文章编号: 1672 - 3317 (2020) 04 - 0096 - 10

根河流域 1980-2017 年气候和径流的变化特征分析

岳永杰,乌云珠拉,李 旭,王雅倩,伊丽茜 (内蒙古农业大学,呼和浩特 010010)

摘 要:根河流域处于我国寒温带地区,气候和自然环境较为特殊,分布着大面积冻土,对于气候变化非常敏感。 【目的】通过分析根河流域气象要素和径流的变化,探讨气候和水文之间的相互关系,为该流域的水资源科学管理 提供理论依据。【方法】以额尔古纳水系根河流域为研究对象,利用 M-K 检验和 Hurst 指数等方法,分析根河流域 1980—2017 年气象要素和径流的变化趋势及相互作用关系。【结果】①根河流域年平均气温在 1980—2017 年,共 上升了 1.10 °C,在 a=0.01 的水平上呈上升趋势,且上升趋势有较强的持续性(H=0.75)。其中,生长季的气温变化 最为强烈(Z=4.63)。②根河流域生长季降水量占年降水量的 85%,趋于下降趋势,下降幅度为 1.68 mm/a。③根河 流域始冻期和完全冻结期的空气相对湿度分别 a=0.001 和 a=0.01 的水平上显著下降,且下降趋势有很强的持续性 (H=1.0),变化幅度为 0.05 %/a。④根河流域径流量趋于下降趋势,在 1997 年和 1999 年发生突变,与年降水量发 生突变的时间基本吻合,且降雨与径流的变化趋势一致,相关性分析表明,降雨与径流的相关系数为 0.91。⑤根河 流域径流量与年均气温相关系数为 0.50,气温主要以增加流域各因子的蒸散发以及土壤和河流冻结、融化的时间或 面积来影响流域径流量。【结论】根河流域降水量和径流在 1980—2017 年没有很大的变化趋势,气温呈猛烈的上升 趋势,流域气候整体上趋于夏季越来越干冷,冬季干热的趋势。

关键词:流域; M-K检验; 气候变化; 趋势分析

中图分类号: P42

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2019255

岳永杰, 乌云珠拉, 李旭, 等. 根河流域 1980—2017 年气候和径流的变化特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(4): 96-105.

YUE Yongjie, WU Yunzhula, LI Xu, et al. Analysis of Climate and Runoff Variation Characteristics in the Genhe River Basin from 1980—2017 [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(4): 96-105.

0 引 言

【研究意义】水资源是国家的基础自然资源,可 以维持生态平衡,又是衡量国家综合国力的重要因素 ^[1-4]。而河川径流是水文循环和水资源系统的重要组 成部分^[5-6]。气候变化对人类生活和经济带来很大的 影响,如冰川消融、植被变化、海洋酸化、林线后移 ^[7]等。IPCC报告^[8]指出,1880-2012年,全球平均气 温升高了0.85℃,据2018年IPCC发布的《全球升 温 1.5℃特别报告》^[9-10]可知,将全球变暖限制在 1.5℃,需对土地、能源、建筑、工业、城市和交通 都进行一个快速而彻底的转型。胡婷等^[11]预测全球气 温增高1.5℃和2℃时气温的变化及降水量的变化, 研究表明,全球气温和降水基本呈现出高纬温度增幅 大于低纬、陆地增温大于海洋、湿润的地方降水增加 多、干旱的地方降水减少等未来气候变暖的普遍特 征。人类活动和气候变化均对流域径流有影响,但是 相比而言,气候变化对于径流的影响大于人类活动。 Hatta 等^[12]对印度的降水和径流进行了研究,结果得 出,随着降水的下降,径流量也成比例下降。在气象 因子中,降水和气温可以直接或间接的影响流域径流 量^[13],但起主导作用的气象因子因流域地理环境及其 气候而异。

大兴安岭是我国重要的生态屏障,是我国寒温带 明亮针叶林区,泥炭地丰富、具有森林沼泽、且有大 面积的冻土分布,其中有多年冻土,季节冻土等^[14], 是气候敏感区。具有冬季漫长,常年无夏,春秋相连 的季节特点。研究大兴安岭地区的气象因子及水文特 征是深入了解此地区气候变化趋势及其水文响应的 必要措施。【研究进展】近年来对大兴安岭地区的气 候变化及径流的研究也有较多,主要集中在气候变 化、林火^[15]、植被覆盖^[15]、多年冻土^[17]、物候的影 响^[18]等方面。大兴安岭地区气候趋于变暖趋势,导致 林火频度增多、植被覆盖发生变化、多年冻土退化等 现象。目前对于大兴安岭地区径流变化的研究较多。

收稿日期: 2019-09-16

基金项目:国家自然科学基金项目(31660233)

作者简介: 岳永杰(1976-), 男。副教授,硕士生导师,主要方向为森 林生态、水文。E-mail: wolongyue@126.com

王文华等^[19]研究大兴安岭黑土区森林对径流的影响; 赵秀娟^[20]分析大兴安岭水系水文特征;罗韦慧等^[21] 研究不同森林类型对小流域径流的影响;陈百灵^[22] 研究不同抚育强度对地表径流的影响;朱宾宾等^[23] 研究积雪与融雪对径流化学特征的影响等。【研究创 新点】前研究内容大多以不同的土地利用方式或植被 覆盖率对径流的影响为主,而对于气象因子变化趋势 对径流影响的研究较少。【拟解决的关键问题】在全 球变暖的大背景下,研究根河流域气相因子和径流的 变化情况,揭示流域的气候、径流变化规律及其相互 作用机制,可对流域内冻土变化、植被变化、蒸散发 等研究提供一定依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

根河流域属于黑龙江流域额尔古纳水系,发源 于大兴安岭伊吉奇山西南部的萨吉气林场。根河自 东北向西南流经根河市、额尔古纳市和陈巴尔虎旗 最后汇入额尔古纳河。全长415 km,河宽一般在20 m 左右,河深平均0.8 m。根河流域总面积15837 km²,主要支流有图里河、依根河、库里河、伊图里 河等。地处寒温带大陆性季风气候区,冬季寒冷干 燥,夏季温暖湿润。根河年平均气温-4.9℃,年平 均降水量411.75 mm;无霜期80~90 d,年平均风速 2.1 m/s。流域内土壤主要为棕色针叶森林土,还有 暗棕色森林土、灰色森林土、淋溶黑钙土、沼泽土 等;流域上游为草原区,中下游为草原区。植被以 森林为主,主要以兴安落叶松林为主的北方针叶林 为主,林下植被有苔藓、草本、灌木等,植物种类 繁多,植被覆盖度达80%以上。

1.2 研究方法

本研究的气象数据为根河流域内额尔古纳、根 河、图里河等 3 个国家一级气象站点 1980—2017 年 的降水量、平均气温、空气相对湿度等观测数据; 此 3 站分别位于流域上、中、下游。水文数据由根 河流域下游拉布达林水文站提供。对气象因子和水 文特征做研究时,因研究区的特殊性,将每个气象 因子和水文因子分为生长季(a)指 5—9 月、始冻 期(b)指 10—11 月、完全冻结期(c)指 12—翌年 2 月、融冻期(d)指翌年 3—4 月和年均量(e) 5 个方面来进行统计分析。流域气象站点和水文站的 分布如图 1 所示。

在研究根河流域 1980-2017 年气象因子及径流的变化趋势时选用 Mann-Kendall (M-K) 非参数检验 方法,用 Sen's Estimator (S-E) 检验因子的变化幅度 检验方法,运用 Hurst 指数对根河流域气象因子及径 流的未来变化趋势进行预测,再运用 Sequential Version Mann-Kendall (S-M-K)方法对流域气象因子 和径流进行突变点检验,最后再运用 peason 相关性 分析对气象和水文因子进行相互作用机制分析。



Fig.1 Spatial distribution of hydrological stations and meteorological stations in the Genhe river basin

1.2.1 Mann-Kendall (M-K) 非参数趋势检验

假定 *x*₁,*x*₂,...*x*_n为时间序列变量, *n*为时间序列长度, **M**-K 定义了统计量 *S*,利用式(1)计算 **M**-K 检验的统计量 *S*。

$$S = \sum_{i=2}^{n} \sum_{j=1}^{i-1} sign(x_i - x_j) , \qquad (1)$$

式中: *S* 是符号函数, 当(*x_i-x_j*)小于、等于或大于 0时,符号 *S* 等于-1,0和 1。*S* 服从正态分布,均 值为 0。

$$\operatorname{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n-5)}{18}, \qquad (2)$$

式中: n 为数据点个数。

统计检验值 Z 计算式为:

$$\begin{cases} Z = \frac{(S-1)}{\sqrt{\operatorname{var}(s)}}, S > 0\\ Z = 0, S = 0\\ Z = \frac{(S+1)}{\sqrt{\operatorname{var}(S)}}, S < 0 \end{cases}$$
(3)

式中: Z为正值表示有上升趋势,为负值表示有下降 趋势。若计算的绝对Z统计量大于正态分布表中Z统 计量(1.28、1.64、2.32)的临界值,则表示趋势通 过了90%、95%和99%的显著性水平检验。

1.2.2 Sen's Estimator (S-E) 检验

为了估计现有趋势的真实斜率,用 Q 来表达(作 为每年的变化),使用了 Sen 的非参数方法。Sen 方 法可用于假定趋势为线性的情况^[24],估计 N 对数据 幅度 Q_i 计算式为:

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k}, \qquad (4)$$

式中: *x_j*和 *x_k*分别表示在某一时段 *j* 和 *k* 的值(*j*>*k*)。 *S-E* 幅度变化 *Q_i*的 *N* 值的驱动值等于其中位数。估计 *N* 是奇数,则 *S-E* 的幅度计算式为:

$$Q_{\rm med} = \frac{Q_{(N+1)}}{2} \,. \tag{5}$$

 Q_{med} 是置信区间下非参数双尾检验(Timo Salmi 等, 2002)。如果 N 是偶数,则 S-E 的幅度计算式为:

$$Q_{\text{med}} = \frac{\left[\frac{Q_N}{2} + \frac{Q_{(N+2)}}{2}\right]}{2}$$
 (6)

1.2.3 S-M-K 检验

Sequential Version Mann-Kendall(S-M-K)检验 是一种非参数统计检验方法,用于分析数据序列在时 间上的变化趋势和识别突变点^[26]。

在时间序列随机独立的假定下,定义统计量。

$$UF_{k} = \frac{\left[S_{k} - E(S_{k})\right]}{\sqrt{\operatorname{var}(S_{k})}} (k = 1, 2, ..., n), \qquad (7)$$

式中: $UF_k=0$, $E(S_k)$, var (S_k) 是累计数 S_k 的均 差和方差, 在 $x_1, x_2, ..., x_n$ 相互独立, 且有相同连续分 布时, 计算式为:

$$E(S_k) = \frac{n(n-1)}{4}, \qquad (8)$$

$$\operatorname{var}(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72}$$
 (9)

 UF_i 为标准正态分布,是按照时间序列 x 计算出的统计量序列,在统计检验过程中,给定显著水平 a, 假定 a=0.05,查正态分布表,若 $|UF_i|>U_a$,则表示序 列存在明显的趋势变化。按照时间序列 x 逆序,再重 复上述过程,同时使 $UB_k=-UF_k$ (k=n,n-1,...,-1), $UB_1=0$ 。分别绘制 UB_k 和 UF_k 曲线图,若 $UF_k>0$,表 明序列呈上升趋势, $UF_k<0$ 表明呈下降趋势。当其超 过显著性临界值时,表明上升或下降的趋势明显。若 2 条曲线在显著性临界值之间出现交叉点,则突变点 即为交叉点所对应的时间点。

1.2.4 Hurst 指数

通过分析估算的 Hurst 指数^[26],可判断极端降水 指标的时间序列趋势的持续性^[27]。Hurst 指数用 *H* 表 示,指数变化范围在 0~1 之间,值 0.5 表示缺乏长期 持久性,值大于 0.5 意味着系列的长期持续性,反之则表示反持续性的存在。为定量描述持续性及反持续性的强度,根据 Hurst 指数的大小进行分级。

2 结果与分析

2.1 根河流域气候和因子突变分析

2.1.1 根河流域气候特征分析

根河流域不同气象要素的变化趋势、变化斜率、 和未来的变化趋势见表 1,图 2 为根河流域气温不同 时期突变点分析图。结合表 1 和图 2 可知,各时期气 温均为上升趋势(Z>0),其中生长季的气温上升趋 势最明显(Z=4.63),上升幅度为 0.05 ℃/a。生长季 气温自 1996 年开始变化更为强烈。始冻期发生强烈 变化的年份与生长季一致,但完全冻结期发生强烈变 化的年份在 1990 年。年平均气温的变化趋势也较为 明显(Z=2.72),但变化幅度为 0.03 ℃/a,小于生长 季变化幅度,概括而言,自 1980—2017 年,年平均 气温上升了 1.10 ℃,且气温上升有强的持续性 (*H*=0.75)。年均气温发生强烈变化的年份(1990 年)与完全冻结期发生强烈变化的年份一致,在根河 流域完全冻结期的气温对于年平均气温的影响较大, 表明年平均气温变化趋势有强的持续性。

由表1和图3可知,生长季总降水量、始冻期总 降水量呈下降趋势,其中生长季总降水量的下降幅度 最大,为1.68 mm/a,完全冻结期和融冻期降水量有 上升的趋势,这可能是由于融冻期气温上升,流域蒸 散发量上升,间接导致降水量增加。流域年均总降水 量下降幅度为1.37 mm/a,变化幅度小于生长季降水 量,主要原因为在完全冻结期和融冻期降水量有微弱 的上升趋势。

空气相对湿度的变化主要受降水量、温度和植被的覆盖度等因素的影响。结合表 1 和图 4 可知,生长季气温上升和降水量下降的情况下,空气相对湿度上升,这主要是因为生长季的气温高,使得土壤水分蒸发和植物蒸腾作用强烈,导致空气相对湿度增加的现象。完全冻结期、始冻期和年空气相对湿度分别在 a=0.001、a=0.01 和 a=0.05 的水平上显著下降,下降幅度最大的为完全冻结期,为 0.21 %/a,且下降趋势有很强的持续性(H=1.0)。年均日空气相对湿度下降趋势为 0.05 %/a。温度对于空气相对湿度有滞后作用,在生长季和始冻期的气温通过蒸散作用来影响完全冻结期的空气相对湿度,完全冻结期蒸散作用几乎停止,因此,完全冻结期的降水量是影响融冻期空气湿度的关键因子。

Table 1 Analysis table of air temperature, precipitation and air relative humidity in different periods in the Genhe river basin										
气候因子 指标		生长季	始冻期 Frozen	完全冻结期	融冻期	年平均				
Climatic factor	Index	growing season	in the beginning stage	Complete freezing period	Freezing period	Annual mean				
	Ζ	4.63***	0.6	0.46	1.4	2.72**				
气温/C Air temperature	Q	0.05	0.01	0.01	0.04	0.03				
*	Н	0.92	0.72	0.71	0.61	0.75				
	Ζ	-1.33	-0.13	0.98	1.16	-1.08				
降水重/mm Precipitation	Q	-1.68	-0.02	0.09	0.25	-1.37				
	Н	0.76	0.71	0.59	0.68	0.71				
	Ζ	1.18	-3.14**	-4.15***	-0.51	-2.41*				
空气相对湿度/% Air relative humidity	Q	0.05	-0.08	-0.21	-0.02	-0.05				
	Н	0.66	0.78	1	0.61	0.9				

注 ***代表在 a=0.001 的水平上显著; **代表在 0.01 的水平上显著; *表示在 0.05 的水平上显著。下同。

Note *** represents significant at the alpha a=0.001 level;** represents significant at the level of 0.01;* means significant at the level of 0.05, the same as below.

2.1.2 根河流域气候因子突变分析

由图 2 可看出,根河流域平均气温的突变分析 中,1980-2017年生长季日均气温没有突变点,从 1989年开始持续上升,在1994年 UF_k曲线在超过临 界值 1.96, 代表从 1994 年开始, 气温发生猛烈的上 升,且一直处于上升趋势。融冻期的日均气温没有发 生突变,且 UF_k值和 UB_k值均在临界值(-1.96~1.96, 图中虚线)之内,代表融冻期的年气温在1980-2017 年期间较稳定,没有大的波动。年均气温在 38 a 间没 有发生突变,且变化趋势与生长季日气温的变化趋势 相近,但年平均气温 UF_k 值超过临界值 1.96 的时间 是1989年。



⁽b) 始冻期 (b) Frozen in the beginning stage



图 3 为根河流域 1980-2017 年,降水量突变点 分析图。由图 3 可看出,1980-2017 年生长季降水 量没有发生突变,但有下降趋势,且降水量的下降趋 势较为平缓。始冻期的降水量在 1990 年和 2007 年发 生突变,第 1 次发生突变之后降水量开始上升,在 1999 年达到最高。完全冻结期、融冻期降水量没有 发生突变,没有明显增减趋势,且 UF_k值和 UB_k值均 在临界值之内,表明完全冻结期和融冻期降水量在此 期间较稳定。年降水量在 1998 年和 1999 年发生突变, 但 1980-2017 年的整体变化较为平缓。





图 4 为根河流域 1980-2017 年空气相对湿度突 变点分析图。由图 4 可看出,流域生长季空气相对湿 度在 1983 年发生突变,且 1985 年开始一直处于上升 趋势,上升速度,2012 年开始,始冻期的空气相对 湿度发生猛烈的下降,完全冻结期空气相对湿度在 1989 年开始猛烈下降,融冻期空气相对湿度在 1995 年和 2000 年发生突变,但变化平缓。年均空气相对 湿度在 1993 年和 2003 年发生突变,变化大致趋势与 始冻期的整体变化趋势一致。





- humidity in the Genghe river basin
- 2.2 根河流域水文特征和因子突变分析
- 2.2.1 根河流域水文特征分析

根河流域日均径流量分析如表 2 所示。从表 2 可 看出,根河流域 1985-2016 年的生长季、始冻期、 完全冻结期、融冻期的日均径流量均呈下降趋势,但 均没通过显著性检验,不同时期的日均径流量的下降 幅度顺序为,生长季>始冻期>融冻期>完全冻结 期,生长季的径流量幅度为 7.06 万 m³/a,年均日径 流量呈下降趋势,下降幅度为 5.73 万 m³/a,Hurst 指 数为 0.75,表示流域日径流量下降趋势有强的持续性。

表 2 根河流域不同时期日均径流量

Table 2Average daily runoff in differentperiods in the Genhe river basin

	E	均径流量 A	Average daily	runoff /10 ⁵ 1	n ³
指标 Index	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
Ζ	-0.70	-1.35	-0.82	-0.82	-1.05
Q	-0.71	-0.62	-0.02	-0.08	-0.57
Н	0.69	0.77	0.94	0.67	0.75

2.2.2 根河流域水文突变分析

由图 5 可知, 生长季径流量在 1980-2017 年没 有发生突变, 且 UF_k值和 UB_k值大多都在临界值之内, 在 1980-2017 年, 生长季径流量的波动较为平缓。 始冻期、完全冻结期的径流量的变化趋势大致一致, 完全冻结期发生径流量最高值的年份晚于始冻期 2 a, 分别为 1994 年和 1996 年, 2 个时期发生径流量 最低值的年份一致, 为 2006 年, 完全冻结期的径流 量在 1991、1993、2006 年和 2008 年发生突变。融冻 期径流量在 1987 年和 2013 年发生突变, *UF_k* 值和 *UB_k* 值大多都在临界值之内, *UF_k* 值在 1999 年超出临 界值(1.96)。年均日径流量在 1980-2017 年没有 发生突变,整体呈下降趋势,从 1998 年开始年径流 量的下降速度明显变快。





2.3 根河流域径流与气象因子的相互作用机制分析

由表 3 可看出, 生长季径流量与始冻期气温、生 长季降水量和年均总降水量的相关性在 0.01 的水平 上显著相关, 相关系数分别为 0.47、0.85 和 0.87, 降 水量的影响对于生长季径流的影响较大, 这主要是由 于年降水量的80%以上的降水量均在生长季引起的。 始冻期的径流量与生长季的气温、相对湿度和降水在 α=0.05 的水平上显著相关,相关系数分别为-0.36、 -0.36 和-0.39, 相关系数最大的是生长季的降水量。 概括而言,由于气候的滞后现象生长季的气候状况对 始冻期的径流有很大的影响。完全冻结期的径流量与 始冻期的日均气温、完全冻结期的日均气温和生长季 的降水量有显著相关,其中,与始冻期气温的相关系 数最大,在 α=0.01 的水平上显著相关,相关系数为 0.55, 其次为生长季的降水量, 相关系数为 0.52, 融 冻期的径流量与生长季的气温和始冻期的降水量有 相关性,且与始冻期降水量在 $\alpha=0.01$ 的水平上显著 相关。年径流总量与始冻期气温和生长季降水量在 α =0.01 的水平上显著相关,相关系数最大的为生长季 降水量,相关系数为0.89。除了融冻期的径流量,其 他时期的径流量与年均总降水都呈显著相关。总结来 说,径流的变化与降水的变化相关性大。

表 3 相关性分析表 Table 3 correlation analysis table

Tuble 5								uon un	ury 515 (uore						
参数 Index -		日均气温 Average daily temperature/℃				日均空气湿度 Daily air humidity/%				总降水量 The total rainfall/mm						
		(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
径流量 Runoff /m ³	(a)	-0.13	0.47**	0.25	-0.10	0.07	0.05	-0.26	-0.07	-0.23	0.00	0.85**	-0.11	-0.04	-0.08	0.87**
	(b)	-0.36*	0.27	0.26	0.11	-0.02	-0.36*	0.27	0.34	0.20	-0.04	0.39*	0.24	-0.14	-0.15	0.39*
	(c)	-0.27	0.55**	0.39*	0.13	0.32	-0.04	0.07	0.22	0.22	0.10	0.52**	0.34	-0.06	-0.13	0.52**
	(d)	-0.40*	0.02	0.10	0.10	0.06	0.00	0.12	0.20	0.33	0.16	0.23	0.52^{**}	0.16	0.07	0.25
	(e)	-0.23	0.50**	0.25	-0.09	0.03	-0.06	-0.17	0.01	-0.16	-0.02	0.89**	-0.06	-0.10	-0.07	0.91**

3 讨 论

根河流域属于黑龙江流域额尔古纳水系,黑龙江 流域的水情和根河流域的水情相互有影响,流域降水 是影响流域径流的最直接的因子。2013 年,根河流 域的年降水量达 775 mm,是本研究年限中降水量最 大的年份。东北地区发生洪水的年份与根河流域降水 量发生突变的年份相吻合。代海燕等^[28]、向辽元等^[29], 研究结果显示大兴安岭地区年平均气温在持续上升, 在 1987 年发生突变,本研究的结果与此相符。张艳 平等^[30]认为黑龙江地区大兴安岭 1986 年和 1987 年相 对湿度处于低值,之后上升,本研究的结论与此一致。

在本研究中,气温变化呈上升趋势,在 1980— 2017 年共上升了 1.10 ℃,且在未来有较强的持续性, 与全球温度变化趋势一致。根河流域径流量与生长季 降水量相关性大,尤其生长季的降水对于径流的变化 有很大的贡献。生长季的气温与各时期的径流负相 关,根河流域上游是原始林区,植被覆盖度高,其蒸

散量也高。林分的蒸腾主要与辐射、空气温度、风速 有显著相关[31]。程宋杰等[32]对于河西走廊党河流域径 流变化因子研究中,得出结论蒸散量与径流量负相 关,因此,在本研究中推测根河流域生长季的温度上 升,导致蒸散发加大,径流发生减少的现象。生长季 和完全冻结期的径流量与始冻期的气温正相关,始冻 期为流域变冷,土壤、河流等开始冻结的时期。段亮 亮等^[33]对大兴安岭多年冻土的研究结果显示,近年来 因气温升高,大兴安岭冻土冻结过程推迟,多年冻土 退化等现象。多年冻土退化导致冻土层隔离水分的效 应降低,导致冬季径流量流增大。马月^[34]、黎云云等 [35]对气候变化和径流响应的研究中得出结果,径流量 随着温度的升高而减少,这结果与本研究不完全一 致。在本研究中,生长季空气温度与径流量是负相关, 但在非生长季初期(始冻期)空气温度与径流量是正 相关。综上可知,气候变化对径流的影响有滞后效应, 前一时期的气温影响下一时期的径流量,生长季降水 量对各时期径流量都有显著的影响。

4 结 论

 1)根河流域在1980—2017年气温呈上升趋势, 降水量和空气相对湿度呈下降趋势,气温和降水量, 生长季的变化最为强烈,且持续性最强。空气相对湿 度变化较强的是始冻期和完全冻结期,根河流域气候 变化趋于夏季湿热、冬季干冷的现象。

2)根河流域的年均日径流量在1980—2017年呈 下降趋势,此变化趋势与降水量的变化趋势一致,下 降幅度最大的为生长季的径流量,5.73万m³/a。

3)降水是影响根河流域径流的最大因素,但不同时期的降水量对径流的影响也不同。流域不同时期 气温对径流量的影响程度和增减趋势不同,主要通过 对水文的形式来影响流域径流量。

参考文献:

[1] 张修宇. 气候变化下水资源动态承载力计算方法及应用研究[D]. 郑州:郑州大学, 2015.

ZHANG Xiuyu. Study on computing methods and its application of dynamic carrying capacity of water resources under the climate change[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2015.

- [2] GARC Á-CUETO O R, SANTILLÁN-SOTO N, LÓPEZ-VELÁZQUEZ E, et al. Trends of climate change indices in some Mexican cities from 1980 to 2010[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2019, 137(1/2): 775-790.
- [3] 刘小东. 控制排水理论对农田水利灌溉的影响研究[J]. 地下水, 2019,41(5):70-71,142.

LIU Xiaodong. Study on the influence of controlled drainage theory on irrigation[J]. Ground Water, 2019, 41(05): 70-71, 142.

[4] 白雪儿,艾一丹,杨昊晟,等.不同初始土壤含水率和滴头流量下滴
 灌土壤湿润体特征及其有效性评价[J].灌溉排水学报,2019,38(8):
 73-78.

BAI Xue'er, AI Yidan, YANG Haosheng, et al. Effects of different initial water content and dripper discharge on wetted body characteristic of drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(8): 73-78.

- [5] 孙从建,杨伟,陈若霞,等.开都河流域农业灌溉区地下水化学时空 分布特征研究[J].灌溉排水学报,2019,38(7):84-93.
 SUN Congjian, YANG Wei, CHEN Ruoxia, et al. Spatiotemporal changes in hydro-chemistry of groundwater in irrigation district within the kaidu river basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(7): 84-93.
- [6] ZHAI P M, WANG Z W, ZOU X K. The extreme climate events change in China and the main river basin[J]. Clim Change China's Water Res, 2007, 15(8): 91-112.
- [7] KERR R A. Global warming is changing the world[J]. Science, 2007,

316(5822): 188-190.

- [8] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 95-123.
- [9] 姜克隽. IPCC 1.5 ℃特别报告发布,温室气体减排新时代的标志[J].
 气候变化研究进展, 2018, 14(6): 640-642.
 JIANG Kejun. IPCC special report on 1.5 ℃ warming: A starting of new era of global mitigation[J]. Climate Change Research, 2018, 14(6): 640-642.
- [10] IPCC. Special report on global warming of 1.5 °C[M]. UK: Cambridge University Press, 2018.

[11] 胡婷, 孙颖, 张学斌. 全球 1.5 和 2 ℃温升时的气温和降水变化预估
[J]. 科学通报, 2017, 62(26): 3 098-3 111.
HU Ting, SUN Ying, ZHANG Xuebin. Temperature and precipitation projection at 1.5 and 2 ℃ increase in global mean temperature[J].
Chinese Science Bulletin, 2017, 62(26): 3 098-3 111.

- [12] HATTA M P, YUNI S S. Changes in rainfall and discharge in Saddang Watershed, South Sulawesi, Indonesia[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 235: 012037.
- [13] 叶晶萍, 刘政, 欧阳磊, 等. 不同时间尺度小流域径流变化及其归因 分析[J]. 生态学报, 2019, 39(12): 4 478-4 487.
 YE Jingping, LIU Zheng, OUYANG Lei, et al. Runoff changes and their attributions in a small watershed during different time scales[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(12): 4 478-4 487.
- [14] 梁敏. 大兴安岭多年冻土区地温时空变化遥感研究[D]. 长春: 吉林 大学, 2016.

LIANG Min. Study of remote sensing about surface temperature spatiotemporal variability in Da hinggan mountains permafrost region, northeast China[D]. Changchun: Jilin University, 2016.

- [15] 李秀芬, 郭昭滨, 赵慧颖, 等. 大兴安岭气候干湿变化及对森林火灾的影响[J]. 应用气象学报, 2018, 29(5): 619-629.
 LI Xiufen, GUO Zhaobin, ZHAO Huiying, et al. Change of dry and wet climate and its influence on forest fire in the great xing'an mountains[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2018, 29(5): 619-629.
- [16] 高江波, 焦珂伟, 吴绍洪. 1982—2013 年中国植被 NDVI 空间异质性的气候影响分析[J]. 地理学报, 2019, 74(3): 534-543.
 GAO Jiangbo, JIAO Kewei, WU Shaohong. Revealing the climatic impacts on spatial heterogeneity of NDVI in China during 1982-2013[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(3): 534-543.
- [17] 杨扬,刘海苹,王志刚,等.大兴安岭地区多年冻土活动层变化规律研究[J].黑龙江工程学院学报,2017,31(1):15-18.
 YANG Yang, LIU Haiping, WANG Zhigang, et al. On change laws of permafrost active layer in Daxing'anling Region[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Technology, 2017, 31(1): 15-18.
- [18] 杨丽萍,秦艳,张存厚,等. 气候变化对大兴安岭兴安落叶松物候期
 的影响[J]. 干旱区研究, 2016, 33(3): 577-583.
 YANG Liping, QIN Yan, ZHANG Cunhou, et al. Influence of climate

change on the phenophase of larix gmelinii in the greater khingan mountains[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(3): 577-583.

- [19] 王文华,苏和, 蔚军. 大兴安岭黑土区森林对径流的影响[J]. 东北 水利水电, 2009, 27(10): 28-30, 72.
 WANG Wenhua, SU He, WEI Jun. Runoff influence by forest in black soil region of Daxing'anling area[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2009, 27(10): 28-30, 72.
- [20] 赵秀娟. 大兴安岭水系水文特征及形势变化分析[J]. 东北水利水电, 2013, 31(5): 41-44, 72.
 ZHAO Xiujuan. Analysis of Rivers hydrological characteristics and variation in the Da Hinggan Mountains[J]. Water Resources &

Hydropower of Northeast China, 2013, 31(5): 41-44, 72.

- [21] 罗韦慧, 满秀玲, 田野宏, 等. 大兴安岭地区森林小流域河川径流特征[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 83-86, 103.
 LUO Weihui, MAN Xiuling, TIAN Yehong, et al. Runoff characteristics of forest watershed in greater xing'an mountains[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(3): 83-86, 103.
- [22] 陈百灵. 抚育强度对大兴安岭用材林地表径流的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.
 CHEN Bailing. Effect of tending intensity on surface runoff of timber stand in daxinganling mountains[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2016.
- [23] 朱宾宾, 满秀玲, 孙双红, 等. 大兴安岭北部森林流域内积雪与融雪 径流化学特征[J]. 林业科技, 2016, 41(6): 53-56.
 ZHU Binbin, MAN Xiuling, SUN Shuanghong, et al.Chemical characteristics of snowpack and snowmelt-runoff in forest watershed in northern region of greater xing, an mountains[J]. Forestry Science & Technology, 2016, 41(6): 53-56.
- [24] 臧传富.黑河流域蓝绿水时空变化研究[D].北京:北京林业大学, 2013.

ZANG Chuanfu. Assessment of spatial and temporal variability of green and blue water flows in the Heihe river basin, China[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013.

[25] 杨环.北峪河流域河川径流变化特征与影响因素分析[D]. 兰州:兰州大学, 2018.

YANG Huan. Analysis on the causes and characteristics of river runoff change in beiyuhe basin[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.

- [26] 鲁菁,张玉虎,高峰,等.近 40 年三江平原极端降水时空变化特征 分析[J].水土保持研究, 2019, 26(2): 272-282.
 LU Jing, ZHANG Yuhu, GAO Feng, et al. Temporal and spatial variation characteristics of extreme precipitation in the Sanjiang plain in recent 40 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(2): 272-282.
- [27] 刘宇峰, 原志华, 孙铂. 近 15 年来西安市主要气候要素变化的 R/S 分析[J]. 西安文理学院学报(自然科学版), 2016, 19(1): 73-78.
 LIU Yufeng, YUAN zhihua, SUN Bo. R/S analysis of major climatic

factors in Xi'an in recent 15 years[J]. Journal of Xi'an University of Arts & Science (Natural Science Edition), 2016, 19(1): 73-78.

- [28] 代海燕,边玉明,安莉娟,等. 气候变暖背景下内蒙古大兴安岭生态 功能区冷暖急转气候特征[J]. 冰川冻土, 2018, 40(5): 892-898.
 DAI Haiyan, BIAN Yuming, AN Lijuan, et al. Climatic feature of temperature sharp turn in the Greater Khingan Range ecological function areas in Inner Mongolia, on the background of climate warming[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(5): 892-898.
- [29] 向辽元,陈星,黎翠红,等.近 55 年中国大陆地区降水突变的区域 特征[J]. 暴雨灾害,2007,26(2):149-153.
 XIANG Liaoyuan, CHEN Xing, LI Cuihong, et al. The regional features of abrupt precipitation change in China in recent 55 years[J]. Torrential Rain and Disasters, 2007, 26(2): 149-153.
- [30] 张艳平, 胡海清. 大兴安岭气候变化及其对林火发生的影响[J]. 东 北林业大学学报, 2008, 36(7): 29-31, 36. ZHANG Yanping, HU Haiqing. Climatic change and its impact on forest fire in Daxing'anling mountains[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2008, 36(7): 29-31, 36.
- [31] 葛鹏. 大兴安岭南段天然白桦次生林蒸散特征研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017.

GE Peng. Evapotranspiration characteristics of natural secondary white birch forest in the southern Daxing'anling mountains[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017.

- [32] 程宗杰. 1970—2014 年党河流域径流量变化特征及其影响因子探究
 [J]. 甘肃水利水电技术, 2017, 53(9): 1-4, 20.
 CHENG Zongjie. Study on variation characteristics and influencing factors of runoff in danghe river basin from 1970—2014[J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 2017, 53(9): 1-4, 20.
- [33] 段亮亮. 大兴安岭气候、森林覆盖率和冻土变化对河川径流的影响
 [D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2017.
 DUAN Liangliang. Impacts of changes in climate, forest cover and permafrost on streamflow in the Da hinggan mountains watersheds[D].
 Harbin: Northeast Forestry University, 2017.
- [34] 马月. 基于 SWAT 模型的金沙江流域水文过程对气候变化的响应研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
 MA Yue. Study on the response of the hydrological process of the

Jinsha river basin to climate change based on the SWAT model[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.

[35] 黎云云,畅建霞,王於琪,等.渭河流域河川径流对气候变化的时空
 响应机理[J].应用基础与工程科学学报,2018,26(3):502-514.
 LI Yunyun, CHANG Jianxia, WANG Yuqi, et al. Spatiotemporal

response mechanism of runoff to climate change in the Wei river basin[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, 26(3): 502-514.

Analysis of Climate and Runoff Variation Characteristics in the Genhe River Basin from 1980—2017

YUE Yongjie, WU Yunzhula, LI Xu, WANG Yaqian, YI Lixi (Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010010, China)

Abstract: Climate change has a major impact on human life and economy, such as melting glaciers, changing vegetation, ocean acidification, and forest line backwardness. Water resource is the basic natural resource of a country, which can maintain the ecological balance and is an important factor to measure the comprehensive national strength. River runoff is an important part of hydrological cycle and water resources system. Under the background of global warming, the change of gas phase factor and runoff in the root river basin is studied to reveal the change law of climate and runoff in the basin and its interaction mechanism, which can provide a basis for the study of permafrost change, vegetation change and evapotranspiration in the basin. Located in the cold temperate zone of China, Genhe River basin has a special climate and natural environment, with a large area of frozen soil, which is very sensitive to climate change. [Objective] The relationship between climate and hydrology is discussed by analyzing the change of meteorological elements and runoff in the Genhe River basin, which will provide a theoretical basis for the scientific management of water resources in the basin. [Method] In this paper, the Erguna River basin was taken as the research object, and m-k test and Hurst index were used to analyze the change trend and interaction relationship between meteorological factors and runoff in the Erguna River basin from 1980–2017.

(Result **)** The average annual temperature in the Genhe River basin increased by 1.10 °C between 1980 and 2017, and tended to rise at the level of alpha a=0.01, with a strong persistence (H=0.75). In the growing season, the temperature variation was the strongest (Z=4.63). ②The precipitation in the growing season of the Genhe River basin accounts for 85% of the annual precipitation, and tends to decline, with a decreasing range of 1.68 mm/a. ③ The air relative humidity in the initial freezing period and the complete freezing period in the Genhe River basin decreased significantly at the levels of alpha a=0.001 and 0.01, and the trend of decrease was very persistent (H=1.0), with a range of 0.05 %/a. ④The runoff in the Genhe River basin tended to decrease, and the abrupt change occurred in 1997 and 1999, which was basically consistent with the abrupt change of annual precipitation, and the variation trend of rainfall and runoff was 0.91. ⑤The correlation coefficient between the runoff in the Genhe River basin and the average annual temperature was 0.50. The runoff in the river basin was mainly affected by the increase of evapotranspiration of various factors in the basin, as well as the freezing and thawing time or area of soil and river.

[Conclusion] The precipitation and runoff in the Genhe river basin did not change significantly from 1980-2017, while the temperature showed a violent rising trend. The overall climate in the basin tended to be drier and colder in summer and drier and hotter in winter.

Key words: root river basin; M-K inspection; climate change; trend analysis

责任编辑:陆红飞