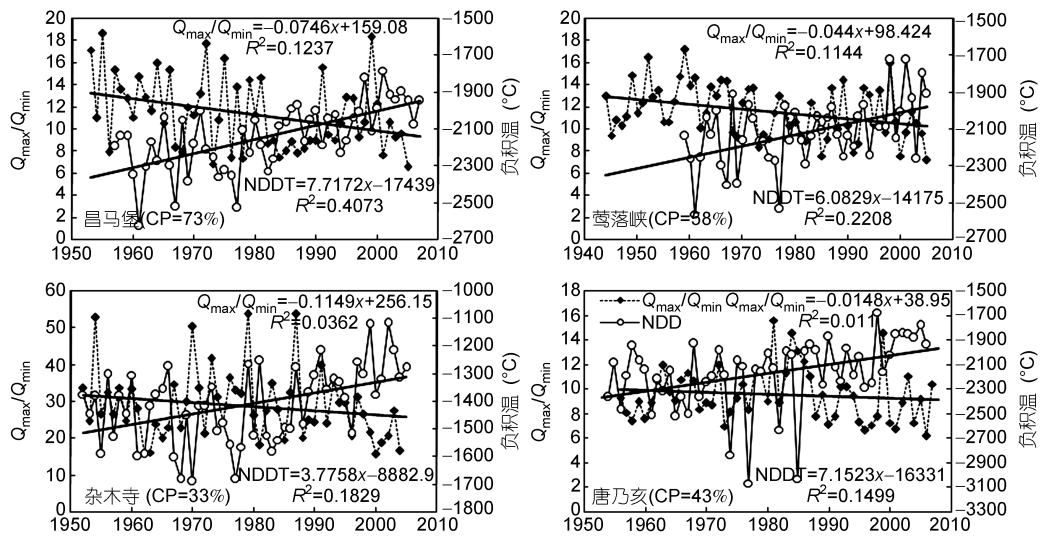


图 4 典型流域昌马堡、莺落峡、杂木寺和唐乃亥站 $Q_{\max}$ 与 $Q_{\min}$ 比值与 NDDT 变化对比

月径流量增加,同时也导致最大月径流量减少,结果使最大和最小月径流量比值减少.这一结果与北极 Lena 河的径流变化结果一致,即多年冻土退化对径流的这一影响只有在多年冻土覆盖率较大(约>40%)的流域才比较显著,而对多年冻土分布较小的流域影响有限^[15].

2.3 过去 50 年冬季退水系数的变化

流域多年冻土的退化不仅改变了流域下垫面状况,更主要的是改变了流域的地下水储水条件.在寒区流域,由于冬季没有其他液态水补给,通常将流域冬季径流过程认为是地下水的排泄过程.多年冻土活动层加厚和多年冻土消失均会增加流域的地下储水空间,相当于增加地下水水库库容,从而导致冬季退水过程(冬季径流)变缓,在此以冬季月径流退水系数($RC=\text{后一月径流}/\text{前一月径流}$)来代表这一变化.图 5 给出了典型流域 12 月到元月的历年退水系数变化过程.从图 5 中看出,昌马堡和莺落峡站退水系数显著增加,而杂木寺和唐乃亥站退水系数则几乎没有增加甚至出现减小的趋势.退水系数的增加表明流域地下水退水过程减缓,意味着水库的调节能力加强,这可能是地下水水库库容增加的结果.相对于 4 个流域气温均在升高(负积温减少)情况下,退水系数变化的差异性表明了多年冻土退化对流域冬季退水过程的影响主要是在多年冻土覆盖率较大的流域,而在多年冻土覆盖率较小的流域这一影响较小,这

与流域多年冻土覆盖率及径流年内分配关系的对比结果一致^[15].

为了进一步探讨冻土变化与退水系数变化的关系,以多年冻土分布最广的疏勒河流域和多年冻土分布较小的黄河上游为例,图 6 给出了疏勒河昌马堡站和黄河上游唐乃亥站冬季径流退水系数与托勒站和玛多站负积温的关系.从年尺度看两者关系较差,考虑到冻土退化是一个缓慢的过程,且对气候变化具有一定的滞后性,因此在图中同时列出了 3 年、5 年和 7 年滑动平均的关系图(图 6(b)~(d)).从图中看出,随着滑动平均时间尺度的加长,疏勒河昌马堡站退水系数和负积温两者关系逐渐趋好,相关系数由不显著变得显著(图 6(a-1)~(d-1)),这也表明了多年冻土退化对径流过程的影响是一个缓慢的多年响应过程,有必要进行长期的定点监测.但对于多年冻土覆盖率较低的黄河上游,即使是多年滑动平均的冬季径流退水系数也缺乏与负积温之间的相关关系(图 6(a-2)~(d-2)),这也表明多年冻土覆盖率较低的流域多年冻土退化对径流的影响较小,也就是说黄河源区唐乃亥以上流域多年冻土退化对冬季径流的影响将十分有限.

2.4 退水系数变化与冻土覆盖率的关系

为了清楚地表明流域退水系数变化与流域多年冻土覆盖率的关系,将图 5 中退水系数变化趋势与流域多年冻土覆盖率进行对比(图 7).结果表明,流域

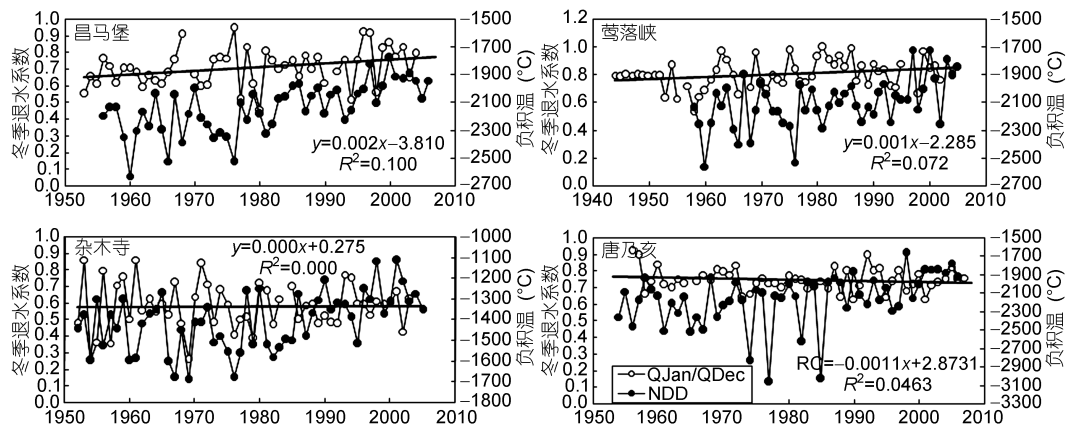


图5 典型流域昌马堡、莺落峡、杂木寺和唐乃亥站退水系数(RC=元月经流/12月经流)的变化

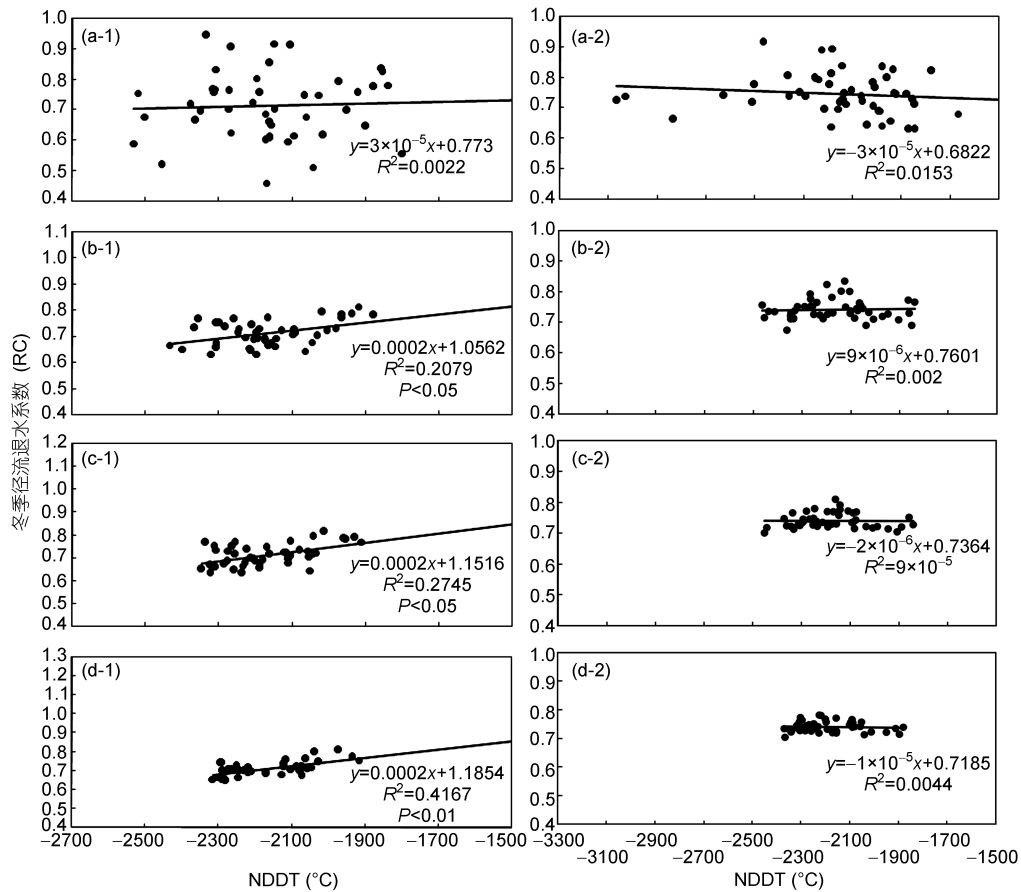


图6 疏勒河昌马堡站((a-1)~(d-1))和黄河上游唐乃亥站((a-2)~(d-2))滑动平均冬季径流退水系数与托勒及玛多站负积温的关系

(a) 1年; (b) 3年; (c) 5年; (d) 7年

多年冻土覆盖率与退水系数的变化趋势有较好的关系, 多年冻土覆盖率越大, 退水系数变化也越大. 这说明, 多年冻土退化导致流域退水过程减缓的影响

也只有在多年冻土覆盖率较大的流域比较显著, 而对于多年冻土覆盖率较小的流域这种影响不显著, 这与流域最大和最小月径流量比值的变化结果一致.

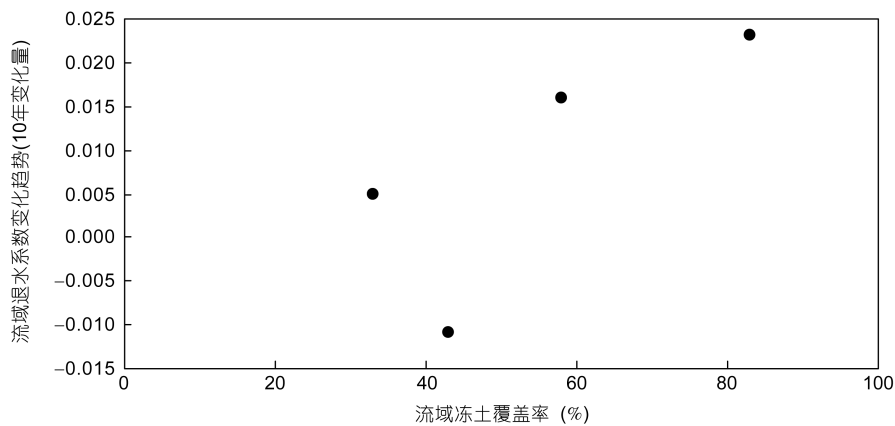


图 7 流域冻土覆盖率与过去 50 年来退水系数变化趋势对比

当然,退水系数的变化还受到其他因素变化的影响,如图 3 中不同气象站负积温的变化就有较大差异,可能会导致冻土退化速度的差异。

3 讨论与结论

过去 50 年来,中国以及全球气候变暖显著,已经引起中国青藏高原地区多年冻土温度升高、活动层加厚^[4,5]。河西走廊疏勒河、黑河、石羊河和黄河上游 50 多年径流变化结果表明,这一地区多年冻土退化已经对径流过程产生了影响。近 50 年来最大、最小月径流,最大与最小月径流量比值,冬季退水系数以及年负积温变化对比表明,尽管 4 个流域年、月以及极值月径流量的变化存在较大差异,但最大与最小月径流量比值却表现出一致的减小趋势,同时流域退水系数在高多年冻土覆盖率的流域表现出增加趋势。退水系数的增加表明,河流冬季退水过程有明显的减缓,这一减缓过程与流域负积温变化较为一致,说明冬季退水过程的减缓与流域多年冻土退化有关,但这一影响在多年冻土覆盖率较小的流域则没有表现。多年冻土退化的这一水文效应主要是由于随着多年冻土退化,多年冻土的隔水作用减小,一方面使

流域内有更多的地表水入渗变成地下水,流域地下水水库的储水量加大,导致冬季径流增加;另一方面,入渗区域的加大和活动层的加厚使流域地下水水库库容增加,导致流域退水过程更为缓慢。

在有多年冻土分布的寒区流域,由于冬季降水主要以固态形式存在,不直接补给河流,因此冬季径流主要由地下水补给。冬季径流的增减,一方面主要受前期径流的增减影响,另一方面,多年冻土的退化导致流域退水过程减缓,也会引起冬季径流的增加。已有的研究已经认为一些多年冻土区河流冬季径流增加与多年冻土退化有关^[7~10]。这一结果意味着在中国西部地区多年冻土覆盖率较大的河流,未来全球变暖导致的多年冻土退化将会导致冬季径流退水过程的进一步减缓,对径流的年内分配产生一定的影响,使径流年内分配更趋均匀。但冬季径流的增加与否并不完全取决于流域的冻土退化,还受到秋冬季积雪开始前的河流径流变化的影响。此外,多年冻土对气候变暖的响应是一个缓慢的过程,因此多年冻土退化对径流过程的影响也是一个渐变过程。当然,冻土退化还会对导致流域蒸发量等产生影响,从而导致流域水资源量和生态环境的变化^[17],这一过程有待今后进一步的研究。

致谢 阿拉斯加大学杨大庆博士、中国科学院旱区寒区环境与工程研究所的程国栋院士和张廷军博士提出建议,审稿专家提出建设性的修改意见,在此一并致谢。

参考文献

- 1 Woo K, Kane D, Carey S, et al. Progress in permafrost hydrology in the new millennium. *Permafrost Periglacial Process*, 2008, 19: 237–254

- 2 马巍, 金会军. 正在变暖的地球上的多年冻土——2008 年第九届国际冻土大会(NICOP)综述. 冰川冻土, 2008, 30: 843–853
- 3 周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土. 北京: 科学出版社, 2000. 450
- 4 Cheng G, Wu T. Responses of permafrost to climate change and their environmental significance, Qinghai-Tibet Plateau. J Geophys Res, 2007, 112: F02S03, doi: 10.1029/2006JF000631
- 5 Wu Q, Zhang T. Recent permafrost warming on the Qinghai-Tibetan Plateau. J Geophys Res, 2008, 113: D13108, doi: 10.1029/2007JD009539
- 6 Wu T, Li S, Cheng G, et al. Using ground-penetrating radar to detect permafrost degradation in the northern limit of permafrost on the Tibetan Plateau. Cold Reg Sci Technol, 2005, 41: 211–219
- 7 黄玉英, 刘景时, 商思臣, 等. 昆仑山克里雅河冬季径流及冻土与气候变化. 干旱区研究, 2008, 25: 174–178
- 8 巩同梁, 刘昌明, 刘景时. 拉萨河冬季径流对气候变暖和冻土退化的响应. 地理学报, 2006, 61: 519–526
- 9 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. 冰川冻土, 2006, 28: 656–662
- 10 Liu J, Hayakawa N, Lub M, et al. Hydrological and geocryological response of winter streamflow to climate warming in Northeast China. Cold Reg Sci Technol, 2003, 37: 15–24
- 11 Lemieux J M, Sudicky E A, Peltier W R, et al. Dynamics of groundwater recharge and seepage over the Canadian landscape during the Wisconsinian glaciation. J Geophys Res, 2008, 113: F01011, doi: 10.1029/2007JF000838
- 12 Carey K, Woo M. Slope runoff processes and flow generation in a subarctic, subalpine catchment. J Hydrol, 2001, 253: 110–129
- 13 Woo M K. Permafrost hydrology in North America. Atmos-Ocean, 1986, 24: 201–234
- 14 Kane D L. The impact of hydrologic perturbations on Arctic ecosystems induced by climate change. In: Oechel W C, Callaghan T, Gilmanov T, et al, eds. Global Change and Arctic Terrestrial Ecosystems. New York: Springer-Verlag, 1997. 63–81
- 15 Ye B, Yang D, Zhang Z, et al. Variation of hydrological regime with permafrost coverage over Lena Basin in Siberia. J Geophys Res, 2009, 114: D07102, doi: 10.1029/2008JD010537
- 16 Yang Z N, Yang Z H, Liang F X, et al. Permafrost hydrological processes in Binggou Basin of Qilian Mountains. Proceedings of 6th International Conference of Permafrost, Beijing. Wushan (Guangzhou): South China University of Technology Press, 1991. 744–749
- 17 王根绪, 李元首, 吴青柏. 青藏高原冻土区冻土与植被的关系及其对高寒生态系统的影响, 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36: 743–754
- 18 Zhang S Q, Ding Y J, Ye B S. The monthly discharge simulation/construction on upper Yangtze River with absent or poor data Coverage. In: Liu Z Y, Yang D W, eds. Proceedings of the International Symposium on Flood Forecasting and Water Resources Assessment. Beijing: China Water Power Press, IAHS-PUB, 2007. 324–333
- 19 Ye B, Yang D, Kane D L. Changes in Lena River streamflow hydrology: Human impacts versus natural variations. Water Resour Res, 2003, 39: 1200, doi: 10.1029/2003WR001991
- 20 McClelland J W, Holmes R M, Peterson B J, et al. Increasing river discharge in the Eurasian Arctic: Consideration of dams, permafrost thaw, and fires as potential agents of change. J Geophys Res, 2004, 109: D18102, doi: 10.1029/2004JD004583
- 21 Yang D, Ye B S, Shiklomanov A. Streamflow characteristics and changes over the Ob river watershed in Siberia. J Hydrometeorol, 2004, 5: 69–84
- 22 Yang D, Ye B S, Kane D. Streamflow changes over Siberian Yenisei river basin. J Hydrol, 2004, 296: 59–80
- 23 Walvoord M A, Striegl R G. Increased groundwater to stream discharge from permafrost thawing in the Yukon River basin: Potential impacts on lateral export of carbon and nitrogen. Geophys Res Lett, 2007, 34: L12402, doi: 10.1029/2007GL030216
- 24 Zhang T, Frauenfeld O W, Barry R G, et al. Response of changes in active layer and permafrost conditions to hydrological cycle in the Russian Arctic. In: Eos Trans, American Geophysical Union, Fall Meeting 2005, abstract C21C-1118
- 25 Zhang T, Frauenfeld O W, Serreze M C, et al. Spatial and temporal variability in active layer thickness over the Russian Arctic drainage basin. J Geophys Res, 2005, 110: D16101, doi: 10.1029/2004JD005642
- 26 Vidstrand P, Naslund J O, Hartikainen J. Numerical studies of permafrost effects on groundwater flow. In: Kane D L, Hinkel K M, eds. Proceedings of the 9th International Conference on Permafrost, 2008 June 29–July 3, Institute of Northern Engineering, University of Alaska Fairbanks, 2008. 1833–1838
- 27 Peterson B J, Holmes R M, McClelland J W. Increasing river discharge to the Arctic Ocean. Science, 2002, 298: 2171–2173
- 28 Shi Y F, Shen Y P, Kang E S, et al. Recent and future climate change in northwest China. Clim Change, 2007, 80: 379–393
- 29 杨针娘. 中国冰川水资源. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1992. 158
- 30 程国栋, 吴邦俊. 高海拔多年冻土分布的地带性数学模式之探讨. 冰川冻土, 1983, 5: 1–7
- 31 程国栋. 我国高海拔多年冻土地带性规律之探讨. 地理学报, 1984, 39: 185–193
- 32 Cheng G D, Dramis D. Distribution of the mountain permafrost and climate. Permafrost Periglacial Process, 1992, 3: 83–91
- 33 丁永建, 叶柏生, 韩添丁, 等. 过去 50 年中国西部气候和径流变化的区域差异. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37: 206–214
- 34 丁永建, 叶佰生, 刘时银, 等. 青藏高原大尺度冻土水文监测研究. 科学通报, 2000, 45: 208–214