

黄河源区地表水资源变化及其影响因子

常国刚¹, 李 林², 朱西德², 王振宇², 肖建设³, 李凤霞³

(1. 青海省气象局, 西宁 810001;

2. 青海省气候中心, 西宁 810001;

3. 青海省气象科学研究所, 西宁 810001)

摘要: 利用 1955~2005 年黄河源区玛多气象站和黄河沿水文站气象、水文资料, 分析了该区域地表水资源、气候及冻土演变规律, 揭示了地表水资源变化的成因。研究表明: 近 51 年黄河源流量丰枯转化频繁, 但在总体上特别是进入 20 世纪 90 年代以来黄河源流量呈减少趋势, 流量年内分配表现为单峰型; 降水量对流量有着较为显著的影响, 且具有一定的持续性; 黄河源区气温的显著升高对于加大流域蒸发量导致流量补给的减少作用要大于其升高致使冰雪融水的补给作用, 其中春季气温回升的这一效应更为显著; 黄河源区冻土呈现出显著的退化趋势, 冻土厚度与流量总体上呈显著的正相关关系, 其不断减小削弱了自身天然隔水层的作用; 黄河源区蒸发量呈现出显著的增大趋势, 并导致流量的减少; 气候变化导致流量的减少量占总减少量的 70%, 其余 30%可能是由人类活动加剧造成的, 气候及冻土因子对流量的作用大小依次为冻土、降水、蒸发和气温, 显然多年冻土对于黄河源区地表水资源的形成和发育有着至关重要的作用。

关键词: 地表水资源; 气候变化; 冻土; 黄河源区

1 引言

黄河上游所处的特殊地理位置和脆弱的区域生态环境, 使其形成具有独特的水文水资源系统和冻土环境, 这个系统对气候变化十分敏感, 同时由于黄河上游流域是全黄河流域主要的产流区, 从而使黄河上游流量长期以来呈现出的偏枯趋势乃至经常断流现象备受世人瞩目。特别是近十多年来, 随着全球变暖和黄河上游流量的持续偏枯, 黄河流域水资源供需矛盾日益突出, 对流域内社会、经济建设产生了严重影响, 越来越多的科技工作者开展了气候变化对黄河上游流量的影响研究, 并取得了一系列的研究进展。总体上认为: 黄河上游流量对降水的敏感性远大于气温, 地表径流量随降水的增加而增加, 随气温的升高而减少, 更为严峻的是随着温度持续上升, 黄河上游 21 世纪水循环的演变趋势呈现为蒸发量增加, 径流量进一步减少, 未来黄河上游水资源形势依然不容乐观^[1]。但就生态环境的脆弱性和气候变化的敏感性而言, 黄河源区在整个黄河上游流域占有十分突出的地位。特别是作为黄河的发源地, 其气候、湿地、植被以及冻土环境的变化对地表水资源的波动具有极其显著的影响。但是, 有关黄河源区水资源以及气候、冻土变化的研究目前尚不多见。为此, 利用黄河源区气象、水文资料系统分析地表水资源的变化规律, 揭示造成地表水资源减少的气候、冻土等方面的成因, 是当前气候变化及其影响研究工作中亟待开展的一项研究课题。

收稿日期: 2006-11-23; 修订日期: 2007-01-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40405022); 科研院所社会公益研究专项 (2005DIB3J109) 共同资助 [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.40405022; Special Fund for Social Public Welfare of Research Institutes, No.2005DIB3J109]

作者简介: 常国刚 (1962-), 男, 湖南长沙人, 高级工程师, 硕士, 主要从事气象业务管理和气候变化及其对生态环境的影响研究工作。E-mail: changguogang@tom.com

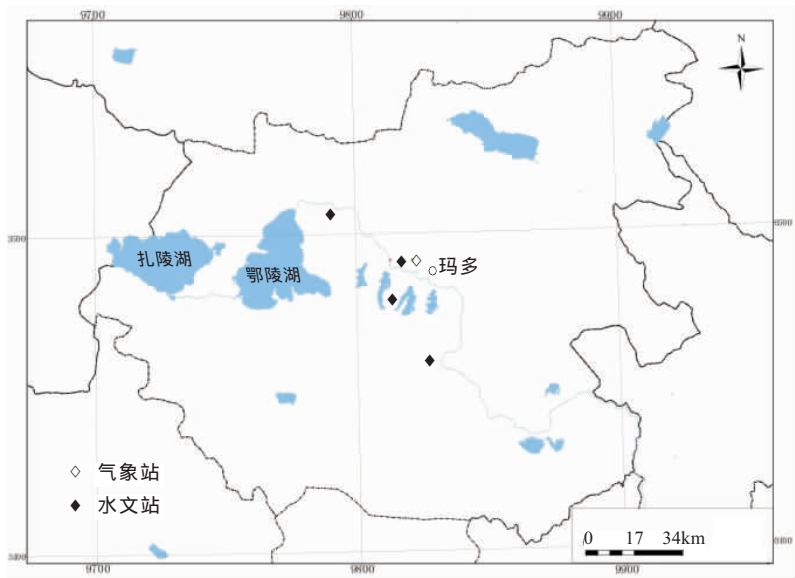


图 1 黄河源区气象水文站分布图

Fig. 1 Locations of meteorological and hydrological stations in the source region of the Yellow River

2 资料与方法

本研究所谓黄河源区特指黄河源头第一县—玛多县，地处北纬 32°36'~34°15'，东经 96°50'~99°20'，总面积 26541 km²，地势自西北向东南倾斜，海拔 4000~5267 m，黄河上游纵贯县境（图 1）。气象及地表水资源资料采用黄河源区玛多气象站和黄河沿水文站 1955~2005 年气温、降水、冻土等气候资料和流量资料，蒸发资料利用联合国粮农组织修订后的彭曼公式^[2]进行推算。变差系数 C_v 利用矩法计算^[3]。在研究流量年内分配时，采用峰型度 α 值和丰枯率 β 值进行分析^[3]， α 实质上反映了河流总流量中季节积雪融水与高山冰雪融水加上雨水量的比值， β 值事实上是汛期与非汛期总流量的比值，也是地下水补给量占年流量比重大小的一种指标。在分析地表水资源和气候因子气候变化趋势和相互关系时，还采用了最小二乘法和相关系数等统计学方法。

3 结果分析

3.1 黄河源区地表水资源变化规律

3.1.1 黄河源区地表水资源的年际变化 从 1955~2005 年黄河沿年平均流量变化可见（图 2a），黄河沿年平均流量总体上呈现出明显的逐年减少趋势，其气候倾向率达 -1.99 m³/s/10a。但就年际变化而言，其丰枯变化十分频繁，1955~2005 年的 51 年中至少出现了 5~6 次丰枯转换，功率谱分析得出年平均流量存在 14 年的显著性周期。若以流量距平百分率的绝对值 $\leq 20\%$ 为正常年，距平百分率 $> 20\%$ 和 $< -20\%$ 分别为丰水年和枯水年，则 51 年当中黄河源区年平均流量丰水年出现了 16 年，而枯水年则为 29 年，正常年仅为 6 年，枯水年为丰水年的 1.8 倍，尤其是 20 世纪 90 年代以来的 15 年中枯水年出现了 13 年，丰水年仅为 1 年。在 51 年中有 1961、1980、2000、2001 和 2004 年黄河源出现了短时断流，20 世纪 90 年代以来断流次数占总次数的 60%，同样表现得较为突出。图 2a 多

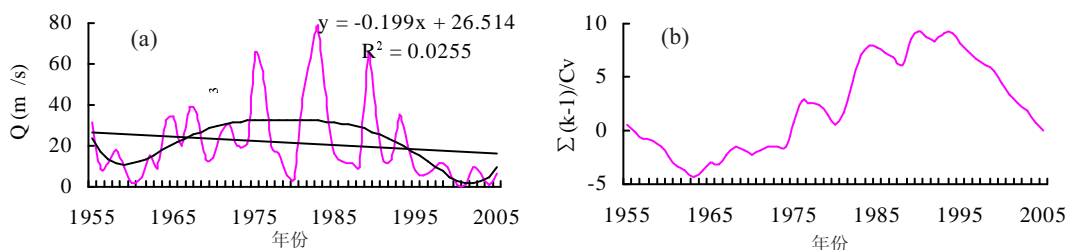


图 2 1955~2005 年黄河沿历年平均流量年际变化曲线 (a) 与差积曲线 (b)

Fig. 2 Curves of interannual variation for mean annual discharge at Huangheyan Hydrological Station in 1955-2005

项式拟合的趋势也反映出 20 世纪 90 年代以来年平均流量的显著减少趋势。1955~2005 年黄河沿历年平均流量年际变化差积曲线(图 2b) 反映出黄河源区年平均流量存在三个阶段性变化趋势: 1955~1963 年和 1995~2005 年的流量减少阶段和 1964~1994 年的流量增多阶段。分析黄河源区四季平均流量的变化趋势得出其气候倾向率分别为: 冬季 $-1.292 \text{ m}^3/\text{s}/10\text{a}$, 春季 $-0.925 \text{ m}^3/\text{s}/10\text{a}$, 夏季 $-1.575 \text{ m}^3/\text{s}/10\text{a}$, 秋季 $-4.217 \text{ m}^3/\text{s}/10\text{a}$, 可见四季平均流量均出现了一致的减少趋势, 并以秋季减幅最为明显, 且显著性水平最高, 这一特点与黄河上游年平均流量的季节变化特点是相似的^[4]。

计算得出 1955~2005 年黄河源区年平均流量的变差系数 C_v 为 0.85。有关研究认为^[3]: 以季节积雪融水或雨水补给为主的河流, 由于流量补给来源的季节性变化较大, 使河流径流量存在着较为显著的季节性差异, 因此其 C_v 值较大; 而高山冰雪融水与雨水混合补给的河流, 由于流量补给来源中高山冰雪融水与雨水在不同时期起到相互补充的作用, 反映在流量中就比较稳定, 其 C_v 值便较小。可见黄河源变差系数明显偏大, 应是以季节积雪融水或雨水补给为主的河流^[3]。同时, 其变差系数明显大于黄河上游和长江上游的变差系数^[4, 5], 说明黄河源流量的年际波动性更大, 流量的稳定性远小于黄河上游和长江上游。为进一步显现流量分配以及补给比重的年际变化特征, 通过分析黄河源区流量峰型度与丰枯率变化趋势^[4], 发现其峰型度呈现出显著的增加趋势, 且显著性水平达到了 0.01 信度, 表明黄河源区地表水资源总量中, 季节性融水占高山冰雪融水量和雨水量总和的比重在逐年明显增加; 而年际变化表现为逐年减少趋势, 也就是说汛期径流总量与非汛期径流总量的比值在下降, 汛期径流总量占年径流总量的比重也在下降, 但这一趋势并不显著。黄河源区流量峰型度和丰枯率的这一变化特征, 说明该流域雨水对黄河流量的补给在减少而积雪融水对流量的补给在增加。

3.1.2 黄河源区地表水资源的年内变化 由黄河源区流量多年平均的年内变化^[4]可见, 黄河源区流量多年平均的年内变化与其上游流量存在较大差异: (1) 流量年内分配呈单峰型, 而不是上游流量的双峰型; (2) 峰值则出现在 10 月份, 较上游流量 7、9 月份的峰值明显滞后; (3) 流量的低值期出现在春季, 而不是通常情况下的冬季, 但就月份而言, 同样是 2 月份最低。这种流量年内分配上的差异, 说明尽管同属一条河流, 但在补给上仍存在较大区别。

3.2 黄河源区地表水资源的影响因子分析

影响地表水资源的气候因子可由水量平衡模式来确定^[6]:

$$B = R - E - Q - W \quad (1)$$

式中: B 为水量平衡, R 为流域平均降水量, E 为流域蒸发量, Q 为河流径流量, W 为土壤蓄水量, 单位均为 mm。根据物质总量收支平衡原理, 当流域处于稳定状态时, 多年水量平衡 B 应该为零, 则径流量可表示为: $Q = R - E - W$ 。 W 为气温和降水量的函数, 由此可直观的反映出气温、降水量以及蒸发量是影响流量的主要气候因子。同时,

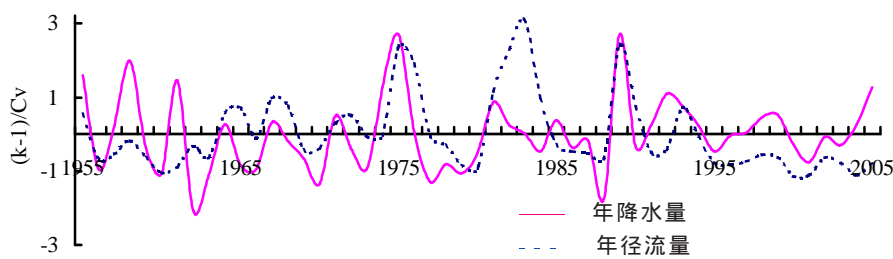


图3 1955~2005年黄河源区年降水量和年径流量标准化曲线

Fig. 3 Curves of annual precipitation and annual discharge in the source region of the Yellow River in 1955-2005

有研究认为多年冻土的退化，导致更多的水分下渗到地表深处，使得地表水资源减少^[7, 8]。为此，以下就气温、降水、蒸发量和冻土变化趋势及其对地表水资源的影响进行分析。

3.2.1 降水量变化及其对地表水资源的影响 由1955~2005年黄河源区年降水量变化趋势及其差积曲线可以看出，近51年来黄河源区年降水量呈微弱增加趋势，其速率为4.28 mm/10a，但未达到显著性水平。冬、春、夏和秋季降水量的气候倾向率分别为0.661 mm/10a、4.548 mm/10a、-0.75 mm/10a和-0.413 mm/10a，冬、春季呈增多趋势，且春季降水量增多趋势显著，达到了0.01信度的显著性水平，而夏、秋两季则表现出微弱的减少趋势，但由于占年降水量近82%，从而削弱了冬春季特别是春季显著的增多趋势，使得年降水量的增多趋势表现的并不显著。由年降水差积曲线来看，年降水量的增加主要集中在1989年以后，而此前以减少为主。与整个三江源地区降水量变化特点对比来看^[9]，四季变化趋势是一致的，但年降水量则呈现相反的变化趋势，表明了黄河源区降水量变化具有一定的地域性特点。1955~2005年黄河源区年降水量和年径流量标准化曲线表明两者年际波动具有较好的一致性(图3)，相关分析表明两者相关系数达0.39，通过了0.05信度的显著性水平。说明降水量对流量有着较为显著的影响。但是，其一致性较之于黄河上游和长江上游相对较低，说明玛多单站的降水量对整个黄河源区的代表性可能不甚全面，同时其他因子可能与流量还有着较为显著的关系。

分析黄河源区四季及年降水量与流量的相关系数(表1)可得出：(1)通常情况下上季降水量与当季流量的相关系数要大于同季的，说明降水量对流量的影响具有一定的持续性，而流量对降水量的响应则有一定的滞后性，这一特点同样反映在年降水量和年平均流量的波动关系上^[4]，通常降水量的增减较流量的增减要超前，而流量则略有滞后；(2)冬春季降水量对流量的影响不甚显著，表明冬春季流量主要依赖于冰雪融水补给，这在上年夏秋季降水量与流量间的显著相关关系中也有着明显的反映；(3)尽管秋季降水量较夏季明显偏少，但对四季及年流量的作用似乎更为显著，显然这与夏、秋两季的降水类型有关，夏季以阵性降水为主，而秋季则以连阴雨等持续性降水为主，前者由于降水强度大，降水相对集中，易于形成洪峰而不利于对流量的持续补给，而后者则不仅能持续性的补给到河流，同时在高海拔地区形成积雪，于冬春季融化补给到流量当中。(4)四季及年流量当中以秋季流量与降水量的相关系数相对较高，秋季流量对四季及年降水量的响

表1 黄河源区四季及年降水量与流量的相关系数
Tab. 1 Correlation coefficients of four-season and annual precipitation and discharge in the source region of the Yellow River

R	Q	冬季	春季	夏季	秋季	年
冬季		-0.069	-0.027	0.217	0.114	-0.126
春季		0.099	-0.154	0.163	0.145	0.095
夏季		<i>0.446**</i>	<i>0.406**</i>	0.320*	0.400**	0.316*
秋季		<i>0.484**</i>	<i>0.493**</i>	<i>0.310*</i>	0.436**	0.322*
年		-0.122	-0.084	-0.383**	0.511**	0.390*

注：1、上标为*、**和***的相关关系分别通过了0.05、0.01和0.001信度的检验；2、以上相关系数中，当降水量统计期间落后于径流量统计期间时，均为相应时期滞后一年的径流量与当年降水量的相关系数，并由斜体表示(下同)。

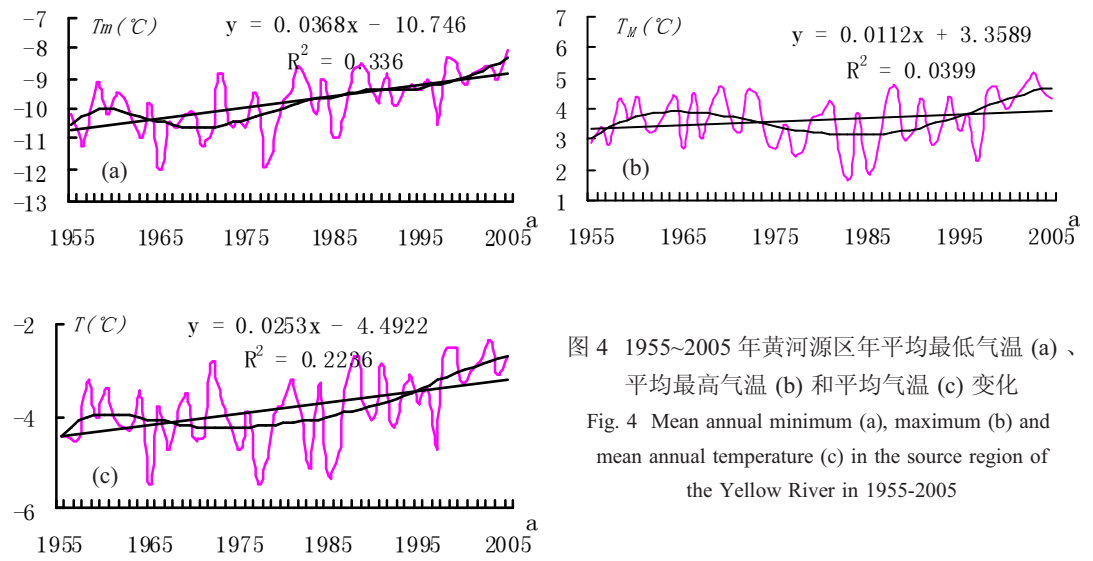


图 4 1955~2005 年黄河源区年平均最低气温 (a)、
平均最高气温 (b) 和平均气温 (c) 变化
Fig. 4 Mean annual minimum (a), maximum (b) and
mean annual temperature (c) in the source region of
the Yellow River in 1955-2005

应最为显著，从而对于多年平均的秋季流量要高于冬、春、夏季流量产生了积极的作用。

3.2.2 气温变化及其对地表水资源的影响 气温作为热量指标对流量的主要影响表现在以下几个方面：一是影响冰川和积雪的消融，二是影响流域总蒸散量，三是改变流域高山区降水形态，四是改变流域下垫面与近地面层空气之间的温差，从而形成流域小气候。有关气候数值模拟推算了气温变化对径流量造成的可能影响：若降水不变，气温升高 4℃ 时，流域径流量可减少 15% 左右^[6]。据此，黄河源区年平均最低气温、平均最高气温和平均气温变化逐年分别以 0.37℃/10a、0.11℃/10a 和 0.25℃/10a 的速率升高 (图 4)，对其流量的减少起到了推波助澜的作用。

从黄河源区四季及年平均气温与流量的相关系数可以看出 (表 2)：(1) 气温与流量总体上呈较为显著的负相关关系，表明在黄河源区气温升高对于加大流域蒸发量导致流量补给的减少作用要大于其升高致使冰雪融水的补给作用；(2) 四季及年平均气温当中春季气温对流量的作用最为显著，说明在干旱半干旱的黄河源区，春季气温的回升导致的蒸发量增大致使流量减少的作用，明显突出于春季微弱的降水量对流量的补给，同时对于后期流量的减少还产生了持续性影响；(3) 四季及年平均流量中夏季流量对气温的响应最为敏感，从而表明气温升高导致的水分蒸发效用有效的削弱了降水量对夏季流量的补给作用，使得理应在夏季最大的流量反而不及秋季大。(4) 气温对流量的影响同样具有持续性，并以春季气温的持续性影响最为突出。(5) 尽管气温影响冰雪融水补给流量的作用在年、季尺度上并未显现出来，但通过分析月平均最低气温与年流量的关系时发现，9 月份平均最低气温与当年 10、11、12 月乃至次年 1~9 月平均流量均有着显著的正相关关系，其中与次年 1~4 月流量的相关关系甚至达到了 0.001 信度的显著性水平，可见黄河源区冬春季流量的补给以冰雪消融为主，且冰雪消融主要集中在 9 月份，其对流量的补给可以持续到次年 9 月份。同时，冰雪融水对于秋季流量的补给加

表 2 黄河源区四季及年平均气温与流量的相关系数
Tab. 2 Correlation coefficients of four-season and mean annual
temperature and discharge in the source region of
the Yellow River

T	Q	冬季	春季	夏季	秋季	年
冬季		-0.101	-0.200	-0.319*	-0.267	-0.295*
春季		-0.364**	-0.339*	-0.426**	-0.374**	-0.431**
夏季		-0.024	0.06	-0.330*	-0.149	-0.304*
秋季		0.110	0.016	0.036	0.079	0.051
年		-0.253	-0.317*	-0.299*	-0.265	-0.319*

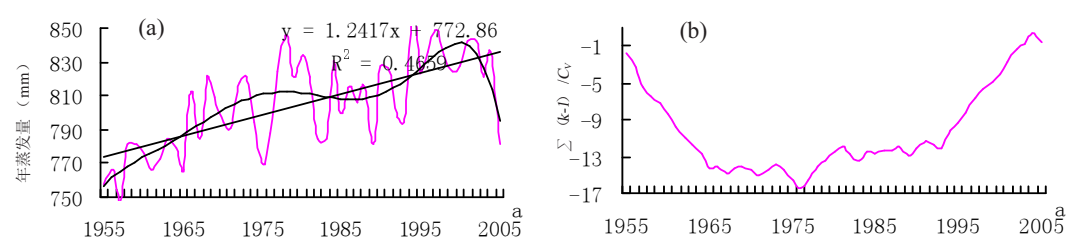


图 5 1955~2005 年黄河源区年蒸发量 (a) 及其差积曲线 (b)

Fig. 5 Curves of annual evaporation in the source region of the Yellow River in 1955-2005

之降水量本身的大量补给作用，最终导致了黄河源区地表水资源秋季特别是 10 月份出现峰值的年内分配特点。尤为值得关注的是，平均最低气温的显著上升，必然加大冰雪消融量，进而不仅加大了流量中的冰雪融水补给量，而且加速了冰川退化和雪线上升。

3.2.3 蒸发量变化及其对地表水资源的影响 由修订后的彭曼公式计算得出的 1955~2005 年黄河源区蒸发量年际变化曲线 (图 5) 可见，近 51 年来黄河源区年蒸发量呈显著增大趋势，其气候倾向率为 12.4 mm/10a，且达到了 0.001 信度的显著性水平。虽然从 6 阶多项式拟合的阶段变化来看，近几年来特别是 2005 年该地区年蒸发量较前期有明显的回落态势，但这并不影响年蒸发量总体上显著的增多趋势。通过分析四季蒸发量的变化趋势得出，冬、春、夏、秋季蒸发量气候倾向率分别为 2.22 mm/10a、4.96 mm/10a、3.98 mm/10a、1.43 mm/10a，除秋季蒸发量的显著性水平仅为 0.01 信度外，其余三季均达到 0.001 信度的显著性水平。以上分析表明，黄河源区蒸发量呈现出显著的增大趋势，显然这与气温的普遍升高是不无关系的。从黄河源区四季及年蒸发量与流量的相关关系 (表 3) 可以看出：(1) 四季及年蒸发量普遍与流量呈负相关关系，表明蒸发量作为地表水分平衡当中重要的支出项，蒸发量的增大必然导致流量的减少，反之亦然，其物理意义是显著的；(2) 蒸发量对流量的作用同样具有明显的持续性，这在上年夏季蒸发量与当年四季流量的显著相关关系中反映的十分明显；(3) 四季当中冬季蒸发量对流量的

表 3 黄河源区四季及年蒸发量与流量的相关系数

Tab. 3 Correlation coefficients of four-season and annual evaporation and discharge in the source region of the Yellow River

E	Q	冬季	春季	夏季	秋季	年
冬季		-0.049	-0.163	-0.298*	-0.310*	-0.299*
春季		-0.195	-0.015	-0.213	-0.222	-0.198
夏季		-0.319*	-0.264	-0.317*	-0.305*	-0.289*
秋季		-0.320*	-0.409**	-0.498*	-0.291*	-0.185
年		-0.051	-0.051	-0.310*	-0.360**	-0.316*

表 4 黄河源区四季及年冻土厚度与流量的相关系数

Tab. 4 Correlation coefficients of four-season and annual permafrost thickness and discharge in the source region of the Yellow River

H	Q	冬季	春季	夏季	秋季	年
冬季		-0.420*	-0.328	-0.230	-0.258	-0.293
春季		0.379	0.558**	0.565**	0.438*	0.563**
夏季		0.267	0.255	0.463*	0.333	0.474*
秋季		-0.202	-0.466**	-0.354*	-0.466*	-0.592**
年		0.525*	0.480*	0.430*	0.281	0.415*

3.2.4 冻土退化及其对地表水资源的影响 由 1983~2005 年黄河源区冻土年平均冻结厚度与冻结日数变化^[10]可见，其季节冻土年平均冻结厚度和冻结时间均在明显减小，其中冻结厚度以每 10 年 10.8 cm 的速率减小，并达到了 0.001 信度的显著性水平，冬、春、夏、秋四季冻结厚度变化的气候倾向率分别为 -14.54 cm/10a、-26.63 cm/10a、-30.83 cm/10a、2.7 mm/10a，除秋季略有增加外，其余季节均呈显

著减小趋势, 尤其以夏季冻结厚度的减幅最大, 并最为显著; 而季节冻土冻结日数则以每 10 年 13.2 天的速率缩短, 同时也达到了 0.001 信度的显著性水平, 表明黄河源区冻土呈现出显著的退化趋势, 这与整个青海高原冻土退化的变化趋势是一致的^[10]。由黄河源区四季及年冻土厚度与流量的相关系数(表 4) 可以看出: (1) 冻土作为特殊的大厚度区域性隔水层, 其厚度越厚, 则有利于对地表水分的积累与存储, 阻止其下渗到地表深处, 从而易于形成地表径流, 黄河源区冻土厚度与流量总体上呈显著的正相关关系, 恰好有力的说明了这一点; (2) 秋冬季冻土厚度与流量间呈较好的负相关关系, 表明在秋冬季的黄河源区, 土壤开始冻结乃至冻土层不断增大时, 迫使更多的地表水分冻结于土壤当中, 从而使地表水资源减少; (3) 冻土对流量具有一定的持续性影响, 则主要是由于冻土本身在时间分布的持续性产生的影响。

3.2.5 气候、冻土因子对地表水资源的综合影响 为显现以上气温、降水、蒸发以及冻土等因子对黄河源区流量的综合影响, 各因子原始数据及其标准化数据与流量的回归方程为:

$$Q = 25.12 - 1.71T + 0.156R - 0.172E + 0.873D \quad (2)$$

$$q = -1.57 \times 10^{-7} - 0.072t + 0.416r - 0.187e + 0.456d \quad (3)$$

式中: Q 为年平均流量 (m^3/s), T 为年平均气温 ($^{\circ}\text{C}$), R 为年降水量 (mm), E 为年蒸发量 (mm), D 为年平均冻土厚度 (cm), 以上因子的小写分别代表各因子的标准化数据。

(2)、(3) 式复相关系数为 0.689, 达到了 0.001 信度的显著性水平。

由以上两式可以看出: (1) 年平均流量随着年平均气温的升高、降水量的减少、蒸发量的增大和冻土厚度的减小而减少, 反之则相反, 其物理意义是与客观事实相吻合的; (2) 假定其他因子不变, 年平均气温每升高 (降低) 1°C , 可使年平均流量减少 (增加) $1.71 \text{ m}^3/\text{s}$, 则需要增加 (减少) 11 mm 降水量, 年平均流量才能达到平衡, 而在实际当中年降水量的变率远远大于年平均气温的变幅, 由此则说明流量对降水量变化的敏感性要远大于气温; (3) 同样假定其他因子不变, 每增加 (减少) 10 mm 年蒸发量, 可减少 (增加) 年平均流量 $1.72 \text{ m}^3/\text{s}$, 则同样需要增加 (减少) 近 12 mm 降水量, 年平均流量才能达到平衡, 说明降水量除用于流量补给和地表蒸发外, 尚有其他消耗, 这是符合客观规律的; (4) 事实上, 以上两种假定在现实当中是不可能成立的, 因为 E 、 D 均与 T 密切相关, 并可建立如下关系式: $E = 847.779 + 8.053T$, $D = 64.834 - 6.872T$, 因而可以大致得出如下变化关系, 即当气温升高 (降低) 1°C 时, 不仅可使年平均流量减少 (增加) $1.71 \text{ m}^3/\text{s}$, 同时还使 E 增加 (减少) 8.08 mm , D 减少 (增加) 6.87 cm , 进而又分别导致平均流量减少 (增加) $6.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $1.39 \text{ m}^3/\text{s}$, 从而累计使流量减少 (增加) $9.1 \text{ m}^3/\text{s}$, 则需要增加 (减少) 58.3 mm 的降水量, 方可使地表水资源达到平衡, 而近 51 年来, 黄河源区年平均气温升高了 1.28°C , 需要增加降水量 72.1 mm 才能使流量维持不变, 但事实上降水量仅增加 21.8 mm , 亏缺 50.3 mm , 使得流量减少了 $7.85 \text{ m}^3/\text{s}$, 而流量总体上减少了 $11.15 \text{ m}^3/\text{s}$, 气候变化导致流量的减少量占总减少量的 70%, 其余 30% 可能是由于人口增加、超载过牧等人类活动造成的。(5) 由标准化回归方程各因子的系数来看, 大小依次为 $d > r > e > t$, 说明对流量的作用大小, 依次为冻土、降水、蒸发和气温, 显然在地处冻土环境中的黄河源区, 多年冻土作为天然隔水层, 其对于地表水资源的形成和发育有着至关重要的作用, 而在当前随着全球气候普遍变暖, 黄河源区冻土不断退化, 其对地表水资源的涵养和保持作用不断弱化, 黄河源区地表水资源的前景是不容乐观的。

4 结论

(1) 近 51 年来年黄河沿年平均流量变化明显减少, 气候倾向率达 $-1.99 \text{ m}^3/\text{s}/10\text{a}$; 其丰枯变化十分频繁, 进入 20 世纪 90 年代以来年、四季平均流量显著减少, 并以偏枯为主; 黄河源是以季节积雪融水或雨水补给为主的河流, 流量年内分配呈单峰型。

(2) 近 51 年来黄河源区年降水量微弱增加, 其速率为 $4.28 \text{ mm}/10\text{a}$, 冬、春季呈增多趋势, 而夏、秋两季则表现出微弱的减少趋势; 降水量对流量有着较为显著的影响; 降水量对流量的影响具有一定的持续性, 冬春季降水量对流量的影响不甚显著, 其流量主要依赖于冰雪融水补给; 秋季降水量不仅有利于对流量的持续补给, 而且在高海拔地区形成积雪, 于冬春季融化补给到流量当中; 秋季流量对四季及年降水量的响应最为显著。

(3) 黄河源区气温的显著升高对于加大流域蒸发量导致流量补给的减少作用要大于其升高致使冰雪融水的补给作用; 春季气温对流量的作用最为显著, 夏季流量对气温的响应最为敏感; 气温对流量的影响同样具有持续性, 并以春季气温的持续性影响最为突出; 黄河源区冬春季流量的补给以冰雪消融为主, 且冰雪消融主要集中在 9 月份, 其对流量的补给可以持续到来 9 月份。

(4) 近 51 年来黄河源区年蒸发量呈显著增大趋势, 其气候倾向率为 $12.4 \text{ mm}/10\text{a}$, 冬、春、夏、秋季蒸发量均显著增大; 蒸发量的增大(减少)必然导致流量的减少(增大), 蒸发量对流量的作用同样具有明显的持续性, 春季蒸发量对流量的作用显著, 而夏、秋季流量对蒸发量的响应较为敏感。

(5) 黄河源区冻土呈现出显著的退化趋势, 其季节冻土年平均冻结厚度和冻结时间均在明显减小, 其中冻结厚度以每 10 年 10.8 cm 的速率减小, 而季节冻土冻结时间则以每 10 年 13.2 天的速率缩短; 冻土作为特殊的大厚度区域性隔水层, 其退化导致了地表径流的减少。

(6) 年平均流量随着年平均气温的升高、降水量的减少、蒸发量的增大和冻土厚度的减小而减少, 反之则相反; 气候变化导致流量的减少量占总减少量的 70%, 其余 30% 可能是由于人口增加、超载过牧等人类活动造成的; 气候及冻土因子对流量的作用大小, 依次为冻土、降水、蒸发和气温, 显然多年冻土对于地表水资源的形成和发育有着至关重要的作用。

参考文献 (References)

- [1] Lan Yongchao, Ding Yongjian, Shen Yongping et al. Review on impact of climate change on water resources system in the upper reaches of Yellow River. *Advances in Climate Change Research*, 2005, 1(3): 122-125. [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. *气候变化研究进展*, 2005, 1(3): 122-125.]
- [2] Pei Buxiang. Calculation and Measurement of Evaporation and Evapotranspiration. Beijing: China Meteorological Press, 1989. 87-91. [裴布祥. 蒸发和蒸散的测定与计算. 北京: 气象出版社, 1989. 87-91.]
- [3] Tang Qicheng, Qu Yaoguang, Zhou Yuchao. The Utilization of Hydrology and Water Resources in Arid Areas of China. Beijing: Science Press, 1992. 44-80. [汤奇成, 曲耀光, 周聿超. 中国干旱区水文及水资源利用. 北京: 科学出版社, 1992. 44-80.]
- [4] Li Lin, Wang Qingchun, Zhang Guosheng et al. The influence of climate change on surface water in the upper Yellow River. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(5): 716-722. [李林, 汪青春, 张国胜等. 黄河上游气候变化对地表水的影响. *地理学报*, 2004, 59(5): 716-722.]
- [5] Li Lin, Wang Zhenyu, Qin Ningsheng et al. Analysis of relationship between flow-off amount and its impacting factor over the upper reach of Yangtze River. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(6): 694-700. [李林, 王振宇, 秦宁生等. 长江上游径流量变化及其与影响因子关系分析. *自然资源学报*, 2004, 19(6): 694-700.]
- [6] Shi Yafeng. The Impact of Climate Change on Water Resources over North and Northwest China. Jinan: Shandong Science Press, 1995. 127-141. [施雅风. 气候变化对西北华北水资源的影响. 济南: 山东科学出版社, 1995. 127-141.]

- [7] Wang Suping, Song Lianchun, Han Yongxiang et al. Impacts of climate change on ecological environment in Maqu grassland. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(4): 556-561. [王素萍, 宋连春, 韩永翔 等. 玛曲气候变化对生态环境的影响. 冰川冻土, 2006, 28(4): 556-561.]
- [8] Zhang Senqi, Wang Yonggui, Zhao Yongzhen et al. The multi-year tjale degeneration and its environment reflection at the source of Yellow River. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(1): 1-6. [张森琦, 王永贵, 赵永真 等. 黄河源区多年冻土退化及其环境反映. 冰川冻土, 2004, 26(1): 1-6.]
- [9] Li Lin, Li Fengxia, Guo Anhong et al. Study on the climate change trend and its catastrophe over "Sanjiangyuan" region in recent 43 years. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(1): 79-85. [李林, 李凤霞, 郭安红 等. 近 43 年来 "三江源" 地区气候变化趋势及其突变研究. 自然资源学报, 2006, 21(1): 79-85.]
- [10] Li Lin, Zhu Xide, Wang Qingchun et al. Study on the some facts of tjale degeneration on Qinghai plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(3): 320-328. [李林, 王振宇, 汪青春 等. 青海高原冻土退化的若干事实揭示. 冰川冻土, 2005, 27(3): 320-328.]

Changes and Influencing Factors of Surface Water Resources in the Source Region of the Yellow River

CHANG Guogang¹, LI Lin², ZHU Xide², WANG Zhenyu², XIAO Jianshe³, LI Fengxia³

(1. *Qinghai Meteorological Bureau, Xining 810001, China;*

2. *Qinghai Climate Center, Xining 810001, China;*

3. *Qinghai Institute of Meteorological Sciences, Xining 810001, China)*

Abstract: Taking the source region of the Yellow River as a study area and based on the data from Madoi Meteorological Station and Huangheyan Hydrological Station covering the period 1955-2005 in the study area, this paper analyses the changing trends of surface water resources, climate and frozen ground and reveals their causes. Some conclusions can be drawn as follows: (1) Results show there exist frequent fluctuations from high to low water flow in recent 51 years. Generally speaking, the discharge has shown a declining trend in the 51 years especially since the 1990s. The annual distribution shows one peak which, year on year is getting smaller. (2) Precipitation has a significant and sustained influence on discharge. (3) A sharp rise of temperature in the source region resulted in the increase of evaporation and the decrease of discharge supply, which has a greater effect than on ice-snow melting, as indicated by the fact that the rising spring temperatures played the most important role in this process. (4) Frozen ground tends to be degraded markedly. Permafrost is impermeable so there is a negative correlation between the thickness of the active layer and permeability, whereas there is a significant positive correlation between the permafrost thickness and the discharge. (5) Evaporation rates are significantly increasing, leading to the decrease of discharge. (6) 70% of the discharge reduction resulted from climate change, and the remaining 30% may have been caused by intensified human activities. The major factors influencing the discharge are, in the order of their effects, frozen ground, precipitation, evaporation and temperature. It is evident that permafrost is of utmost importance in the formation and development of surface water resources in the source region of the Yellow River.

Key words: surface water resources; climate change; frozen ground; the source region of the Yellow River