植被恢复对青海省北川河流域水循环演变趋势的影响

杨明楠[1], 刘景涛[1,2], 朱 亮[1,2], 周 冰[1,2], 温得平[3]

(1.中国地质科学院 水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 2.河北省中国地质调查局 地下水污染机理与修复重点实验室, 河北 石家庄 050061; 3.青海省水旱灾害防御服务中心, 青海 西宁 810001)

摘 要: [目的] 研究植被恢复对流域水循环的影响,明确植被恢复条件下流域水资源的演变趋势,为指导干旱半干旱地区开展科学的植被恢复工作提供数据支撑。[方法] 结合青海省北川河流域植被覆盖变化及长序列气象、水文数据,分析流域尺度水循环要素的演变趋势,分析植被恢复对关键水循环要素演变的影响作用。[结果] 20 世纪 80 年代以来,北川河流域丘陵山区植被覆盖快速增加,仅 2000—2019 年期间平均增幅14.98%,最大增幅 52.2%。1956—2019 年,流域年降水量相对平稳,但年径流量呈不显著衰减趋势,平均降幅 1.60×10^7 m^3/10 a,流域生态用水量增加是造成径流衰减的主要原因;植被恢复改变了流域大气降水的时空分配,在空间上更多降水用于流域内部生态消耗,减小了对下游的水源供给量,在时间上更多降水参与土壤水—地下水循环,延长了向流域外的排泄周期;地表风速、水面蒸发量、干旱指数等气象要素显著降低。[结论] 植被恢复影响下,北川河流域生态用水量增大,径流量衰减,降水—土壤水—地下水循环过程的水量比例增加,流域水源涵养能力不断提高,半干旱的气候条件有所改善。

关键词: 植被覆盖度; 流域水循环; 生态耗水; 水源涵养

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2021)05-0044-07 **中图分类号**: P339, Q948.15+6

文献参数: 杨明楠, 刘景涛, 朱亮, 等.植被恢复对青海省北川河流域水循环演变趋势的影响[J].水土保持通报,2021,41(5):44-50.DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2021.05.007; Yang Mingnan, Liu Jingtao, Zhu Liang, et al. Effects of vegetation restoration on evolution trend of water cycle at Beichuan river basin in Qinghai Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(5):44-50.

Effects of Vegetation Restoration on Evolution Trend of Water Cycle at Beichuan River Basin in Qinghai Province

Yang Mingnan[1], Liu Jingtao[1,2], Zhu Liang[1,2], Zhou Bing[1,2], Wen Deping[3]

(1.*Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, Hebei* 050061, *China*; 2.*Key Laboratory of Groundwater Pollution Mechanism and the Repair of Hebei Province, Shijiazhuang, Hebei* 050061, *China*; 3.*Qinghai Province Flood and Drought Disaster Prevention Service Center, Xining, Qinghai* 810001, *China*)

Abstract: [Objective] The impact of vegetation restoration on the water cycle of Beichaun River basin was studied and the evolution trend of water resources in the basin under the conditions of vegetation restoration was analyzed in order to provide data support for guiding scientific vegetation restoration in arid and semi-arid areas. [Methods] The evolution trend of water cycle elements at the basin scale was analyzed based on the vegetation cover change and long-term meteorological and hydrological data at Beichuan River basin in Qinghai Province. The influence of vegetation restoration on the evolution of key water cycle elements was analyzed. [Results] Vegetation coverage in the hills and mountains of Beichuan River basin had increased rapidly since the 1980s, with an average increase of 14.98% and a maximum increase of 52.2% from 2000 to 2019. From 1956 to 2019, the annual precipitation in the basin was relatively stable, but the annual runoff showed a small decreasing trend, with an average decrease of 0.16 billion m^3/10 yr. Increasing ecological water consumption caused by vegetation restoration was the main reason for decreasing runoff. Vegetation restoration had changed the spatial and temporal distribution of precipitation in the basin. In space, more

收稿日期:2021-04-21 **修回日期**:2021-06-08

资助项目:自然资源部国土资源大调查项目"湟水河流域水文地质调查"(DD20190331)

第一作者:杨明楠(1985—),女(满族),河北省承德市人,博士,助研,主要从事水文水资源方面的研究。Email:yangmingnan0101@163.com。

通讯作者:朱亮(1984—),男(汉族),河南省平顶山市人,硕士,助研,主要从事水文地质与水资源方面的研究。Email:liangzhuz@163.com。

precipitation was used for ecological consumption in the basin, which reduced the water supply to downstream regions. In time, more precipitation participated in the soil water-groundwater cycle, and prolonged the drainage period outside the basin. Vegetation restoration significantly reduced meteorological factors such as surface wind speed, water evaporation, and drought index. [Conclusion] Runoff in Beichuan River basin has decreased due to the influence of vegetation restoration. Additionally, ecological water consumption and the proportion of water in the cycle of precipitation-soil water-groundwater has increased, water conservation capacity has continued to increase, and semi-arid climate conditions have improved.

Keywords: vegetation coverage; watershed water cycle; ecological water consumption; water conservation

20 世纪 70 年代以来,中国国土绿化取得显著成效,在水土保持和防风固沙方面发挥了重要作用[1-3]。与此同时,大规模植被恢复使下垫面格局发生剧烈变化,对流域水循环条件和水文过程产生深远影响,尤其在缺水地区,局部植被恢复趋近水资源可持续利用的极限,出现了新的生态—水资源矛盾[4-5],植被恢复的水资源约束问题已成为干旱半干旱地区植被恢复过程中关注的热点问题之一。大气降水是陆地水循环的主要水分来源,从物质守恒上来看,植被恢复在消耗更多水资源的同时必然会对其他水循环环节水量分配产生影响[6-8]。受近几十年来大规模退耕还林还草的影响,黄土高原深层土壤水分普遍存在土壤干层现象,且其分布范围有不断增大的趋势[9-11];土壤水分变化进一步影响了大气降水对地下水的补给,试验尺度的观测及模拟研究显示,固原黄土区荒地转耕地使地下水年补给量由 100 mm 减为 50～55 mm[12],毛乌素沙地沙柳、柠条等植被覆盖区的地下水降水入渗补给量是裸地的 10%～67%[8];在流域尺度上,晋西南森林覆盖小流域与无林小流域相比地表径流衰减近 80%左右[13],随着森林面积的增加,在相同降雨量条件下,Abay 河流域基流降低了4.4%[14]。植被恢复引起土壤水、地下水及地表径流的变化将改变流域水循环条件,最终影响流域水资源形势[15]。因此,研究大规模植被恢复作用下水循环演变趋势,对科学认识干旱半干旱地区植被生态与水资源的协调发展具有重要意义。目前,国内关于植被恢复对水循环的研究多以点尺度或坡面尺度的观测试验和模拟研究为主,且研究区主要集中在黄土高原地区,由于水热条件的差异,青藏高原地区植被与水循环之间的相互作用与黄土高原地区存在显著差别。北川河流域是黄河上游重要的水源涵养区和国家生态环境建设的重点地区。20 世纪 80 年代开始大规模人工造林使流域植被覆盖快速增加,流域生态环境水平及水源涵养能力显著提高,但也出现了径流系数衰减、水循环变异等问题。本文结合长序列气象、水文资料及遥感数据分析流域尺度水循环要素演变趋势,阐明植被恢复对关键水循环要素演变的影响作用,对科学认识黄河上游水源涵养区生态建设与水资源的协调发展具有重要意义。

1　研究区概况

北川河位于青海省东部,是湟水河一级支流,黄河二级支流,全长 149 km,流域总面积 3 371 km^2,其中桥头水文站以上流域面积 2 774 km^2;地貌类型上属青藏高原与黄土高原的接壤地带,区内以高山、纵谷、盆地为主,地形上从西北向东南呈“C”字形;气候上属大陆性半干旱气候,且具有典型的垂直分带性,随着海拔的升高,气温、蒸发量呈递减趋势,降水量呈递增趋势,年均气温从 6.2 ℃降至－6 ℃,年均蒸发量从 1 000 mm 以上降至 800 mm 左右,年均降水量从 350 mm 左右增加至 600 mm 以上。

北川河大部分支流河谷区第四系冲洪积层厚度不大,赋水性较差,受构造沉降影响,从上游支流黑林河和宝库河交汇处的干流河谷区开始第四系冲洪积层厚度陡然增大,河水开始大量渗漏补给地下水,在桥头一带,由于基底抬升明显,河谷潜水几乎全部溢出补给河水,因此北川河桥头以上可视为一个闭合流域。从多年平均逐月降水量、径流量分配过程可以看出,流域内连续最大 4 个月降水量出现在 6—9 月,占全年降水量的 70.8%,连续最大 4 个月径流量出现在 7—10 月,占全年径流量的比例在 71.4%,径流与降水相比存在约为一个月的滞后周期,属典型的降水—地下水补给型河流[16]。

2　研究数据与研究方法

2.1　植被覆盖数据

植被覆盖数据来源于 landsat 5 TM,landsat 8 OLI 及 MODIS MOD16A2 产品,其中 landsat 数据来源于美国地质勘探局官网(USGS),空间分辨率为 30 m,重访周期为 16 d。本次研究选取了 2000 年和 2019 年 6—9 月数据,共 8 幅,对原始遥感影像进行图像预处理后,获取各月份 NDVI 值,利用 ArcGIS 10.1 软件 cell Statistics 工具实现最大值合成,利用 Landsat 红光和近红外两个通道的反射率数据,得到

地表月度 NDVI 产品的合成，进一步使用像元二分模型计算植被覆盖度，计算式如下：

$$f_{veg}=(NDVI-NDVI_{soil})/(NDVI_{veg}-NDVI_{soil})$$

式中：f_{veg}为植被覆盖度；NDVI 为混合像元的植被指数值；$NDVI_{veg}$为纯植被像元的植被指数值；$NDVI_{soil}$为纯土壤像元的植被指数值。参考高健健等[16]的估算方法，在 NDVI 频率累积表上取频率 0.5%的值为 $NDVI_{soil}$，取频率 99.5%的值为 $NDVI_{veg}$。

2.2 气象水文数据

桥头、黑林、衙门庄、牛场 4 个气象站和桥头水文站 1956—2019 年的降水量、径流量数据来自“青海省第三次水资源评价数据集”，其中径流数据是根据流域水资源开发利用状况进行逐月还原的天然径流量；1961—2019 年风速数据来源于国家气象科学数据中心(http://data.cma.cn/)；桥头气象站 1970—2019 年的年水面蒸发量数据来源于大通县气象局，是根据 E20 蒸发皿测试结果换算的 E601 型蒸发器的蒸发值；根据水面蒸发量和降水量的比值(水面蒸发量/降水量)计算干旱指数，用以反映流域气候干湿程度，其值越大说明气候越干旱。

2.3 研究方法

一个闭合流域的水循环要素可概化为大气降水、生态用水和径流三部分，其中径流由基流和地表产流组成，本文基于流域水循环模型分析大气降水、生态用水、地表产流和基流之间的变化规律。各要素之间的关系可表达为：

$$Q=R+S+U_g \tag{1}$$

$$R=P+G \tag{2}$$

式中：Q 为大气降水量；R 为还原后的天然径流量；S 为生态用水量，主要包括流域蒸散发量以及土壤、植被蓄水等；U_g 为地下水潜流量，在一个闭合流域内 U_g 为 0；P，G 分别为地表产流量和地下基流量，可以根据基流分割计算得到。

其中，S 和 R，P 和 G 之间分配比例的变化能够反映流域水资源时空分配的变化，因此，分别定义了降水分配系数(K_Q)和径流分配系数(K_R)两个指标：

$$K_Q=S/R \tag{3}$$

$$K_R=G/P \tag{4}$$

式中：K_Q 表示流域内部生态用水与流域外部径流排泄之间的关系，反映了流域水资源在空间分配上的变化；K_R 表示基流和地表产流之间的关系，反映了流域水资源在时间上分配的变化，即大气降水向流域外排泄周期的变化。

考虑到流域大部分区域包气带厚度较大，且大部分情况下一次降水不能对地下水形成有效补给，因此，采用直线分割法对月径流过程线进行基流分割。在多年平均月径流过程曲线上，从 10 月开始，受降水量减小的影响，径流量快速衰减，从 11 月开始逐渐进入冰冻期，至 12 月地表基本完全冻结，降雪基本不会河水和地下水形成补给，12 月至次年 2 月，径流呈微弱的减小趋势，从 3 月起，冰雪和地表冻结层逐渐开始融化补给河水，径流开始逐渐增加。因此将 2 月和 12 月作为基流分割点。

3 结果与分析

3.1 流域植被覆盖及水循环要素的变化特征

流域大规模植被恢复开始于 20 世纪 80 年代，近几十年来，流域植被覆盖率大幅度提高，其中在大通县城两侧的丘陵山区，植被覆盖率由 7.2%上升至 75%以上[17-18]。但由于受遥感数据源的限制，缺乏大规模植被恢复工程以前流域内的植被覆盖状况的具体数据，因此大规模植被恢复前后的植被覆盖情况不能进行直观对比。

根据北川河流域 2000 年和 2019 年两个时期的植被覆盖变化，可以得出北川河流域植被覆盖的空间分布和变化趋势特征。在 20 世纪 80 年代末开始实施的高强度退耕还林还草工程影响下，2000 年以来，北川河流域植被覆盖条件总体较好，流域植被覆盖度以大于 80%的区域为主(表 1)。高植被覆盖区主要分布在海拔 2 600～3 500 m 左右的中低山地区，这一区域几乎不受人为开发的影响，具备有利于植被生长的良好自然条件。植被覆盖小于 50%的区域主要位于干流河谷区及海拔大于 4 000 m 的高山地区，河谷区城市建设及工业活动等对地表覆被的改变较大，高山地区冰雪覆盖周期较长，在冻融侵蚀作用下大部分基岩风化严重，形成典型的高寒石漠化景观。

表 1 2000－2019 年北川河流域植被覆盖变化统计

植被覆盖度范围/%	2000 年		2019 年	
	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%
＜50	51.49	1.53	75.93	2.25
50～60	126.23	3.74	120.88	3.59
60～70	279.86	8.30	222.50	6.60
70～80	991.26	29.41	659.51	19.56
80～100	1 922.15	57.02	2 292.60	68.01
平 均	75.32		80.33	

2000—2019 年，流域大部分区域植被覆盖度增加，其中，覆盖度大于 80%的区域面积增加最大(表 1)。在 ArcGIS 软件中对 2000 年和 2019 年两个时期的植被覆盖度进行差值计算并对植被覆盖变化

图(图 1)进行统计计算,结果显示植被恢复(变化量>0)和退化(变化量<0)的区域分别占流域总面积的 88%,12%。植被退化区主要分布在受人为开发影响最大的干流及部分支流河谷区,尤其是 2000 年以后,随着青海省经济的快速发展,河谷区的开发强度进一步增大,引起植被覆盖退化,最大降幅为 64.7%,平均降幅为 11.56%;在河谷区两侧的大面积中高山和低山丘陵地区,植被覆盖主要呈增加趋势,最大增幅为 52.2%,平均增幅为 14.98%,其中,植被恢复强度最大的区域主要分布在大通县城以南河谷两岸的低山丘陵区,这一区域属"西宁南北山绿化工程"的覆盖范围,植被恢复最为明显。

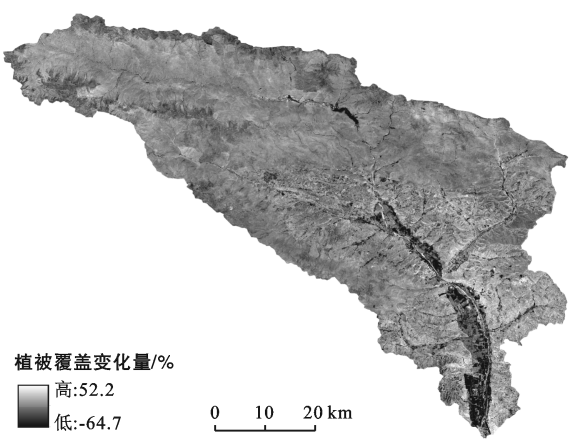


图 1　2000－2019 年北川河流域植被覆盖度变化量

1956—2019 年,桥头站以上流域多年平均降水量 572.47 mm,最大值为 1961 年 769.9 mm,最小为 1991 年 413.1 mm,极值比为 1.86,降水量总体变化稳定;桥头站多年平均径流量 6.27×10^8 m^3,平均径流系数 0.39,最大径流量为 1989 年的 1.08×10^9 m^3,最小为 1991 年的 3.63×10^8 m^3,极值比为 2.97,年径流量总体呈下降趋势,平均下降幅度为 1.60×10^7 m^3/10 a(图 2)。

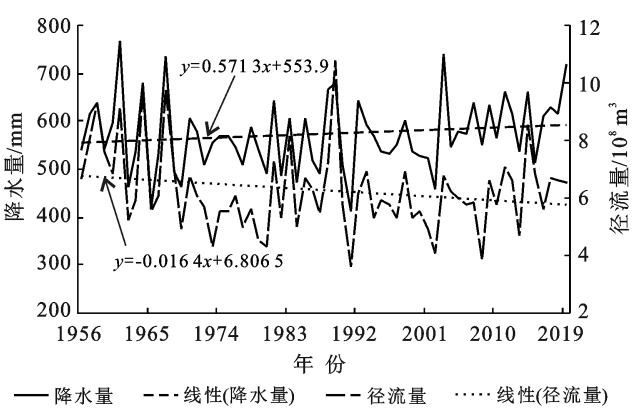


图 2　1956－2019 年降水量和径流量变化曲线

从 1956—2019 年降水量及天然径流量累积距平变化曲线上可以看出,流域内降水量和径流量总体呈现"丰—枯—丰—枯—丰"的波动变化特征,其中,20 世纪 60 年代初期、80 年代末期及 2015 年左右为 3 个峰值期,20 世纪 80 年代初和 2000 年左右为两个低值期(图 3)。

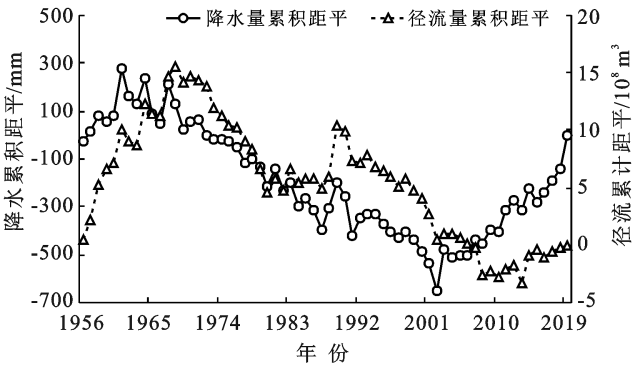


图 3　1956－2019 年北川河流域降水及天然径流累积距平变化过程

根据 1956—2019 年基流分割结果计算,北川河桥头以上流域多年平均基流量 2.17×10^8 m^3,多年平均基流系数 0.15。从基流量和地表产流量的变化曲线可以看出(图 4),基流量的波动变化幅度小于地表产流量,两者的变差系数分别为 0.19,0.34。从长序列变化规律上来看,地表产流量和基流量均呈下降趋势,其中,地表产流量和基流量的平均下降速率分别为 1.38×10^7 m^3/10 a 和 2.70×10^6 m^3/10 a。

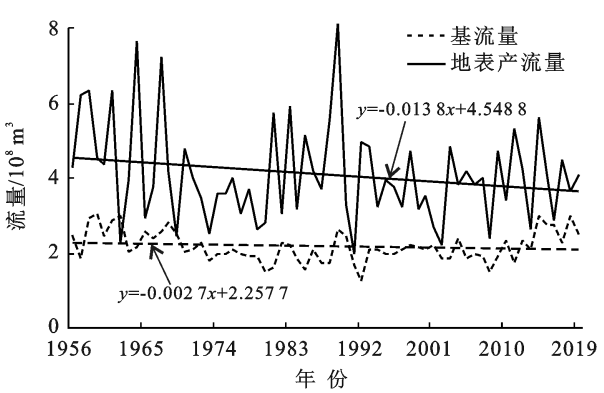


图 4　1956－2019 年北川河流域基流量和地表产流量变化特征

结合闭合流域水平衡模型,根据公式(1)计算流域生态用水量。从生态用水量变化曲线上可以看出(图 5),1956 年以来流域生态用水量呈波动上升趋势,平均上升趋势为 2.80×10^7 m^3/10 a,多年平均生态用水量为 9.60×10^8 m^3,占多年平均降水量的 60.3%,最大生态用水量出现在 2003 年,为 1.38×10^9 m^3,最

小生态用水量出现在 1991 年，为 7.80×10^8 m^3，生态用水是流域中最大的水资源消耗项。

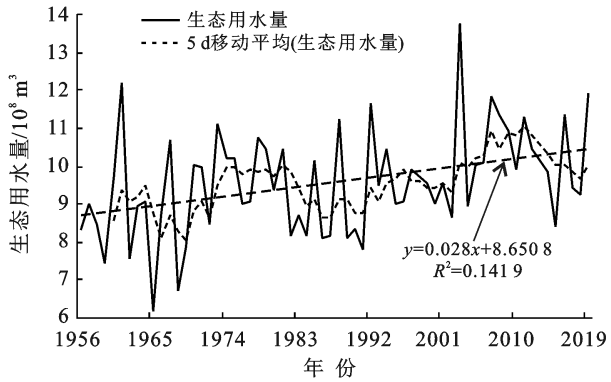


图 5 1956－2019 年北川河流域生态耗水量变化特征

3.2 植被恢复对流域水循环变化的影响

根据流域植被覆盖变化情况，分别选择 1956—1970 年和 2000—2019 年作为植被恢复前后的两个典型时期进行对比分析，研究植被恢复对流域水循环变化的影响。

在不同年代降水量—生态用水量关系散点图上(图 6a)，1956—1970 年的趋势线位于 2000—2019 年的下方，这说明在相同的降水量条件下，2000—2019 年的平均生态用水量高于 1956—1970 年，即随着流域植被恢复，生态用水量具有明显的增加趋势。根据两个时期降水量—生态用水量的趋势关系计算得到，在多年平均降水量(572.47 mm)条件下，2000—2019 年流域年均生态用水量比 1956—1970 年增加了 1.33×10^8 m^3(39.93 mm)，增加比率为 15.3%。

在不同年代降水量—地表产流量和降水量—基流量关系散点图(图 6b，6c)上可以看出，1956—1970 年的趋势线位于 2000—2019 年的上方位，这说明随着流域植被恢复，在相同的降水量条件下，地表产流量和基流量具有明显的降低趋势，根据两个时期降水量与地表产流量和基流量之间的函数关系可以计算得到，在多年平均降水量条件下，2000—2019 年地表产流量比 1956—1970 年降低了 9.80×10^7 m^3(35.25 mm)，降低比率为 24.3%，基流量降低了 7.60×10^7 m^3(27.33 mm)，降低比率为 25.6%。多年平均降水量条件下植被恢复前后主要水循环要素变化统计结果见表 2。

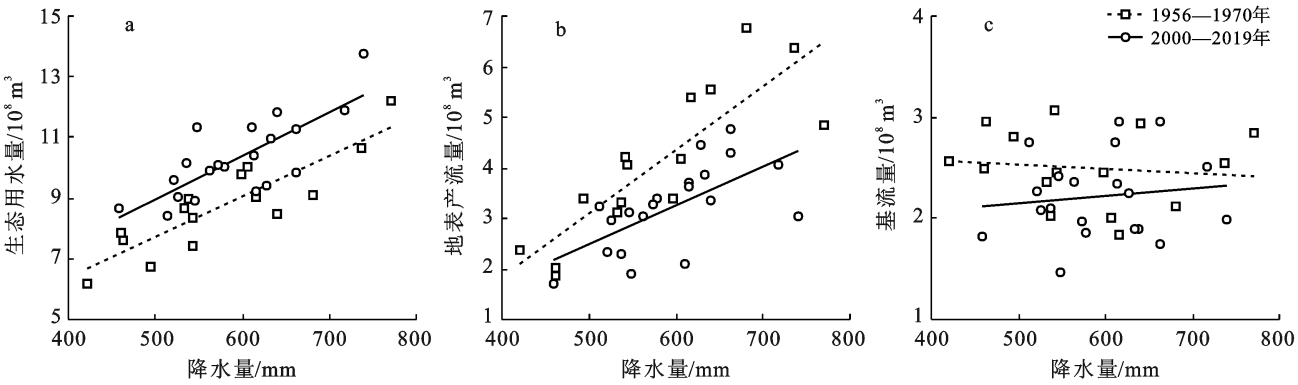


图 6 1956－2019 年北川河流域植被恢复前后生态用水量、地表产流量、基流量变化关系

表 2 多年平均降水条件下植被恢复前后水循环要素变化统计

项 目	生态用水量/10^8 m^3	地表产流量/10^8 m^3	基流量/10^8 m^3
1956—1970 年	8.68	4.02	2.96
2000—2019 年	9.99	3.04	2.21
变化量	1.33	－0.98	－0.76
变化率	15.3%	－24.3%	－25.6%

从 1956—1970 年和 2000—2019 年两个时期降水量—生态用水量、降水量—地表产流量的变化趋势上来看，当流域处于枯水年时，两个时期的趋势线近于相交，而当丰水年时，趋势线的间距越来越大，这一变化趋势说明，流域植被恢复后，对枯水年生态用水量和地表径流量的影响不大，但在丰水期，这种影响变得十分明显。也就是说，植被恢复对流域水循环的影响作用并不是恒定不变的，而是随着降水量的增加而增加，这一变化特征充分体现了植被恢复对流域水循环调节作用。

植被恢复引起流域水循环的影响不仅体现在单个水循环要素的变化上，而且也体现在流域水资源的时空变化及流域气候变化上。根据公式(3)—(4)分别计算 1956—2019 年流域降水分配系数(K_Q)和径流分配系数(K_R)。通过对比 1956—1970 年与 2000—2019 年两个阶段降水分配系数的变化可知，在相同降水量条件下，2000—2019 年的年均降水分配系数是 1956—1970 年的 1.42 倍(图 7a)，说明植被恢复后，产流条件发生了变化，更多的大气降水供给流域内部的生态用水，而向下游的径流减少。

通过对比 1956—1970 年与 2000—2019 年两个阶段径流分配系数的变化可知,径流分配系数随降水量的增加而减小,这与大部分流域的产流规律是一致的,但在相同降水量条件下,2000—2019 年的径流分配系数略微高于 1956—1970 年(图 7b),这说明在植被恢复后,径流中基流所占的比例有所增加,而地表产流所占的比例有所降低,且这种变化随降水量的增加而更加明显。总体来看,植被恢复前后径流分配系数的变化并不明显,降水是引起径流分配变化的敏感因素,而植被恢复的影响则相对微弱。

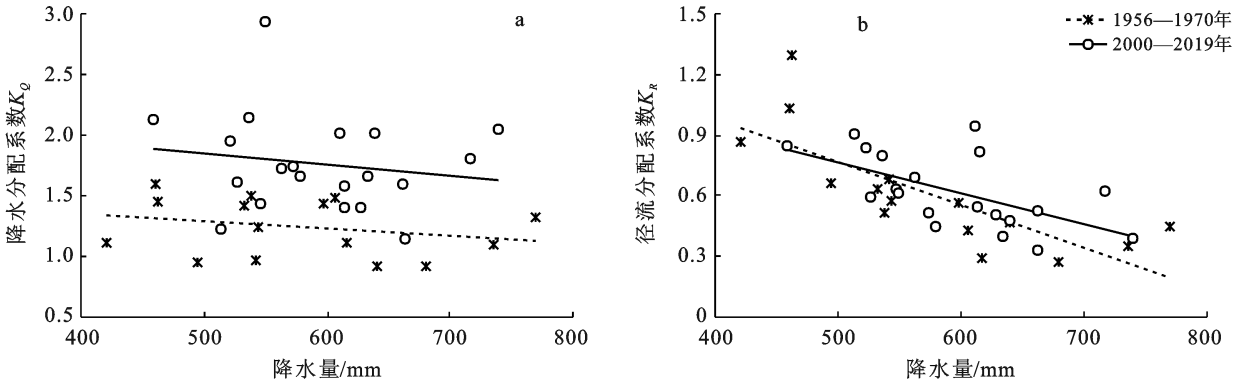


图 7　1956－2019 年北川河流域植被恢复前后降水分配系数和径流分配系数的变化关系

1970—2019 年流域年水面蒸发量即年蒸散发能力(E_0)呈波动降低趋势,干旱指数与蒸散发能力之间存在相同的变化趋势,统计结果显示,2000—2019 年干旱指数均值(1.58)比 20 世纪 70 年代(1.91)降低了 21.4%(图 8a),这说明,受植被恢复的影响,流域的干旱程度有所降低。风速是影响水面蒸发的一个重要因素,1961—2019 年最大风速和平均风速均呈下降趋势(图 8b),尤其是 2000 年以前的下降速率最为明显,相关研究表明,地表覆盖对近地面风速具有显著的减弱作用[18-19],因此,植被覆盖恢复引起经地面风速降低可能是造成流域潜在蒸散发能力降低的因素之一。由此可见,流域植被恢复与气候要素之间存在着良性的互馈机制,大规模植被恢复可以通过改善流域半干旱的气候条件进而对流域水循环产生影响。

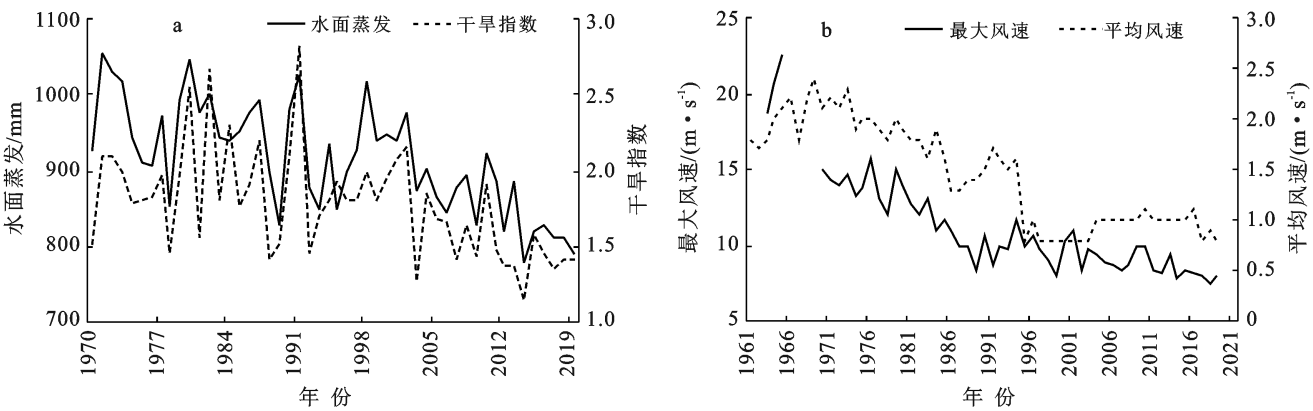


图 8　1956－2019 年北川河流域干旱指数和地表风速的变化趋势

4　讨论与结论

4.1　讨 论

从前文的分析可知,植被恢复后流域生态用水量呈增加趋势,但水面蒸发反映出的流域蒸散发能力却呈下降趋势。在公式(1)所示的流域水循环模型中,生态用水量 S 存在两种消耗形式,一是以陆面蒸散发的形式进入大气,二是以土壤、植被蓄水的形式存储在流域内。因此,植被恢复影响下蒸散发能力的降低也就意味着流域土壤、植被蓄水能力的增加[20]。从这个角度上来看,北川河流域的生态用水并未全部消耗于蒸散发,其中一部分以土壤、植被蓄水的形式存储于流域内,这充分体现了黄河上游流域植被恢复的水源涵养价值。

植被蒸腾和土壤蒸发是构成半干旱地区陆面蒸散发的两个主要要素[21]。植被恢复一方面带来植被蒸腾耗水的增加,另一方面大规模植被带来的遮阳、阻风作用可以在很大程度上降低林下土壤水分蒸发

量。彭焕华等[11]在相邻的祁连山黑河上游地区的监测研究表明,青海云杉林内土壤蒸发量仅是林外土壤蒸发量的 45.5%。因此,在考虑植被恢复对蒸散发量的影响时,不仅需要考虑植被生长的蒸腾量的变化,还需要充分考虑植被覆盖带来土壤水分蒸发量的变化。北川河流域植被恢复在一定程度上降低表层土壤水分蒸发量可能是引起流域蒸散发能力随植被覆盖增加而降低的一个重要作用因素。

4.2 结 论

20 世纪 80 年代以来,北川河流域经历了大规模的植被恢复。2000—2019 年期间平均植被覆盖率增加了 5.01%,其中,干流河谷两侧广大的低山丘陵及中高山地区是植被恢复程度最大的地区,最大增幅为 52.2%,平均增幅为 14.98%。大规模植被恢复在改变流域下垫面性质的同时,引起流域水循环条件发生了变化。

(1) 从流域降水量、径流量、生态用水量的变化趋势可以看出,在降水量条件未发生明显变化的情况下,受大规模植被恢复的影响,流域水循环条件发生变化,直接表现为生态用水量增加和径流量衰减。

(2) 植被恢复影响对大气降水在流域内外的时空分配。在空间分配上,植被恢复使更多的大气降水用于流域内部的生态所需,在一定程度上减小了对下游的水源供给量;在时间分配上,径流中基流的占比有所增加,延长了降水向流域外的排泄周期,即流域内更多降水参与长周期的降水—土壤水—地下水循环过程,更多水资源从线状水域系统向面状陆域系统转移。

(3) 植被恢复与流域气候要素变化之间具有良性的互馈作用。大规模植被恢复后,流域地表风速、水面蒸发量、干旱指数及土壤蒸发量显著降低,最终引起流域的蒸散发能力的降低和土壤蓄水量的增加,这些要素的变化对提高流域水源涵养能力和改善流域半干旱的气候条件具有重要作用。

[参 考 文 献]

[1] Chen Chi, Park T, Wang Xuhui, et al. China and India lead in greening of the world through land-use management [J]. Nature Sustainability, 2019,2(2):122-129.

[2] 胡春宏,张晓明,赵阳.黄河泥沙百年演变特征与近期波动变化成因解析[J].水科学进展,2020,31(5):725-733.

[3] 郭帅,裴艳茜,胡胜,等.黄河流域植被指数对气候变化的响应及其与水沙变化的关系[J].水土保持通报,2020,40(3):1-7.

[4] Zastrow M. China's tree-planting drive could falter in a warming world [J]. Nature, 2019,573(7775):474-475.

[5] 吴佳梅,彭秋志,黄义忠,等.中国植被覆盖变化研究遥感数据源及研究区域时空热度分析[J].地球科学进展,2020,35(9):978-989.

[6] 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(1):177-186.

[7] Huang Tianming, Pang Zhonghe, Yang Shuo, et al. Impact of afforestation on atmospheric recharge to groundwater in a semiarid area [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,2020,125(9):e2019JD032185.

[8] Mattos T S, de Oliveira P T S, Lucas M C, et al. Groundwater recharge decrease replacing pasture by eucalyptus plantation [J]. Water, 2019,11(6):1213.

[9] Yan Weiming, Deng Lei, Zhong Y, et al. The characters of dry soil layer on the loess plateau in China and their influencing factors [J]. PLoS One, 2015,10(8):e0134902.

[10] Yu Haiyan, Zha Tonggang, Zhang Xiaoxia, et al. Vertical distribution and influencing factors of soil organic carbon in the Loess Plateau, China [J]. Science of the Total Environment, 2019,693:133632.

[11] 彭焕华,赵传燕,梁继.黑河上游高寒草地蒸散发日变化及其影响因子分析[J].水资源与水工程学报,2016,27(1):46-53.

[12] 庞忠和,黄天明,杨硕,等.包气带在干旱半干旱地区地下水补给研究中的应用[J].工程地质学报,2018,26(1):51-61.

[13] 刘卉芳,朱清科,魏天兴.晋西黄土区森林植被对流域径流的影响[J].水土保持学报,2004,18(2):5-9.

[14] Gismu G. Evaluating the effect of climate change and land use/cover change on catchment hydrology of Gumara watershed, Upper Blue Nile basin, Ethiopia [J]. Open Water Journal, 2016,3(1):1-14.

[15] 张维梅.大通县退耕还林工程成效及存在问题[J].青海农林科技,2009(4):87-88.

[16] 高健健,穆兴民,孙文义.1981—2012 年黄土高原植被覆盖度时空变化特征[J].中国水土保持,2016(7):52-56.

[17] 赵娟,穆兴民,高鹏,等.基于 VAR 模型分析径流对降水和水土保持措施的响应[J].泥沙研究,2017,42(4):37-44.

[18] 郑佳丽.大通县退耕还林植被组成、结构与水保功能研究[D].北京:北京林业大学,2006.

[19] 易永力,李艳君.植被覆盖率变化对气象要素的影响研究[J].林业调查规划,2020,45(1):37-40.

[20] 李玲芬,延军平,刘冬梅,等.干旱—半干旱地区不同植被条件下土壤含水量变化及植被建设途径分析[J].水土保持通报,2009,29(1):18-22.

[21] 周志鹏,孙文义,穆兴民,等.2001—2017 年黄土高原实际蒸散发的时空格局[J].人民黄河,2019,41(6):76-80.