

文章编号: 1008 - 2786 - (2017) 3 - 257 - 09

DOI: 10. 16089/j. cnki. 1008 - 2786. 000220

# 近 55 年来黄河河源区径流的变化及区域差异

蓝永超<sup>1</sup>, 刘根生<sup>2</sup>, 喇承芳<sup>2</sup>, 朱云通<sup>2</sup>, 马全杰<sup>2</sup>, 石明星<sup>1</sup>

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000; 2. 黄河水利委员会上游水文水资源局, 兰州 730030)

**摘 要:** 基于黄河河源区有关水文、气象台站的观测数据, 对该区及黄河沿水文站以上、黄河沿水文站 - 吉迈水文站区间、吉迈水文站 - 玛曲水文站区间、玛曲水文站 - 唐乃亥水文站区间各区域 1960—2014 年期间径流变化的季节特征、趋势及其对气候变化响应的区域差异进行了分析。结果表明: 近 55 a 来黄河河源区径流及其各分区径流总体上呈减少的态势, 但减少幅度各区有所不同; 但在 2000 年代中期后径流量回升比较明显。在上述分析的基础上, 基于周期外延叠加方法对黄河河源区径流未来 30 a 的可能变化进行了预测。预测显示, 未来 30 a 内, 黄河河源区径流的变化为先增后减, 但总体变化平稳, 其均值与目前 55 a 实测系列均值没有显著差异。

**关键词:** 黄河河源区; 子区; 季节变化特征; 区域差异; 趋势预测

中图分类号: P333.1

文献标志码: A

位于青藏高原东北部的黄河河源区(以下简称河源区)是气候变化敏感区域, 近几十年来的气候变化对河源区径流的形成与变化产生了显著的影响。对黄河流域径流量的统计分析显示, 该流域总径流量的三分之一以上来源于干流唐乃亥水文断面以上的河源区, 而该区的集水面积仅占黄河流域面积的 16.2%<sup>[1-3]</sup>。对于气候变暖背景下河源区径流变化的季节特征与对径流对区域气候变化的响应差异研究, 不仅是水科学研究领域中的前沿课题, 也是制定区域水资源的可持续开发利用规划与适应气候变化对策所亟待答复的重要科学问题。

由于河源区径流变化在整个黄河流域水资源开发利用中的重要地位, 全球变暖背景下河源区径流的变化已引起了学术界的广泛关注, 并取得许多重要成果与进展<sup>[1-7]</sup>。但值得注意的是, 在以往许多研究中, 往往是将河源区径流的变化作为一个整体来研究, 而忽略了流域内不同区域径流变化的差异。本文根据流域的水文地理特征, 将其划分为若干子区, 分别对及各子区径流变化的季节特征进行分析,

以揭示河源区径流对气候变化响应的区域差异, 为决策部门制定黄河流域水资源可持续开发利用规划及适应与减缓气候变化带来的不利影响的对策提供科学依据。

## 1 河源区水文气象概况

河源区是指位于青藏高原东北部(95°50'E ~ 103°30'E, 32°30'N ~ 36°00'N)的黄河干流唐乃亥以上流域(图 1), 集水面积 12.197 × 10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>, 占黄河流域面积 15%, 多年平均年径流量 200 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>, 约占黄河流域年平均径流量 580 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup> 的近 40%。<sup>[8-9]</sup>唐乃亥以上流域地势高寒, 人类活动影响相对较少, 故流域出口断面(唐乃亥水文站)的径流观测记录基本上能客观地反映黄河河源区的天然径流变化状态。流域大部分海拔高度在 3000 m 以上, 气候寒冷, 分布有大片的连续、岛状多年冻土和季节性冻土。区内除阿尼玛卿山主峰一带外, 其余山地海拔多在冰川雪线高度以下, 故河源区内极少

收稿日期(Received date): 2016 - 04 - 21; 改回日期(Accepted date): 2016 - 07 - 29。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金重点项目(41530529); 中国科学院重点部署项目(y322G73001); 国家自然科学基金重大研究计划项目(91225302)。[National Nature Sciences Foundation of China(41530529; 91225302); Key Development Project of Chinese Academy of Sciences(y322G73001)。]

作者简介(Biography): 蓝永超(1957 -), 男, 四川资阳人, 研究员, 博士生导师, 主要从事气候变化和水文水资源等方面的研究。[Lan Yongchao, male, professor, mainly research on hydrology, water and climate change.] E-mail: lyc@lzb.ac.cn

有现代冰川发育。在环绕玛积雪山的两条支流切木曲和曲什安河河源区分布着 125.7 km<sup>2</sup> 的冰川;此外,在阿尼玛卿山南北两侧的巴颜喀拉山和鄂拉山主峰附近有数量极少的零星冰川分布<sup>[10]</sup>。流域内高山耸立,植被较好,相对湿度较大,分布有大面积的湖泊、沼泽、草原,地下水十分丰富。由于地处欧亚大陆中心内陆腹地,气候上属于高寒半湿润性气候,除冷暖两季外,无明显的四季之分;冷季风大雪多,气候寒冷且持续时间长,暖季湿润但持续时间较短。降水量的地域分布特征明显,夏季受西南季风影响,孟加拉湾水汽沿西南气流进入,同时由于青藏高原本身的作用,造成这一带低涡和切变活动比较频繁,西北高东南低的地势也有利于气流抬升,所以区域降水量由东南向西北递减,气温分布主要受海拔高度和地理纬度的影响<sup>[11]</sup>。

## 2 基本资料、分析方法与流域分区

### 2.1 基本资料与分析方法

所采用的气温、降水与径流观测资料分别来源于中国气象科学数据共享服务网与黄河水利委员会上游水文水资源局,资料序列长度为 55 a(1960—2014 年)。考虑到黄河河源区气象站分布不均,为了更好地反映整个流域气温、降水量的历年变化情况,基于资料的代表性和完整性,从 18 个台站中选

择站址无变动或变动后不影响记录连续性的、资料序列较长的 10 个代表站(久治、玛曲、红原、若尔盖、达日、大武、泽库、同德、玛多、兴海)。上述测站均从 1950 年代中后期及 1960 年代初开始观测,迄今已有约 60 a 的观料数据系列。对水文气象要素变化特征与趋势的分析计算主要采用累积距平分析法、spearman 秩次相关检验法、滑动平均法、Man - Kendall 趋势分析和突变分析、线性倾向回归分析法等方法<sup>[12-15]</sup>。

### 2.2 流域分区

利用河源区黄河干流上黄河沿、吉迈、玛曲、唐乃亥 4 个水文站将河源区分为 4 个子区。各区均分布有数量不等的若干国家基本气象站。1 区:黄河沿水文站以上区域。该区由于海拔较高,气温较低,年均温在 -0.30℃ 以下,永久性冻土与季节性冻土广泛分布,区内仅在出口附近设有玛多气象站一个国家基本气象站,是黄河河源区水文气象观测站最稀疏的区域;2 区:黄河沿水文站至吉迈水文站之间的区域。平均海拔高度 >4 000 m,年均温 < -0.20℃,区内亦有大面积多年冻土与季节性冻土分布。该区的入口与出口附近分别设有玛多和达日两个国家基本气象站;3 区:吉迈水文站至玛曲水文站之间的区域,平均海拔 >3 500 m,设有达日、久治、玛曲、红原、若尔盖等 5 个国家基本气象站;4 区:玛曲水文站至河源区出口唐乃亥水文站之间的区域,区内设有玛

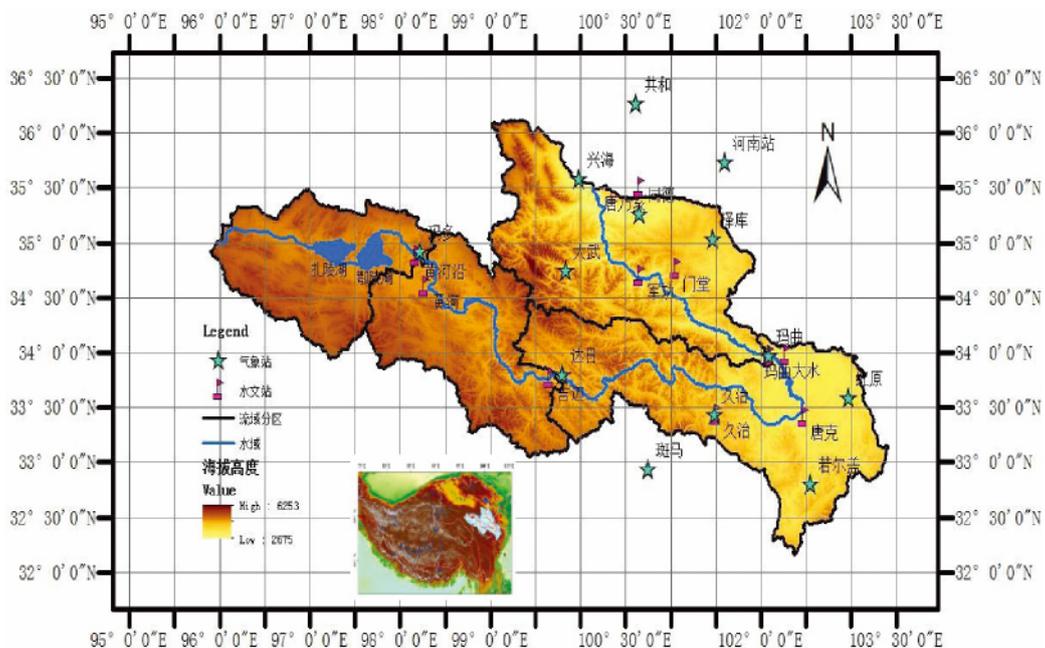


图 1 黄河河源区流域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the source region of the Yellow River

曲、大武、同德、泽库、兴海等 5 个气象站; 海拔 6 282 m 的黄河流域最高峰 - 玛卿岗日峰就坐落在该区, 黄河源区的冰川与永久性积雪亦主要分布于此。黄河源区及其各子区有关水文、地理与气候特征值见表 1。

### 3 河源区径流变化及其区域差异分析

河源区径流属典型的寒区径流, 降水、地下水、冰雪冻土融水等共同成为径流量的补给来源, 径流量的变化同时受到区域内降水量和气温变化的影响。采用互谱分析方法研究表明, 黄河源区降水与径流周期波动间的关系明显好于气温与径流之间的关系, 降水对径流量的主要周期波动变化有较明显的控制作用。气温虽然对径流量的部分周期波动变化有一定的影响, 但明显不如降水的影响<sup>[9, 16]</sup>。对河源区多年平均径流量的分割统计显示, 降雨、地下水补给(基流)与冰雪及冻土融水分别占年径流总量的 63.15%、26.18% 和 9.17% 左右, 因此, 河源区径流主要来源于大气降水的补给, 地下水补给及冰雪融水的补给居次要地位<sup>[1, 17]</sup>。受降水及气温季节变化特征及区域差异的影响, 黄河源区径流的变化也显示出明显的季节特征与区域差异。

#### 3.1 年径流的变化

从图 2a 可以观察到, 1960—2014 年 55 a 期间, 整个河源区年径流总体上呈显著减少的态势, 平均每年约减少  $5.62 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 但 2002 年后开始逐步回升; 除 2 区外, 各子区年径流亦呈不同程度的下降态势, 对河源区产流贡献最大的 3 区年径流减少最为明显, 平均每年减少约  $3.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 占整个河源区年径流减少量的 58.7%。总体上 1980 年代是整个河源区径流最丰沛的时期, 此后, 径流突然大幅减少, 由正距平转为负距平, 并持续至 2000 年代初,

2000 年代初期之后又迅速回升到正距平。1980 年代是 1960 年代以来河源区年径流最丰沛的时期, 1990 年代和 2000 年代则是最枯的时期。

#### 3.2 各季径流的变化

1. 夏季径流: 1960—2014 年 55 a 期间, 除 2 区外, 整个河源区及 1、3、4 区夏季径流的年际变化均呈减少态势(详见图 3a)。总体上, 1960—1980 年代, 河源区及各子区夏季径流均呈增长的态势, 从 1980—2000 年代, 河源区及各子区夏季径流均呈递减的态势, 1 区尤为显著; 2010 年代以后, 整个河源区夏季径流回升显著。1980 年代与 2010 年代以来, 是河源区夏季最丰沛的时期, 1990—2000 年代, 是河源区夏季径流最枯的时期(详见图 3b);

2. 秋季径流: 与其它各季相比, 整个河源区秋季径流的减少均最为显著, 尤其是对全区产流贡献最大的 3 区减幅最大。1960—2014 年 55 a 期间, 整个河源区秋季径流平均每年减少约  $1.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 3 区秋季径流平均每年减少约  $1.24 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 占整个河源区年径流减少量的 65.3% (详见图 3c)。1960—1980 年代, 河源区秋季径流相对较为丰沛, 1990 年代河源区秋季径流大幅减少, 1 区尤为显著; 1990 年代以后缓慢回升, 但一直处于负距平。1980 年代是河源区秋季径流最丰沛的时期, 1990 年代则是秋季径流最枯的时期;

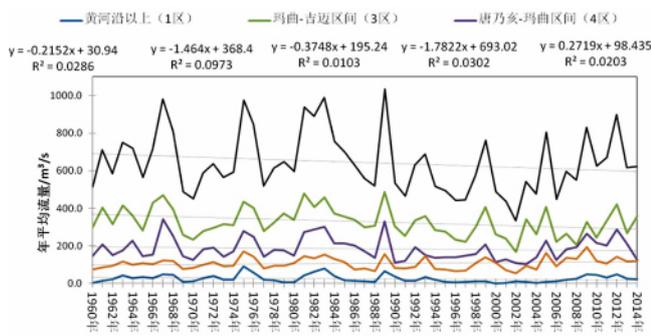
3. 冬季径流: 河源区的冬季径流来源于秋季退水与深层地下水补给。主要受秋季径流减少的影响, 河源区冬季径流年际变化总体呈减少态势, 3 区比较显著, 但 2、4 区却呈增长的态势(详见图 3e); 总体上, 1960—1980 年代, 河源区及各子区冬季径流呈缓慢增长的态势, 2010 年以后进入正距平并且成为河源区冬季较为丰沛的时期, 而 1990 年代是河源区冬季径流最枯的时期(详见图 3f);

表 1 黄河源区水文地理气候特征值

Tab. 1 The main hydrology, geography and climate characteristic values in the source region of the Yellow River and its each sub-region

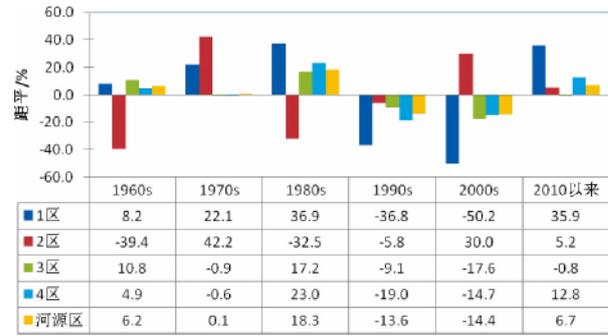
| 分区       | 平均海拔高度 <sup>a</sup><br>/m | 集水面积<br>/km <sup>2</sup> | 面积比<br>/% | 产流量<br>m <sup>3</sup> /s | 产流比<br>/% | 平均气温<br>/°C | 降水量<br>(mm) | 观测期<br>(年) |
|----------|---------------------------|--------------------------|-----------|--------------------------|-----------|-------------|-------------|------------|
| 黄河沿以上    | >4500                     | 20 930                   | 17.16     | 8.07                     | 3.87      | -3.69       | 327.12      | 1960—2014  |
| 黄河沿 - 吉迈 | >4000                     | 24 089                   | 19.75     | 40.24                    | 16.05     | -2.25       | 439.3       | 1960—2014  |
| 吉迈 - 玛曲  | >3500                     | 41 029                   | 29.45     | 101.96                   | 50.49     | 0.04        | 635.6       | 1960—2014  |
| 玛曲 - 唐乃亥 | >3000                     | 35 924                   | 33.64     | 59.76                    | 29.59     | 0.81        | 468.3       | 1960—2014  |
| 整个河源区    | >3000                     | 121 972                  | 100       | 201.96                   | 100.00    | 0.07        | 548.6       | 1960—2014  |

注: 海拔高度由黄河水利委员会上游水文水资源局提供



(a) 年际变化过程

(a) Interannual change processes



(b) 年代际变化过程

(b) Interdecadal change process

图2 1960—2014年黄河源区及各子区径流的变化过程

Fig. 2 The change processes of runoff through every sub-region in the source region of the Yellow River from 1960 to 2014

4. 春季径流: 除2区外, 河源区春季径流年际变化均呈减少态势(图3g)。从1960—2000年代, 河源区春季径流总体呈逐步减少态势, 2010年后迅速回升, 并由2000年代的负距平转为正距平, 2000年代是河源区春季径流最枯的时期(图3h)。

从上述各图可以观察到, 2区径流的变化态势明显异于其它子区。初步分析其成因, 该区位于流域的高海拔地带, 区内阿尼玛卿山一带分布有大面积的积雪与冰川及冻土, 因而气候对该区径流的影响亦异于其它子区。

### 3.3 黄河源区径流的突变分析

在全球气候变化研究中, 突变点检测是气候时间序列研究的一项重要内容, 由于气候时间序列的非线性、非平稳性, 使得对气候时间序列的突变点检测要求较高。特别是近年来, 我国极端气候事件出现的频率有日益增大的趋势, 因此, 对气候时间序列突变点的检测和就研究就显得格外迫切和必要。气候突变往往是指从一种稳定状态跳跃到另一种稳定状态的气候现象, 具体表现为气候在时空上从一个统计特征到另一个统计特征的急剧变化。时间序列的突变主要包括以下几种类型: 均值突变、方差突变、趋势突变、概率突变、空间型突变、谱突变、模型参数突变等等。水文气象因子时间序列的突变主要指均值突变或趋势突变。即时间序列从一个均值状态或者趋势突然跳跃到另一个均值状态或趋势的突变。突变分析主要采用了前面介绍的 spearman 秩次相关检验法、Man - Kendall 趋势分析和突变分析、线性倾向回归分析法等方法。河源区及其各子区的年径流与各季节径流的突变特征进行分析和检验。分析和检验结果见表2、3。

河源全区及除2区外的各子区年径流的突变特

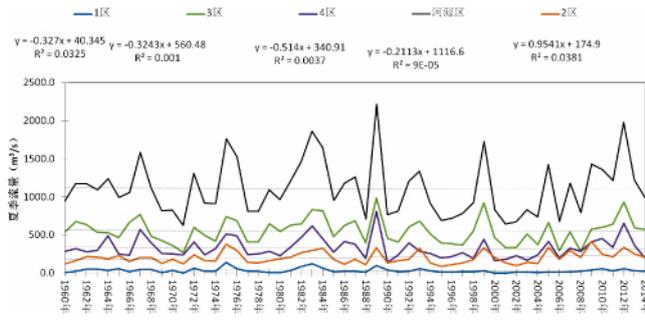
征如表2所示, 突变点主要出现在1990年后, 且突变前系列均值均显著减少。河源全区及其各子区各季节径流的突变如表3所示, 除秋季径流外, 河源区及各子区各季节径流突变发生时间差异较大, 且突变后均值的增减亦各不相同。

## 4 河源区径流变化趋势预测

河源区径流未来的可能变化, 是学术界与社会公众所共同关注的问题。由于径流的变化主要取决于该区域的气候变化, 尤其是降水量的变化。对于气温的变化, 目前已有定论, 即在可预见的相当长时期内, 全球及绝大部分地区的气温仍将以一定的速率持续上升。但降水量的变化则具有很大的不确定性, 目前尚无成熟的方法能够准确地预测。由于径流的变化综合地反映了气候环境与下垫面条件的影响。通过分析黄河源区年径流的变化规律, 利用数理统计方法获得时间序列的各种变化周期, 并对所获得的周期外延和叠加, 就能获得未来一定时期内径流的变化动态, 从而掌握该段时期内的径流变化趋势。

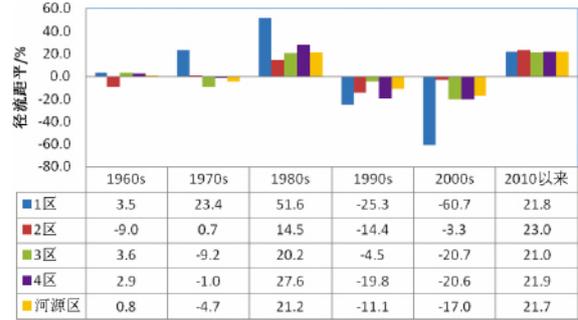
### 4.1 黄河源区年平均流量变化的丰枯循环周期

通过分析插补延长后的黄河源区出口断面控制水文站唐乃亥水文站1920—2014年年平均流量变化过程(图4), 可大致将其分为4个历时长短不等的完整的丰枯循环周期, 每个丰枯循环周期均各含一个历时长短不等的枯水期和丰水期(表4)。2014年之后是第五个丰枯循环周期中的枯水期的开始还是第四个丰枯循环周期中的丰水期延续, 目前还不能确定。



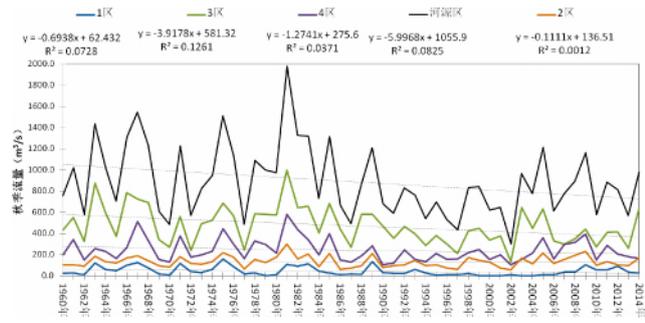
(a) 夏季径流年际变化过程

(a) Interannual change processes of summer runoff



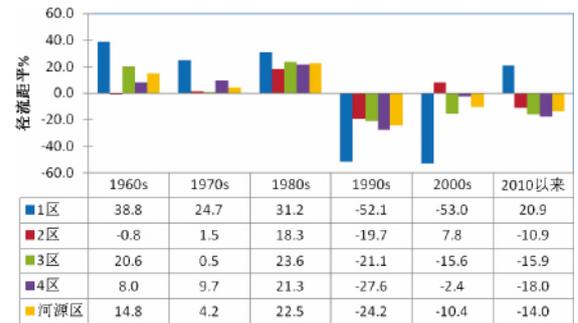
(b) 夏季径流年代际变化过程

(b) Interdecadal change processes of summer runoff



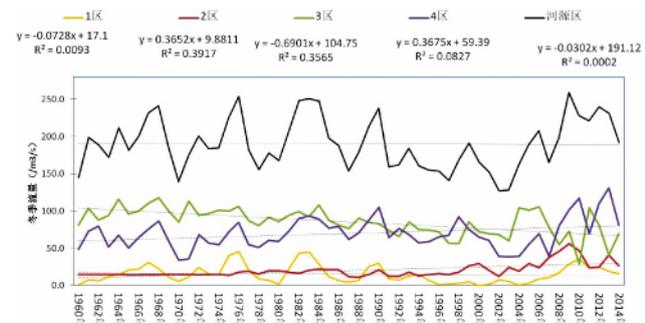
(c) 秋季径流年际变化过程

(c) Interdecadal change process of autumn runoff



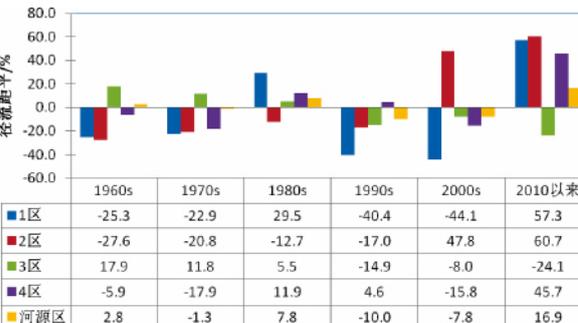
(d) 秋季径流年代际变化过程

(d) Interdecadal change processes of autumn runoff



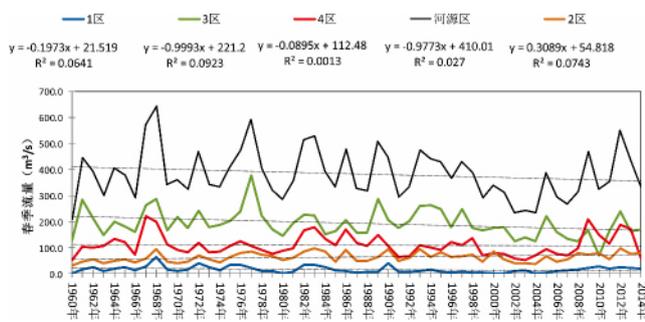
(e) 冬季径流年际变化过程

(e) Interannual change process of winter runoff



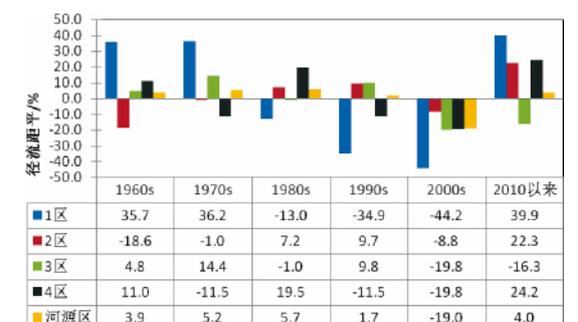
(f) 冬季径流年代际变化过程

(f) Interdecadal change process of winter runoff



(g) 春季径流年际变化过程

(g) Interannual change processes of spring runoff



(h) 春季径流年代际变化过程

(h) Interdecadal change process of spring runoff

图 3 1960—2014 年河源区及各子区各季径流的变化过程

Fig. 3 The interannual and interdecadal change processes of each season runoff through each sub-region in the source region of the Yellow River from 1960 to 2014

4.2 基于周期外延叠加的河源区未来变化趋势预测

利用周期外延叠加方法<sup>[19 20]</sup>径流系列进行周期分解,寻找出径流变化的不同周期分量,并对这些周期分量系列进行叠加外延,获得未来若干年后的径流变化值(图5、6)。依据此方法得到的数据显示,在未来30 a,河源区径流的变化将是先扬后抑,即在2016—2025年,径流呈现一个增长趋势,均值675.8 m<sup>3</sup>/s,较目前实测系列均值617.7 m<sup>3</sup>/s有10%左右的增幅;在2026—2035年,径流逐渐递减,均值632.2 m<sup>3</sup>/s,较目前实测系列均值仍有2.35%的增幅;但比2016—2025年径流均值减少-6.45%的减幅;在2036—2045年,径流继续回落,均值476.6 m<sup>3</sup>/s,较目前实测系列均值减少20%左右。总体上,未来30 a径流系列均值595 m<sup>3</sup>/s,较目前实测系列均值略有减少(-3.5%)。

表2 黄河源区与各子区年平均流量系列的突变时间及突变前后系列均值及跳跃值

Tab.2 Abrupt change time points, means of annual precipitation time series before and after abrupt change and jump amount at some main observation stations in the source region of the Yellow River from 1960 to 2012

| 年平均流量系列 | 变化趋势 | 突变点   | 突变前系列均值 m <sup>3</sup> /s | 突变前系列均值 m <sup>3</sup> /s | 跳跃量 m <sup>3</sup> /s |
|---------|------|-------|---------------------------|---------------------------|-----------------------|
| 1区      | ↓ -  | 1991年 | 30.7                      | 17.4                      | -13.3                 |
| 2区      | ↑ -  | 2005年 | 100.6                     | 130.7                     | 30.1                  |
| 3区      | ↓ +  | 1990年 | 357.0                     | 291.9                     | -65.1                 |
| 4区      | ↓ -  | 1990年 | 201.6                     | 164.6                     | -37.0                 |
| 全区      | ↓ -  | 1990年 | 695.9                     | 579.8                     | -116.2                |

\* 显著性检验水平: α = 0.05, ↑、↓表示存在上升或减少趋势, +、-分别表示趋势显著和不显著。

表3 黄河源区及各子区各季

流量系列的突变时间及突变前后系列均值及跳跃值

Tab.3 Abrupt change time points, means of annual precipitation time series before and after abrupt change and jump amount at some main observation stations in the source region of the Yellow River from 1960 to 2014

| 平均流量系列 | 时段 | 变化趋势 | 突变点   | 突变前系列均值/m <sup>3</sup> /s | 突变后系列均值/m <sup>3</sup> /s | 跳跃量/m <sup>3</sup> /s |
|--------|----|------|-------|---------------------------|---------------------------|-----------------------|
| 1区     | 春季 | ↓ -  | 1985年 | 23.1                      | 12.6                      | -10.5                 |
| 2区     |    | ↑ -  | 1978年 | 51.6                      | 67.9                      | 16.3                  |
| 3区     |    | ↓ +  | 1975年 | 208.7                     | 158.7                     | -50                   |
| 4区     |    | ↑ -  | 2009年 | 105.2                     | 148.5                     | 43.3                  |
| 全区     |    | ↓ -  | 1999年 | 401.6                     | 336.4                     | -65.2                 |
| 1区     | 夏季 | ↓ +  | 1994年 | 38.3                      | 19.7                      | -18.6                 |
| 2区     |    | ↑ -  | 2005年 | 187.1                     | 267.1                     | 80                    |
| 3区     |    | ↓ -  | 2011年 | 541.0                     | 683.5                     | 142.5                 |
| 4区     |    | ↓ -  | 2005年 | 358.5                     | 288.1                     | -70.4                 |
| 全区     |    | ↓ -  | 2009年 | 1058                      | 1638.2                    | -580.2                |
| 1区     | 秋季 | ↑ -  | 1984年 | 60.5                      | 29.4                      | -31.1                 |
| 2区     |    | ↓ -  | 1986年 | 143.1                     | 124                       | -19.1                 |
| 3区     |    | ↓ +  | 1986年 | 553.3                     | 398.4                     | -154.9                |
| 4区     |    | ↓ -  | 1986年 | 284.0                     | 200.4                     | -83.6                 |
| 全区     |    | ↓ +  | 1986年 | 1042.1                    | 749.7                     | -292.4                |
| 1区     | 冬季 | ↓ -  | 1985年 | 19.3                      | 11.6                      | -7.7                  |
| 2区     |    | ↑ +  | 2007年 | 17.1                      | 37.6                      | 20.4                  |
| 3区     |    | ↓ +  | 1986年 | 97.3                      | 74.8                      | -22.5                 |
| 4区     |    | ↑ +  | 2009年 | 65.8                      | 101.7                     | 35.9                  |
| 全区     |    | ↓ -  | 2009年 | 185.6                     | 228.6                     | 20.4                  |

\* 显著性检验水平: α = 0.05, ↑、↓表示存在上升或减少趋势, +、-分别表示趋势显著和不显著。

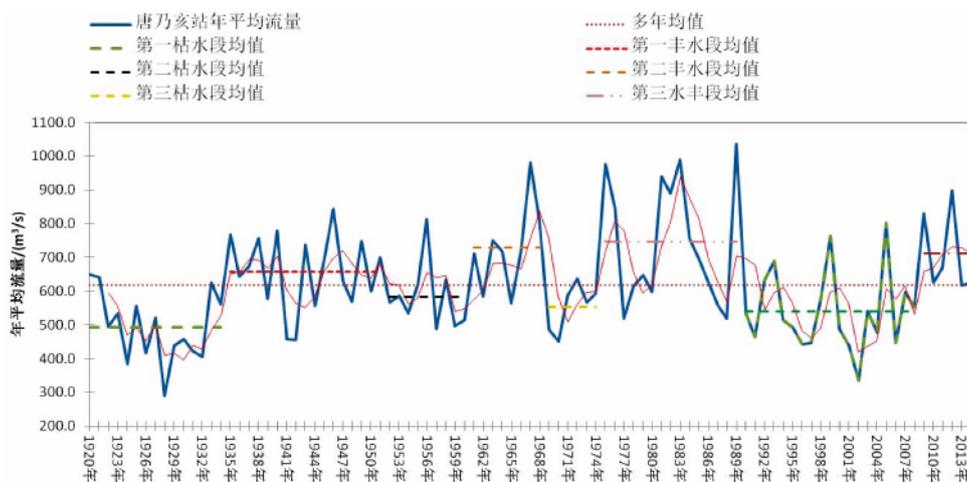


图4 1920—2014年黄河源区年径流变化过程

Fig.4 Variation process of yearly runoff in the source region of the Yellow River from 1920 to 2014

表 4 黄河源区径流的丰枯循环变化周期

Tab. 4 The plentiful and withered circulation periods of annual average discharge in the source region of the Yellow River

| 序号 | 丰枯循环周期      |                |      |       |             |                |      |      |
|----|-------------|----------------|------|-------|-------------|----------------|------|------|
|    | 枯水期         |                |      |       | 丰水期         |                |      |      |
|    | 起止时间        | 均值/( $m^3/s$ ) | 历时/a | 距平/%  | 起止时间        | 均值/( $m^3/s$ ) | 历时/a | 距平/% |
| 1  | 1920—1934 年 | 492.8          | 15   | -20.2 | 1935—1951 年 | 657.6          | 17   | 6.50 |
| 2  | 1952—1960 年 | 583.4          | 9    | -5.55 | 1961—1968 年 | 728.8          | 8    | 18.0 |
| 3  | 1969—1974 年 | 553.5          | 6    | -10.4 | 1975—1989 年 | 747.5          | 15   | 21.0 |
| 4  | 1990—2008 年 | 538.5          | 19   | -12.8 | 2009—2014 年 | 710.6          | 6    | 15.6 |
| 平均 |             | 542.1          | 12.3 | -10.2 |             | 711.1          | 11.5 | 15.3 |

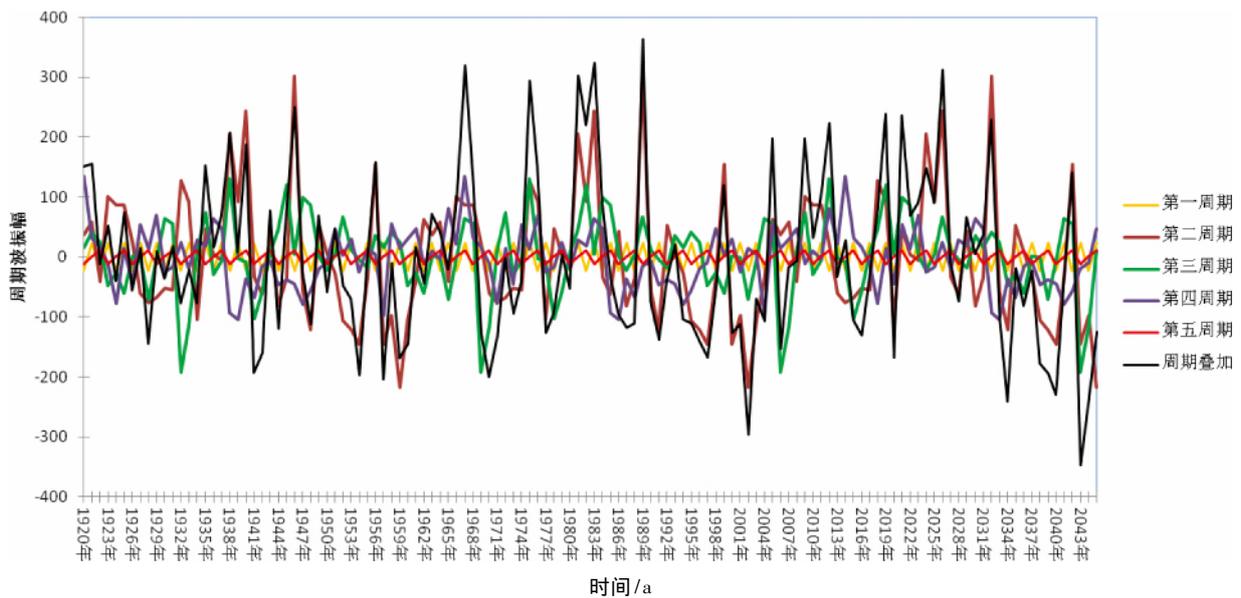


图 5 黄河源区年平均流量变化过程周期分解示意图

Fig. 5 Sketches of change process of annual average discharge series in the source region of the Yellow River and its periodic decomposition

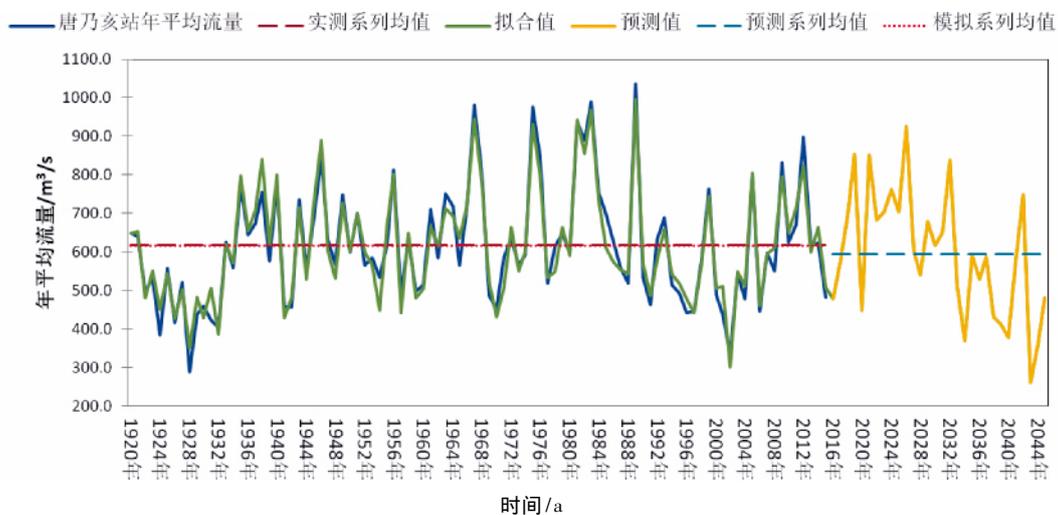


图 6 黄河源区 1920—2014 年径流变化过程及 2015—2044 年径流变化趋势预测

Fig. 6 Variation process of yearly runoff during the period from 1920 to 2014 and trend prediction of the yearly runoff during the period from 2015—2044 in the source region of the Yellow River

## 5 结 语

通过上述对近 55 年来黄河河源区径流变化特征、趋势及区域差异的分析,我们可得出如下结论:

1. 近 55 a 来,整个河源区径流的年际变化总体上呈显著减少的态势,但 2002 年后开始逐步回升;各子区年径流的变化并不完全一致,黄河沿-吉迈区间的年径流呈不显著的上升态势,而其它子区年径流亦呈不同程度的下降态势,对全区产流贡献最大的吉迈-玛曲区间年径流的减少尤为显著;黄河河源区大部分区域各季节径流的年际变化总体均呈减少态势,其中对全区产流贡献最大的吉迈-玛曲区间秋季径流的减少最为显著;

2. 黄河河源区年径流的年代际变化呈不规则的上下波动状态,总体上 1980 年代是整个河源区径流最丰沛的时期,此后,径流突然大幅减少,由正距平转为负距平,并持续至 2000 年代,2010 年后又迅速回升到正距平。1980 年代是 1960 年以来河源区年径流最丰沛的时期,1990 年代和 2000 年代则是最枯的时期;黄河河源区各区域各季节径流的年代际变化亦呈波动起伏状态。总体上,1980 年代与 2010 年以来是河源区各季径流较丰沛的时期,而 1990 年代黄河河源区径流普遍偏枯;

3. 分析与预测结果表明,未来 30 a 河源区径流的变化有一个先扬后抑走势,但总体变化平稳,与目前器测系列均值没有显著差异,在更长的时段内可能处于一个缓慢上升的趋势。

## 参考文献(References)

- [1] LAN Yongchao, ZHAO Guohui, ZHANG Yaonan et al. Response of runoff in the source region of the Yellow River to climate warming [J], *Quaternary International*, 2010, 226: 60-65
- [2] 李林,申红艳,戴升,肖建设,时兴合. 黄河河源区径流对气候变化的响应及未来趋势预测[J]. *地理学报*, 2010, 66(9): 1261-1269 [LI Lin, SHEN Hongyan, DAO Sheng, XIAO Jianshe, SHI Xinghe. Response to climate change and prediction of runoff in the source region of the Yellow River [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 66(9): 1261-1269]
- [3] 刘晓燕,常晓辉. 黄河河源区径流变化研究综述[J]. *人民黄河*, 2005 27(2): 6-11 [LIU Xiaoyan, CHANG Xiaohui. A summary of study on runoff variations in source region of the Yellow River [J]. *Yellow River* 2005 27(2): 6-11]
- [4] 金君良,王国庆,刘翠善,贺瑞敏,胡青叶. 黄河河源区水文水资源对气候变化的响应[J]. *干旱区资源与环境* 2013 27(5): 137-144 [JIN Junliang, WANG Guoqing, LIU Cuishan, HE Ruimin, HU Qingye. Responses of hydrology and water resources to the climate change in the Yellow River source region [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013 27(5): 137-144]
- [5] 刘彩红,杨延华,王振宇. 黄河上游夏季流量对气候变化的响应及未来趋势预估[J]. *地理科学进展*, 2012, 31(7): 846-852 [LIU Caihong, YANG Yanhua, WANG Zhenyu. Impacts of climate change on the summer flow and estimates of the future and trends in the upper reaches of the Yellow River [J]. *Progress in Geography*, 2012, 31(7): 846-852]
- [6] 贾仰文,高辉,牛存稳,等. 气候变化对黄河河源区径流过程的影响[J]. *水利学报*, 2008, 39(1): 52-59 [JIA Yangwen, GAO Hui, NIU Cunwen et al. Impact of climate change on runoff process in headwater area of the Yellow River [J]. *Shui Li Xue Bao* 2008, 39(1): 52-59]
- [7] 孙卫国,程炳岩,李荣. 黄河河源区径流量的季节变化及其与区域气候的小波相关[J]. *中国沙漠*, 2010, 30(3): 712-722 [SUN Weiguo, CHENG Bingyan, LI Rong. Seasonal variations of runoff and its wavelet correlations with regional climate in source region of the Yellow River [J]. *Journal of Desert Research*, 30(3) 712-722]
- [8] 牛玉国,张学成. 黄河河源区水文水资源情势变化及其成因初析[J]. *人民黄河*, 2005, 27(3): 33-36 [NIU Yugu, ZHANG Xuecheng. Preliminary analysis on variations of hydrologic and water resources regime and its genesis of the Yellow River source region [J]. *Yellow River* 2005 27(3): 13-18]
- [9] 蓝永超,鲁承阳,喇承芳,等. 黄河河源区气候向暖湿转变的观测事实及水文响应,冰川冻土, 2013, 35(4): 920-928 [LAN Yongchao, LU Chengyang, LA Chengfang, et al. The facts of climate transformation to warm-humid and its effect to river runoff in the source region of the Yellow River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(4): 920-928]
- [10] 刘时银,鲁安新,丁永建,等. 黄河上游阿尼玛卿山区冰川波动与气候变化[J]. *冰川冻土*, 2002, 24(6): 701-707 [LIU Shiyin, LU Anxin, DING Yongjian et al. Glacier fluctuations and the inferred climate changes in the Anyemaqen Mountains in the source area of the Yellow River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002 24(6): 701-707]
- [11] 周长艳,唐信英,李跃清. 青藏高原及周边地区水汽、水汽输送相关研究综述[J]. *高原山地气象研究*, 2012, 32(3): 76-84 [ZHOU Changyan, TANG Xinying, LI Yueqing. Overview of the research on the water vapor and water vapor transport over the Tibetan Plateau and its surroundings. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 2012, 32(3): 76-84]
- [12] 符涂斌,王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. *大气科学*, 1992, 16(4): 482-492 [FU Tubin, WANG Qiang. The definition and detection of the abrupt climatic change [J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1992, 16(4): 482-492]
- [13] YAMAMATO R, IWASHIMA T, SANGA N K. An analysis of climatic jump [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1986 64(2): 273-281
- [14] 汪丽娜,陈晓宏. 水文时间序列突变点分析的启发式分割方法[J]. *人民长江*, 2005, 40(9): 15-18 [WANG Lina, CHEN Xiaohong. Heuristic segmentation method for change-point analysis of

- hydrological time series [J]. *Yangtze River* 2005 40(9): 15-18]
- [15] 于延胜, 陈兴伟. 基于法的水文序列趋势成分比重研究[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(9): 1585-1590 [YU Yansheng, CHEN Xingwei. Study on percentage of trend component in a hydrological time series based on Mann-Kendall Method [J]. *Journal of Natural Resources* 2011 26(9): 1585-1590]
- [16] 马晓波, 李栋梁. 青藏高原近代气温变化趋势及突变分析[J]. *高原气象* 2003(5): 507-512 [MA Xiaobo, LI Dongliang. Analyses on air temperature and its abrupt change over Qinghai-Xizang Plateau in modern age [J]. *Plateau Meteorology*, 2003(5): 507-512]
- [17] 谢昌卫, 丁永建, 韩海东, 王建. 黄河源区径流波动变化对气候要素的响应特征[J]. *干旱区资源与环境* 2006 20(4): 7-12 [XIE Changwei, DING Yongjian, HAN Haidong, WANG Jian. Analysis on the runoff change and its response to the climatic factors at the source regions of the Yellow River [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment* 2006 20(4): 7-12]
- [18] 刘贵春, 张志浩, 喇承芳. 黄河上游唐乃亥站径流变化趋势分析[J]. *甘肃水利水电技术*, 2009 45(12): 4-6 [LIU Guichun, ZHANG Zhihao, LA Chengfang. Study on change trend of runoff through Tangnag Hydrologic Station in the upper Yellow River basin [J]. *Gansu Water Conservancy and Hydropower Technology*, 2009 45(12): 4-6]
- [19] 牛最荣, 陈学林, 王学良. 白龙江干流代表站径流变化特征及未来趋势预测[J]. *水文*, 2015, 35(5): 90-95 [NIU Zuirong, CHEN Xuelin, WANG Xueliang. Runoff variation characteristics of representative station on mainstream of Bailongjiang River and trend prediction [J]. *Journal of China Hydrology* 2015 35(5): 90-95]
- [20] 吕萍. 基于灰色-周期外延模型的年降水量预测[J]. *吉林水利* 2013 368(1): 10-13 [LU Ping. Precipitation forecasting based grey-period extension model [J]. *Jilin Water Conservation*, 2013 368(1): 10-13]

## Study on the Characteristics and Trend of Runoff Change in the Source Region of the Yellow River and Its Regional Difference

LAN Yongchao<sup>1</sup>, LIU Gensheng<sup>2</sup>, LA Chengfang<sup>2</sup>, ZHU Yuntong<sup>2</sup>, MA Quanjie<sup>2</sup>, SHI Mingxing<sup>1</sup>

(1. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, West Donggang Road, 320, Lanzhou, Gansu Province, China; 730000;

2. Hydrology and Water Resource Bureau of the Upper Yellow River Basin, Yellow River Conservancy Committee, Wudu Road 157, Lanzhou, Gansu Province, China; 730000)

**Abstract:** Based on observation data at concerned stations, the seasonal variation characteristics and its long term evolutionary trend and regional differences of the runoff in each sub-region in the source region of the Yellow River, which are, the area above the Huangheyan hydrological station, the area between the Huangheyan hydrological station and Jimai hydrological station, the area between the Jimai hydrological station and the Maqu hydrological station and the area between Maqu hydrological station and the Tangnag hydrological station, and the whole region of the Yellow River during the period from 1960 to 2014 were analyzed. The result showed that all interannual variation of annual and seasonal runoff in each sub-region had been lessening year after year as a whole from 1960s to mid-2000s, although the magnitude of the reduction was different, the annual runoff began to rise again after the mid-2000s. On the basis of above analysis, Period Extension and Superposition Prediction Method were used for forecasting the future variation of annual runoff of the source region of the Yellow River. Predicted results displayed that variation of the runoff of the source region of the Yellow River in the next 30 years would present an upward tendency during from 2015 to 2024 and turned down. But the variation of runoff in the source region of the Yellow River in the next 30 year as a whole, and there would be no significant difference between the mean of measured runoff series in the current 55 years and the mean of predicted runoff series in the future 30 years.

**Key words:** the source region of the Yellow River; sub-region; seasonal variation characteristics; seasonal difference; trend prediction