

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2015.06.007

平凉黄土山地带气候变化、人类活动与水资源问题

谭红兵¹, 金 犇¹, 王若安², 张玉东¹, 柳子豪¹

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 甘肃省平凉市气象局, 甘肃 平凉 744000)

摘要:依据1951—2014年气象数据统计分析及野外调研资料,讨论了1951年以来陇东黄土山地带降水量、气温变化特征及趋势。结果表明,伴随全球气候变暖,平凉地区最近20年以来不论全年、冬半年或夏半年平均气温都呈明显上升趋势,自1997年以来平均气温比之前40年上升1.2℃。相比之下,除冬半年降雪量略呈减少趋势外,年总降水量并不存在显著增加或减少趋势,而更倾向于存在7a左右长周期变化或2a左右短周期波动。伴随气温逐年上升而降水量并不增加,退耕还林等人工干预措施不断加剧的总趋势,土壤水分或浅层黄土地下水资源量不断减少,进而影响林木生长、农业生产和生态环境有效恢复。指出黄土高原沟壑-丘陵地带退耕还林工程实施过程中,根据地形地貌特征科学合理规划耕地、休耕地、林地、草地以及树(草)种选择、林木密度等是今后长期需要研究的课题。

关键词:气候变化;黄土高原;人类活动;生态环境;水资源;平凉

中图分类号:P339

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2015)06-0045-07

Climate change, human activity and water resources issues in loess hilly areas in Pingliang

TAN Hongbing¹, JIN Ben¹, WANG Ruonan², ZHANG Yudong¹, LIU Zihao¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Pingliang Meteorology Bureau of Gansu Province, Pingliang 744000, China)

Abstract: Based on data from meteorological records during 1951 to 2014 and field observations, this paper statistically analyzed the variation of precipitation and temperature over past 60 years and prospected their discernible overall trends. With the global warming, the average temperature in annual, summer and winter half year has been going up in the recent 20 years. The average temperature has been risen of 1.2℃ since 1997, compared to 40 years ago. In contrast, besides the amount of precipitation in winter half year has the trend of decrease, the amount of annual total precipitation is inclined to show about 7-year of long periodic and 2-year of short periodic oscillations rather than a linear trend. Under the temperature rising while precipitation stable, and intensive of human activities, in particular, the development of large-scale of returning farmland to forests program, the soil moisture and groundwater will possibly continue decreasing. Finally, human living and ecological recovery will be affected by scarce of water resources in the hilly areas of the Loess Plateau. Thus, it is a long and key project to scientifically plan the farmland, fallow farmland, forest, grassland and trees (grass) species selection, forest density, etc. according to topography and geomorphology during the returning farmland to forests program in gully and hilly region in loess plateau.

Key words: climate change; Loess Plateau; human activities; eco-environment; water resources; Pingliang

近年来在陇东以西黄土高原高山丘陵-沟壑地带开展水文地质考察过程中发现,近 20 多年国家实施退耕还林工程以来,黄土高原生态环境确实发生了翻天覆地的变化,特别是高山地带水土保持等方面效果显著。作为国家重大战略工程的西部山区退耕还林、水土保持,所产生的生态环境效益不容置疑^[1]。然而,在全球气候变化与人类活动不断加剧的双重作用下,特别是在前人大量研究表明黄土高原气温持续上升、降雨量总体减少的趋势下^[2-4],一些新出现的水资源以及生态环境问题也不应回避,值得深入研究。黄土高原山区相对干旱,降水的季节分布极为不均。水循环特征及水资源是决定生态环境改善的决定性因素,因此与水资源有关的生态环境问题更为突出。在六盘山区及平凉以西的野外实地调查发现,黄土丘陵、沟壑区曾经发育的许多较大河流,现今除雨洪季节外几乎全部演变成干河滩,许多曾经宽阔的河道因长期断流已被开垦为耕地。另外山区大量水井和泉水也在 20 多年来水量开始减少甚至干涸。那么,黄土高原山区河流断流、浅层黄土地下水水位下降或泉井干涸,是否主要由气候变化原因引起,或者可能与地表覆被、区域地形地貌变化导致降水补给减少有关,这些问题值得科学论证。笔者主要以 1951 年以来平凉地区记录的气温、降水气象数据为基础,结合近年来在黄土高原水文地质研究中的科学实践,分析黄土高原山区气温、降水变化特征,预测其趋势,进一步论证气候变化、人类活动加剧背景下,黄土高原高山丘陵-沟壑区重点应该关注的水资源问题,为山区经济社会发展规划、生态环境保护提供参考。

1 降水与气温多年变化特征

1.1 降水多年变化特征

平凉市位于六盘山区,地理区划上属于陇东黄土高原西部,其气象记录基本可以代表陇东黄土高原西部山区气候状况。如果按传统的以降水标准划分的湿润、干旱或半干旱气候类型分析,自 1951 年有完整气象记录资料以来,没有出现过年降水超过 800 mm 的显著湿润气候年份,也没有出现小于 200 mm 的干旱气候年份,大多数年份介于湿润与半干旱气候特征之间。

1951 年以来,六盘山地区年降水量不同年份虽然呈现出较大的变化,但时间序列双变量相关分析结果没有通过显著性检验,线性拟合 R^2 值基本接近于 0,多年降水分布图也难以分辨出明显增加或减小的趋势,趋势线几乎沿 1951—2014 年年降水平均值(502.4 mm)水平保持不变(近乎平行于年份坐标

轴),更倾向于干-湿交替的周期性波动特征(图 1)。从移动平均时间序列趋势线看,大致存在不定周期的波动,凭肉眼观察似乎可以识别出 5~10 年左右出现降水峰值年。为更准确定量地判断 1951—2014 年降水是否存在一定周期性变化,这里做时间序列周期波动频谱分析,以此来验证一些较强降水年周期性波动的“典型化事实”,特别是对周期波动的长度特征从统计上进行客观的测量。从谱密度图(图 2)看,在频率 $f=0.08 \sim 0.14$ 之间出现突出的宽峰,最强拐点为 $f=0.14$,对应时间周期 $T=1/f=7.14$ a,从趋势图(图 1)看,确实可以分辨出更接近于 7 a 左右周期的强降水峰值。除这一长周期外,在 $f=0.438$ 处还有一突变峰,对应 $T=2.28$ a,表明年降水总体上还存在大约 2 a 周期的次级波动,这从年降水量变化图的锯齿型峰谷交替特征也可得到验证(图 1)。由于年降水受控于夏半年降水,因此夏半年降水量频谱分析结果与年降水趋势一致,不再赘述。当然仅凭有限的气象资料,难以准确识别气候变化更长的周期。

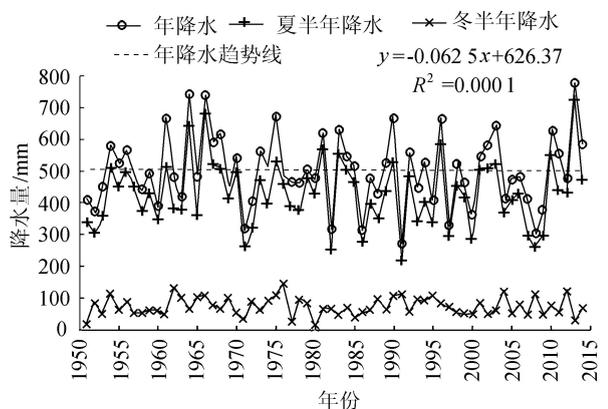


图 1 平凉地区 1951—2014 年逐年、夏半年(4—9 月)及冬半年(10 月至次年 3 月)总降水量变化曲线

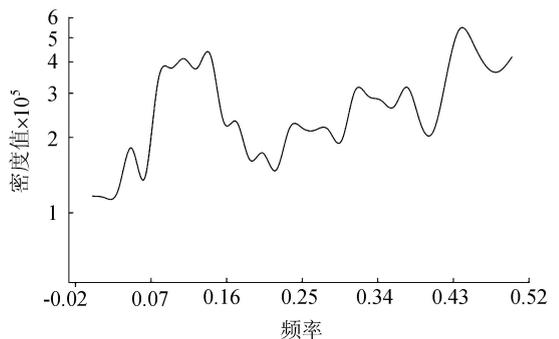


图 2 1951—2014 年逐年降水量指标谱密度

如果以 1951—2014 年降水平均值(502.4 mm)为参照,20 世纪 50 年代总体为干旱年份,仅 1954 年、1956 年为显著湿润年。20 世纪 60 年代降水量除 1963 年、1965 年、1969 年外,基本一直保持较高水平,总体属于湿润年份阶段,是过去 60 多年以来

湿润期持续最长的时间段,特别是1964年、1966年总降水量均大于700 mm。20世纪70年代的1975年降水量最大,显著高于多年平均值水平,其他年份大多低于平均值水平,特别是70年代后期几年的降水量持续保持较低水平;80年代的前5年降水量总体增加,特别是1981年、1983年为显著湿润年份,后5年又基本低于多年平均值水平,总体属于干旱阶段。90年代又出现相对湿润阶段,有5个年份高于平均值水平,其中1990年、1996年为显著湿润年。21世纪初降水量增加,特别是2001年到2003年持续3年高于平均值水平,然后从2004年开始一直到2009年,降水量一直低于多年平均值,因此2008年之前的资料表明黄土高原降水似乎有微弱减小趋势^[5-7]。然而,从2010年开始至今,降水量总体又表现为增加趋势,特别是2013年达到1951年以来气象记录的最大降水年,总降水量达776 mm。由此,加上最近几年资料,可认为年降水更趋向于周期性波动,微弱减小趋势可以忽略。

从多年季节降水变化特征来看,由于黄土高原典型的季风气候,年降水主要集中于夏半年,因此1951年以来夏半年降水趋势线与年降水趋势十分一致,时间序列周期波动频谱分析表明,强降水长、短变化周期也分别为7 a和2 a左右,与年降水变化特征完全一致,表明年降水主要受控于夏半年降水,夏半年降水占全年降水总量的70%以上,20年以来基本大于80%以上。相比之下,冬季降水多年变化幅度比夏季小。值得注意的是,近20多年以来冬季降水普遍较少,除2004年、2008年及2012年略高于多年平均值外,其他年份都低于平均值,且相对于过去40多年有普遍减小趋势。即使2013年经历1951年以来最强降水,但冬半年降水量却仍然很小,只有28 mm,不到年总降水量的4%。

1.2 气温多年变化特征

1951—2014年年平均、冬半年及夏半年平均气温情况如图3所示(图中水平线为1951—2014年平均值线)。不同于降水的周期波动变化,气温最显著的特征是自1997年以来呈显著上升的总体趋势。时间序列对应的年平均气温呈现较好的相关性,双变量Pearson相关性分析表明,在置信度为0.01(双侧)水平上显著相关,相关系数0.664,线性拟合直线斜率大于0(拟合度 $R^2=0.44$),表明气温上升趋势显著。1997年之前,气温虽有不定周期的波动,但除少数几个年份外,总体变化在1951—2014年这64年平均值水平之下。在1997年之前的近40年间,年平均最高气温是1953年的 9.6°C ,其他大多数年份小于多年平均值 9.0°C 。但最近20年以来

气温全部高于多年平均值水平,大多高于 10.0°C ,最高年平均气温2013年达 10.9°C ,比1997年之前最高气温年份(1953年)还高 1.3°C 。1997—2014年多年平均气温 9.9°C ,比1951—1996年多年平均值(8.7°C)高 1.2°C 。

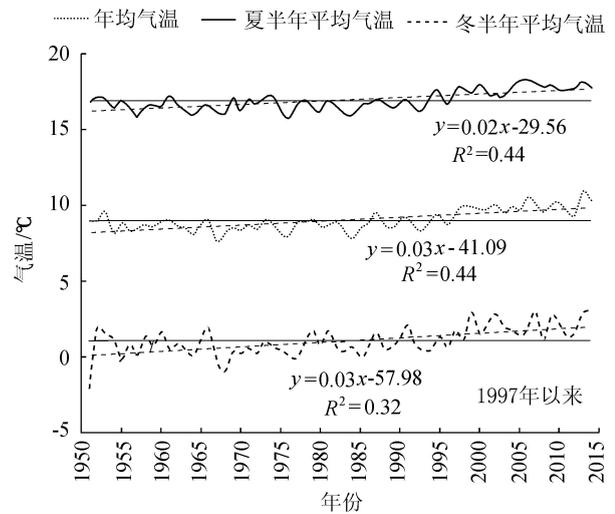


图3 1951—2014年逐年、夏半年及冬半年平均气温变化曲线及趋势

从多年平均值的季节变化特征来看,不论夏半年平均气温还是冬半年平均气温,都与年平均气温变化趋势有较好的响应关系,特别是最近20年以来的全年平均气温上升趋势也体现在冬半年和夏半年气温曲线上。自1997年至今,夏半年平均气温(17.7°C)、冬半年平均气温(2.0°C)比之前40多年夏半年(16.6°C)、冬半年平均值(0.7°C)分别高 1.1°C 和 1.3°C 。另外,最近20多年以来,冬半年从未出现平均气温低于 0°C 或接近于 0°C 左右($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$)的较冷季,但之前1951年、1955年、1967—1968年、1977年、1985年、1993—1994年大约不到10 a左右周期都会出现冬半年显著低温年(0°C 或接近 0°C)。

2 人类活动

平凉地处陇东黄土高原典型的山地丘陵-沟壑区,以前因人口密度较小,人类活动多以农业为主,自然环境相对保持原始特色。近数十年,特别是最近20多年以来,在人为干预下生态环境发生了翻天覆地的变化。退耕还林、梯田建设、淤坝造田、新农村建设、大规模河道采砂或山坡采石(土)等一系列人类活动对山区环境施加了空前的影响。其中,退耕还林是国家为改善山区生态环境而实施的最大惠农政策,自实施该政策以来至2007年,仅平凉地区已累计完成退耕还林 $20.48\text{万}\text{hm}^2$,森林覆盖率由1979年的8.5%增加到17.98%^[8]。平凉地区2005年总

林地面积占 28.69%，而 2009 年时已增加至 37.69%（根据第二次全国土地调查资料）。并且根据当地政府规划，今后很长时期退耕还林工程仍将继续实施。由此可见，平凉地区退耕还林工程的实施极大地改变了山区土地覆被类型。

与退耕还林工程规模相近甚至更大的另一项人类活动，是为促进水土保持而数十年来坚持不懈的梯田工程建设。野外调查发现，能够开垦的陡坡地目前基本都已整平，昔日大片的陡坡地在很多流域已难觅踪影，从山顶到沟底取而代之的是平整的梯田。目前，平凉地区水平梯田建设面积已达 24.47 万 hm^2 ，占耕地面积的 60.7%^[9]。这一人为工程措施，极大地改变了区域性地形地貌条件。

除水土保持措施等人类活动对生态环境施加了较大的影响外，平凉地区 20 多年以来为不断满足各类工程建设的需求，大规模采挖河道泥沙，或者开山采石、大规模挖土烧砖等，这些也对区域或局部生态环境产生了较大的影响，而且这种发展趋势短期内难以改变。随着城市化和新农村建设的发展，山区曾经散居的居民近年来开始集中向城镇特别是新农村集中聚居，这势必对原本脆弱的生态环境产生不利影响，一些区域原本有可满足村镇基本需求的地下水资源，自大量人口集中迁居之后，地下水开采量超过地下水资源承载力，导致仅仅数年时间已无浅层地下水可采。

总而言之，陇东黄土高原西部丘陵-沟壑区各类大规模人类活动正在对山区原本自然状态的生态环境施加前所未有的影响，其有利的一面显而易见，但不利的一面是今后值得长期监测研究和客观评估的重大课题。

3 区域气候变化趋势预测与水资源问题

3.1 区域气候变化趋势预测

全球气候变化研究表明，20 世纪末全球平均气温上升了 0.74°C ，全球变暖趋势 20 世纪的后半个世纪明显高于前半个世纪^[10-11]。近期对我国中部黄土高原地区研究发现^[12]，黄土高原地区陆地气温在过去 2 万 a 内升高了 $5.5 \sim 7.7^{\circ}\text{C}$ ，比科学界此前一些气候模型的分析结果高 2~4 倍。从平凉地区气象记录资料来看，虽然难以获取更长尺度的气温变化趋势，但最近 20 年以来气温显著上升与全球变暖趋势基本一致，短短不到 20 年时间年均气温已比过去 40 多年的气温增温超过 1°C 。这也与黄土高原前人气象资料分析结果基本一致。这种气候变暖趋势不容置疑，且一年四季气温都比过去多年相应季节有所升高，冬半年增温幅度更大。这也体现在

1980 年之前平凉地区冬季往往白雪皑皑，高山处积雪数月不化，但最近 20 年以来冬季已鲜见大雪，更难见山区大面积出现数月积雪的景象。

与降水量相比，最近 20 年气温的显著上升并没有使年平均降水出现增加的趋势，但近 20 年冬半年降水减少与气温上升有良好的响应关系。由于黄土高原冬季降水以内陆水汽为主^[13]，冬季升温可能不利于山区局地水汽云团的形成。自 2010 年以来，平凉地区降水量似乎一直在增加，特别是 2013 年降水量比过去 64 年都多，2014 年虽然总降水量并不多，但 9 月份几次异常强降水，如 2014 年 9 月总降水量达 205 mm，当地人普遍误认为降水量开始增加。但是前人的大量研究资料表明，黄土高原年均降雨量呈现出微弱的逐年减少趋势^[5-7]。也有研究表明，黄土高原年降水量虽然呈现微弱的减少趋势，但是波动幅度和变异系数都在增加^[14]。从平凉地区近 64 年降水曲线分析，特别是在前人基础上加上最近 10 年数据，持续增加或者减少的趋势并不显著，而更倾向于正常的 7 a 左右长周期和 2 a 左右短周期降水波动，因为 2000—2003 年经历较强降水后，确实有过一段持续较长周期的低年降水量阶段（2004—2009 年），但 2010 年又开始上升，2013 年经历最强降水。到 2015 年 9 月初，全年尚差 4 个月的气象数据，但从夏季野外调查来看，2015 年入夏以来旱情严重，平凉静宁等地旱情一直持续至 9 月。由此可以预测，尽管气温显著上升，并伴随厄尔尼诺事件的发生，有可能出现极端降水或干旱事件，冬季降雪随冬半年显著升温也势必减少，但年降水量即使不出现如前人预测的持续减少趋势，也可以肯定地说不会有增加趋势，至少从截至 2014 年的资料尚难判定这一趋势，而是大体上保持 7 a 长周期、2 a 短周期的波动，与过去总的降水时间序列变化趋势一致。当然，如果平凉地区气温继续保持这种上升趋势，全球气候变暖进一步加剧，特别是在外围蒙古-中国东北变暖，青藏高原东南继续变冷，东亚夏季风持续减弱的条件下，对陇东黄土高原西部地区降水影响效应可能会慢慢加强，特别是夏季降水有可能显著减少，旱情加重。

3.2 潜在的水资源问题

由以上 1951—2014 年气象数据及全球变化资料分析可知，平凉黄土高原高山丘陵地带近 20 年以来气温显著上升的趋势不容置疑，年降水量虽然没有明显减少趋势，但更没有呈增加趋势，基本与过去 60 多年保持相似变化周期。相反，近数十年，特别是山区大规模实施退耕还林、城市化和新农村建设以来，人类活动对山区生态环境施加了前所未有的

影响,而且影响趋势不可避免仍在加剧,如土地覆被变化,山区河流大多断流,大规模河道淘沙、山坡大规模开挖岩(土)以满足不断增加的建材需求,一些区域地下水水位下降,土壤水减少或出现明显干层等不容忽视的生态环境问题。基于多年在黄土高原实地工作的野外观察调研及各类数据资料分析,笔者认为,在目前这种气候变化和人类活动加剧的趋势背景下,对黄土高原高山地区重点应关注以下与水有关的科学问题。

3.2.1 区域水循环的改变

平凉黄土高原高山地区大面积退耕还林、梯田建设、沟壑填平等各类水土保持措施有效地减少了土壤侵蚀,增加了土壤蓄水,减缓了森林-草地等植被需水要求。但北方降水毕竟不同于南方,因区域有限的降水和强烈的蒸发蒸腾条件,特别是未来降水并不增加但气温显著上升趋势下,人为干预下的土地覆被大面积变化也极大地影响降水在蒸发蒸腾、径流以及土壤水-地下水补给的分配方式,因此大范围的水土保持措施无疑会对区域水循环产生不同程度的影响,最终反作用于生态环境,如土壤干层导致林木最终大面积枯死或生长不良,农作物减产等。当然,区域生态环境改变,林木草地增多,也有可能改变区域水循环促进降水。对于大面积草木生长的平原地区是有这种可能的,林木蒸散发水汽增多后,相应地也可能仍然会以降水形式部分回到地面;但对于黄土高原沟壑丘陵地区,即使林木蒸散发产生更多水汽,也因干燥的内陆环境以及风力等作用,很难在相对较小的区域内出现降雨增强效应,何况这需要林木大面积成片成带分布才有可能改变区域水循环,高山、深沟的地形条件及沙漠、裸露山地交错的地貌条件都难以形成大面积林木集中分布。

在自然界中,土壤水分状况是降水与植被共同作用的结果,在无人干预的条件下,当降水量为一定值时,植被会有与之相应的种类构成、密度及生长量等,并按固有的自然规律演替与发展,降水与植被处于一种平衡状态,土壤水分也会处于一种相对稳定状态^[12]。但近20年以来山区大面积退耕还林,人为地引进非当地自然群落的优势种,势必打破原有的降水和植被平衡,加之气温逐年上升,植被蒸腾或土壤蒸发过度耗水,最终导致土壤水补给量及补给深度减少,出现“土壤干层”,并间接地影响地下水补给。笔者前期在六盘山以西大面积退耕还林区进行调查,发现当地大面积种植高大灌木杏树、柳树或苹果树等10多年后,在2~3m甚至更深的部位出现明显低土壤含水率层位,即使经历2013年湿润

年的强降水补给也难以消除明显土壤干层,导致树木生长状况变差,附近农田也受到影响^[16]。黄土高原土地覆被变化导致土壤干层出现,前人近年来也有大量报道^[1, 15, 17-19]。

由此可见,退耕还林等生态环境建设有其不利的一面,值得正视和研究。近年来,Jiang等^[20]依据黄土中2万a以来保存的孢粉记录,辩证地提出黄土高原更适合种草,这样才更有利于生态环境恢复。当然,这是一个争论很久的科学问题,但根据野外工作经验,类似的地形条件,荒草丛生的区域深层土壤含水率显著高于林地。因此,黄土高原高山地区如何更科学地促进生态环境建设和水循环良性发展,特别是人为干预土地覆被变化时如何科学合理规划耕地、休耕地、林地、草地以及退耕还林还草过程中树(草)种选择、林木密度等都是今后长期需要研究的课题,否则,伴随气温逐年上升而降水并不增加的趋势,从长远角度而言,退耕还林工程的社会经济效益和生态环境效益将面临严峻考验。实地考察表明,完全可以采取一些更为积极的措施配合退耕还林工程,如一些生长缓慢,需水量不大,周期较长的树种极适合于在干旱-半干旱山区栽种,但目前一些地方急于求成引进成长快速、耗水量大的树种显然是不科学的。从当地苹果树种植情况来看,山区无灌溉条件下大面积高密度种植苹果树,将会大范围内消耗大量的土壤水分,过不了几年苹果树就会出现枯萎、死亡或生长不良现象;而密度种植小,面积不大的片区,苹果树生长良好,产量也高。另外,一些隔年耕种的休耕地土壤含水率明显高于林地,也高于连年耕作地。从生态环境保护的角度而言,还林区与休耕地、草地、耕作地等间隔分布,要比全部种植林木效果好得多。

3.2.2 山区水资源供给问题

平凉黄土高原高山地区大面积退耕还林、梯田建设、沟壑填平、淤坝造田等过程对区域水循环造成如上分析的趋势背景下,最终会对区域水资源供给产生严重影响。伴随近20年气温显著上升而降水没有显著增加,甚至未来有可能减少的趋势下,山区水资源量变化趋势更值得关注。笔者调查过的六盘山以西的黄土丘陵-沟壑地带20年前几乎所有县城或乡镇都有较大的常年性河流,这些河流是山区居民生活或农业灌溉的主要水资源,但近20年来,绝大多数曾经流量可观的河流或沟谷溪流现在几乎常年难见有流水,特别是如通渭县陇川河、静宁县田堡河、张家小河20世纪70—80年代初都有常年性流水,现在除雨洪季节外几乎成干河滩,甚至大多被开垦为耕地。即使如流经平凉的泾河这样的滔滔大

河,其径流量也存在显著的递减趋势,并且近 20 年以来径流量急剧减少(据张家山水文站实测径流资料分析)。另外,山区曾经有大量水井和泉水,是居民赖以生存的良好水源,许多山沟近 10 多年来水量开始减少,地下水水位下降甚至泉井干涸。

山区可供利用的浅层地下水资源减少有许多复杂的影响因素,但在黄土高原,土地利用/植被覆盖、地形因素、气候等,是河流、地下水补给的最重要影响因素。年降水量在 1951—2014 年虽未增加,但也并未显著减少,气温虽然上升趋势明显,但一般不会直接对已补给到地下的水量产生明显影响,主要通过地表覆被变化导致蒸发或蒸腾作用加强而间接产生影响。山区河流、地下水资源量减少趋势在近 20 年以来显著加剧,与近 20 年以来人为干预下土地覆被巨大变化相对应。因此,人为干预下的土地覆被变化、水土保持措施可能是山区河流断流、地下水水位下降或泉井干涸的主要原因。前人研究提出土地耕作类型从小麦种植转化为苹果树后,深部土壤水补给显著减少,可能导致对地下水补给减少^[18],也有认为休耕地是维持土壤水文地质可持续的最有效覆被方式^[21]。对于黄土高原浅层地下水的补给,大多认为黄土高原浅层地下水补给主要依赖地表各种断裂带、滑脱面、黄土-古土壤(红黏土)接触面^[22]以及内部存在的各类优势通道入渗补给^[19, 23-24]。近数十年来大规模的梯田建设、沟壑整平等措施极大地改变了山区降水垂直快速入渗的自然补给通道,大面积退耕还林加上气温上升使植被蒸腾作用加强,耗去了大量土壤水分,但年总降水量并没有相应增加,且降水主要集中在夏季蒸发蒸腾最强阶段,从而间接地减少了对地下水的绝对补给量,或影响了地下水补给速率。相应地,山区许多沟谷河流大多源于沿程泉水排泄补给维系终年有水,一旦地下水减少或排泄泉干涸,河流流量自然减少,甚至河流断流。有研究发现土地耕作利用不利于地下水补给,相反,减少土地耕作种植则会明显增加地下水补给速率^[21]。当然,黄土高原一些大河如泾河等断流或流量减少,除以上因素外,也与上游水库建设或调水工程分流有关。

近年来,国家大规模实施惠农政策,平凉地区即使比较偏僻的乡村,也已通自来水工程或正在实施饮水工程,但水源大多仍以地下水为主,即使山区减少或暂停黄土层泉水或井水利用,地下水作为基本水源,其水循环机制及水资源量变化趋势仍需要长期进行研究监测。首先要查明补给机制,才有可能更好地加强水资源保护和增加补给率。然而,时至今日,降水如何通过厚层黄土非饱和带补给高山地

区地下水仍然存在很大争议。从气温上升而降水量并未增加、人类活动不断加剧的趋势,可以预见黄土高原山区地表水、地下水资源量将会发生更大的改变,更需要加强预测研究。

4 结 论

a. 平凉黄土高原丘陵-沟壑区近 20 年以来年平均或夏半年、冬半年平均气温都存在显著的上升趋势,与全球气温变化趋势同步,但全年总降水量并未出现增加趋势,而更倾向于存在 7 a 左右长周期变化或 2 a 左右短周期波动。

b. 与气候变化对应,近 20 年以来人类活动对区域生态环境、局部地形地貌影响趋势不断加剧,人为干预下的土地覆被变化特征明显。

c. 气温逐年上升而降水量并不增加,退耕还林等人工干预措施不断加剧的总趋势,势必对区域水循环产生重大影响,从而导致山区地表水、地下水资源减少,水资源紧张状况可能长期存在。这些因素对山区供水及生态环境改善的不利影响值得关注 and 评估。

参考文献:

- [1] ZHANG Fu, XING Zisheng, HERB W R, et al. Assessment of effects of two runoff control engineering practices on soil water and plant growth for afforestation in a semi-arid area after 10 years [J]. *Ecological Engineering*, 2014, 64: 430-442.
- [2] CHEN Feng, YUAN Yujiang, ZHANG Ruiibo, et al. A tree-ring based drought reconstruction (AD 1760-2010) for the Loess Plateau and its possible driving mechanisms [J]. *Global and Planetary Change*, 2014, 122: 82-88.
- [3] SUN Changfeng, MA Yongyong. Effects of non-linear temperature and precipitation trends on Loess Plateau droughts [J]. *Quaternary International*, 2015, 372: 175-179.
- [4] 周晓红,赵景波. 黄土高原气候变化与植被恢复 [J]. 干旱区研究, 2005, 22 (1): 116-119. (ZHOU Xiaohong, ZHAO Jingbo. Climatic change and vegetation restoration on the Loess Plateau [J]. *Arid Zone Research*, 2005, 22 (1): 116-119. (in Chinese))
- [3] 姚玉璧,李耀辉,王毅荣,等. 黄土高原气候与气候生产力对全球气候变化的响应 [J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23 (2): 202-208. (YAO Yubi, LI Youhui, WANG Yirong, et al. Effects of the climate and climatic productivity in the Loess Plateau of China on global change [J]. *Agriculture Research in the Arid Areas*, 2005, 23 (2): 202-20. (in Chinese))
- [6] 王若安. 近 50 年平凉黄土高原沟壑区气温和降水变化

- 趋势分析[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(35): 17564-17566. (WANG Ruoan. Analysis of the past 50 years' change trend of temperature and precipitation in Pingliang Gully region of Loess Plateau [J]. Journal of Anhui Agriculture Science, 2009, 37(35): 17564-17566. (in Chinese))
- [7] 李海防, 卫伟, 陈利顶, 等. 黄土高原林草地覆盖土壤水量平衡研究进展[J]. 水土保持研究, 2013, 20(1): 287-293. (LI Haifang, WEI Wei, CHEN Liding, et al. Progress in the study of soil water balance under forest and grassland covers on the Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(1): 287-293. (in Chinese))
- [8] 窦俊涛. 西部贫困地区退耕还林工程后续发展刍议[J]. 甘肃农业, 2007(8): 66-68. (DOU Juntao. Future development of Program to Return Farmland to Forests in Western China [J]. Gansu Agriculture, 2007(8): 66-68. (in Chinese))
- [9] 郑学军. 平凉市梯田建设情况调查与思考[J]. 农业科技与信息, 2015(4): 27-28. (ZHENG Xuejun. Observation on construction of terraces in Pingliang area [J]. Information of Agricultural Science and Technology, 2015(4): 27-28. (in Chinese))
- [10] ZHAI P M, PAN X H. Trends in temperature extremes during 1951-1999 in China [J]. Geophys Res Lett, 2003, 30(17): 1913-1916.
- [11] YOU Q, KANG S, AGUILAR E, et al. Changes in daily climate extremes in the eastern and central Tibetan Plateau during 1961-2005 [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2008, 113(7): 1639-1647.
- [12] ROBERT A E, CAMILLE R, JONATHAN L M, et al. High regional climate sensitivity over continental China constrained by glacial-recent changes in temperature and the hydrological cycle [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013, 110(22): 8813-8818.
- [13] HUANG J Z, TAN H B, WANG R A, et al. Hydrogen and oxygen isotopic analysis of perennial meteoric water in northwestern China [J]. Journal of China Hydrology, 2015, 35(1): 33-40.
- [14] 袁素芬, 唐海萍. 全球气候变化下黄土高原泾河流域近40年的气候变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(9): 43-48. (YUAN Sufen, TANG Haiping. Variations of the climatic characteristics in the past 40 years of Jinghe River Basin, Loess Plateau of China [J]. Journal of Arid Land Resources And Environment, 2008, 22(9): 4-48. (in Chinese))
- [15] 侯庆春, 韩宝莲, 韩仕峰. 黄土高原人工林草地“土壤干层”问题初探[J]. 中国水土保持, 1995(5): 11-14. (HOU Qingchun, HAN Baolian, HAN Shifeng. Primary discussion on the dry layer in human woodlands in the Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 1995(5): 11-14. (in Chinese))
- [16] 温夏伟, 谭红兵, 黄锦忠, 等. 黄土山地典型覆被类型对土壤水分运动的影响[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(9): 11-14. (WEN Xiawei, TAN Hongbing, HUANG Jinzhong, et al. Effects of typical land-cover types on soil water movement in the loess hilly areas [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(9): 11-14. (in Chinese))
- [17] 马非, 张亚红, 谢应忠. 半干旱黄土高原丘陵区不同植被条件下土壤水分研究进展[J]. 农业科学研究, 2007, 28(1): 76-79. (MA Fei, ZHANG Yahong, XIE Yingzhong. Progress of the soil moisture under different vegetation condition in semi-arid hill area of Loess Plateau [J]. Journal of Agricultural Sciences, 2007, 8(1): 76-79. (in Chinese))
- [18] HUANG Tianming, PANG Zhonghe. Estimating groundwater recharge following land-use change using chloride mass balance of soil profiles: a case study at Guyuan and Xifeng in the Loess Plateau of China [J]. Hydrogeology Journal, 2011, 19: 177-186.
- [19] GATES J B, SCANLON B R, MU X M, et al. Impacts of soil conservation on groundwater recharge in the semi-arid Loess Plateau, China [J]. Hydrogeology Journal, 2011, 19: 865-875.
- [20] JIANG Wenying, CHENG Yufen, YANG Xiaoxiao, et al. Chinese Loess Plateau vegetation since the last glacial maximum and its implications for vegetation restoration [J]. Journal of Applied Ecology, 2013, 50(2): 440-448.
- [21] JIA Yuhua, SHAO Mingan. Dynamics of deep soil moisture in response to vegetational restoration on the Loess Plateau of China [J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 523-531.
- [22] TAN Hongbing, WEN Xiawei, RAO Wenbo, et al. Seasonal variation of stable isotopes in a precipitation-groundwater system: implications for determining the mechanism of groundwater recharge in high mountain-hills of the Loess Plateau, China [J]. Hydrological Processes, 2015, accepted.
- [23] 阎大白, 王德潜. 洛川塬黄土潜水的补给机制及黄土含水特征[J]. 地质论评, 1983, 29(5): 418-428. (YAN Taibai, WANG Deqian. Recharge mechanism and characteristics of loess aquifers in Luochuan Loess Plateau [J]. Geological Review, 1983, 29(5): 418-428. (in Chinese))
- [24] YASUDA H, BERNDTSSON R, HINOKIDANI O, et al. The impact of plant water uptake and recharge on groundwater level at a site in the Loess Plateau of China [J]. Hydrogeology Research, 2013, 44: 106-116.

(收稿日期: 2015-09-23 编辑: 彭桃英)