

引用格式: 岁姚炳, 牛存稳, 贾仰文, 燕翔, 王东东. 黄河水源涵养区近 60 a 降水、气温和径流演变及其对水源涵养的影响[J]. 山地学报, 2023, 41(1): 41-55.

SUI Yaobing, NIU Cunwen, JIA Yangwen, YAN Xiang, WANG Dongdong. Precipitation, temperature and runoff for the recent 60 years in the Yellow River water conservation area of China and their influence on water conservation [J]. Mountain Research, 2023, 41(1): 41-55.

黄河水源涵养区近 60 a 降水、气温和径流演变及其对水源涵养的影响

岁姚炳, 牛存稳*, 贾仰文, 燕翔, 王东东

(中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 明确水源涵养量时空演变特征及其主要影响因素, 是提升区域水源涵养功能的重要前提。目前相关研究多关注影响因素和水源涵养量的相关关系, 缺少对影响因素时空变化特征的分析, 而且因地区不同, 驱动要素的影响也存在差异。本文以黄河水源涵养区为研究对象, 基于气象、水文、土壤、地形等数据, 运用 Pettitt、M-K 趋势检验、小波分析和 InVEST 模型对降水、气温和径流的演变特征及其对水源涵养的影响进行分析。结果表明: (1) 兰州以上地区(兰州站上游的黄河干支流地区)降水以 $8.06 \text{ mm}/10\text{a}$ 的趋势增加, 渭河南山支流和伊洛河分别以 $0.15 \text{ mm}/10\text{a}$ 和 $2.62 \text{ mm}/10\text{a}$ 的速率波动减少。三区气温都呈上升趋势。三区径流分别以 5.87×10^7 、 5.68×10^7 和 $2.82 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$ 的趋势减少; (2) 降水、气温和径流存在多种尺度的周期变化特征, 在大尺度能量波动较大; (3) 兰州以上地区多年平均水源涵养量为 $8.77 \times 10^9 \text{ m}^3$, 渭河南山支流为 $1.73 \times 10^9 \text{ m}^3$, 伊洛河为 $7.91 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。兰州以上地区水源涵养总量最大, 伊洛河单位面积水源涵养量最大; (4) 1960—2019 年, 三区水源涵养量都呈下降趋势; (5) 水源涵养量同降水和径流呈显著正相关关系, 同气温呈负相关关系。本研究可为黄河水源涵养区水资源管理和生态保护提供依据。

关键词: 时空变化; 影响因素; 趋势分析; InVEST 模型; 相关性分析; 黄河水源涵养区

中图分类号: P333; TV213; X171.1

文献标志码: A

水源涵养是指生态系统在水循环过程中对降水的贮存过程^[1-2]。作为生态系统服务功能中的重要组成部分, 水源涵养发挥了调节洪峰、提供水源等重要功能, 为社会经济发展提供重要支撑。明确水源涵养量时空演变特征及其主要影响因素, 是提升区域水源涵养功能的重要前提。

涉及水源涵养量时空变化特征及其影响因素方面的研究, 早期主要是基于观测数据估算水源涵养量, 方法包括水量平衡法^[3]、年径流法^[4]、土壤蓄水

能力法^[5]等。这类方法所需数据量大, 仅适合小流域水源涵养量的估算。近年来, 涌现了大量基于模型的水源涵养量计算方法, 如 SWAT 模型^[6]、LPJ 动态模型^[7]、元胞自动机模型^[8]等。其中, InVEST 模型基于 Budyko 假设, 可以对不同空间尺度下的水源涵养量进行动态化和可视化表达, 应用较广泛。

对水源涵养量驱动要素的研究, 多数学者认为降水是影响水源涵养量的关键因素^[9], 气温、蒸散发、植被净初级生产力、土壤饱和导水率^[10]、人口密

收稿日期(Received date): 2022-11-03; 改回日期(Accepted date): 2023-02-01

基金项目(Foundation item): 国家重点研发计划(2021YFC3201105); 国家自然科学基金(52009140)。[National Key Research and Development Program of China (2021YFC3201105); National Natural Science Foundation of China (52009140)]

作者简介(Biography): 岁姚炳(1998-), 男, 河南邓州人, 硕士研究生, 主要研究方向: 水文与水资源。[SUI Yaobing (1998-), male, born in Dengzhou, Henan province, M. Sc. candidate, research on hydrology and water resource] E-mail: 2177764064@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author): 牛存稳(1979-), 男, 河南安阳人, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向: 水文与水资源。[NIU Cunwen (1979-), male, born in Anyang, Henan province, Ph. D., professor of engineer, research on hydrology and water resource] E-mail: niucw@iwhr.com

度、GDP 和不透率也会影响水源涵养量的时空分布特征^[10-11]。由于空间分异性,驱动要素对水源涵养量的影响存在地区差异,多数研究仅关注影响因素和水源涵养量的相关关系,对影响因素的变化特征分析不足。

黄河水源涵养区面积占黄河流域的 38%,天然径流量占全流域的 84%,是黄河流域主要的产流区^[12],厘清其水循环要素演变特征及其对水源涵养的影响对黄河流域生态保护意义重大。本文以黄河水源涵养区为研究对象,采用 Pettitt、M-K 检验、小波分析和 InVEST 模型等方法分析多时间尺度下降水、气温和径流的变化特征,并深入探讨降水、气温和径流对水源涵养量的影响,以期为黄河水源涵养区水资源管理和生态保护提供依据。

1 研究区概况

黄河水源涵养区包括兰州以上地区、渭河南山支流和伊洛河流域,其中兰州以上地区是指兰州站上游的黄河干支流地区。

兰州以上地区(以下简称:Ⅰ区)是黄河流域重要的产流区^[13],流域面积 $2.23 \times 10^5 \text{ km}^2$,水系众多,地跨青海、四川和甘肃三省,地势西高东低,平均海拔 3600 m(图 1),位于青藏高原和黄土高原的过渡带。大部分地区属于干旱和半干旱区,多年平均降水量 494 mm,多年平均气温 3.02°C ,主要以草地、森林为主,两者面积占Ⅰ区面积的 80% 以上,土壤类型以毡土和钙土为主,土壤厚度

为 12 ~ 160 cm。

渭河南山支流(以下简称:Ⅱ区),流域面积 $5.13 \times 10^4 \text{ km}^2$,横跨宁夏回族自治区、甘肃和陕西省,西部地势高,中部和东部地势相对较低,平均海拔 1600 m。渭河南山支流属于半干旱和半湿润过渡区,多年平均降水量 556 mm,多年平均气温 9.74°C ,农田面积最大,占Ⅱ区面积的 45% 以上,草地、森林面积分别占比 30%、16% 左右,主要以黄绵土和褐土为主,平均土壤厚度为 100 cm 左右。

伊洛河流域(以下简称:Ⅲ区)面积 $1.86 \times 10^4 \text{ km}^2$,地跨陕西和河南两省,地势西南高东北低,平均海拔 740 m。上游靠近秦岭山地,主要以土石山区为主,下游是地势相对平坦的冲积平原^[14]。伊洛河流域位于半干旱向半湿润过渡区,多年平均降水量 694 mm,多年平均气温 13.15°C ,农田面积最大,森林次之,主要以褐土和棕壤土为主,土壤厚度为 10 ~ 140 cm^[15]。

2 方法与数据

2.1 Pettitt 突变点检验

Pettitt 检验是一种非参数检验方法,可以有效检测序列中的突变点。对于一组数据 $\{x_1, x_2, \dots, x_t, \dots, x_T\}$,通过假定变异点 t 的位置,将整个数据分成两部分,计算得到统计量值 U_t ,根据 t 位置的不同($1 \leq t \leq T$),可以得到一组序列 $\{U_1, U_2, \dots\}$,计算当 $|U|$ 最大时对应的概率 $P(|U_{\max}|)$,并与标准值对比来判断是否为突变点。一般认为时, $P < 0.05$

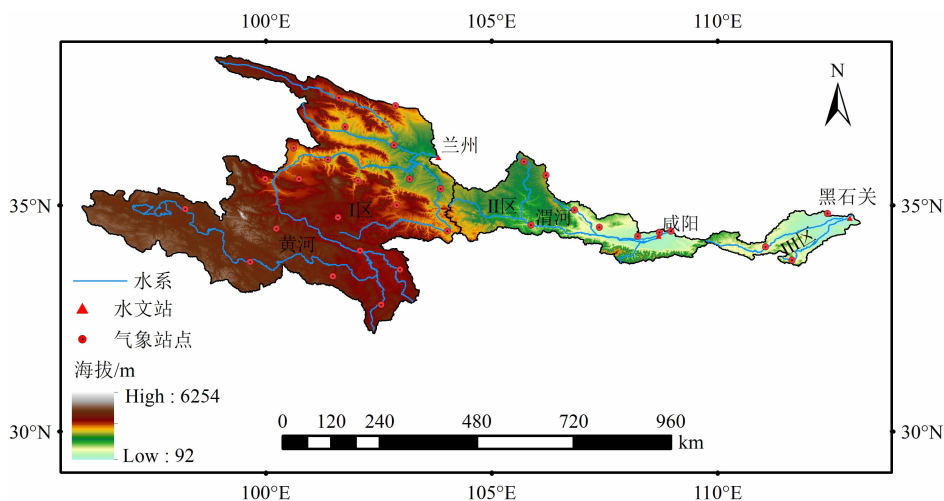


图 1 黄河水源涵养区

Fig. 1 The Yellow River water conservation area of China

突变点显著, $P < 0.01$ 时突变点极其显著^[16-17]。识别数据突变点有助于了解水文气象数据的变化特征。

2.2 M-K 趋势检验

M-K (Mann-Kendall) 趋势检验方法是一种非参数检验方法, 已经被广泛使用。根据统计量 Z 的正负和大小来判断序列变化的方向和程度, 用倾斜率 β 来反映数据变化趋势^[18]。当 $|Z|$ 为 1.96 和 2.58 时, 分别达到 95% 和 99% 的显著性水平。

2.3 小波周期分析

水文数据具有随机性, 常呈现多时间尺度的周期变化特征^[19]。小波分析改进了傅里叶变换只能对频域而不能对时域进行分析的缺陷, 通过自适应窗口对水文数据进行多尺度、多分辨率的研究^[20]。本文选择复 Morlet 小波, 借助 Matlab 软件对数据进行标准化处理, 得到小波系数、小波方差等数据, 利用 Origin 软件实现出图。小波方差图可以确定数据变化的主周期和其他周期^[21]。

2.4 InVEST 模型

InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) 模型结构简单, 可以实现水源涵养量的计算和可视化表达, 在秦岭^[22]、若尔盖^[23]、祁连山^[24]、青藏高原^[25]等多地运用。InVEST 模型提供产水量计算模块, 水源涵养量通过对产水量修正得到, 因涉及公式较多, 以下仅列举三个重要公式, 其他公式请参见文献^[26]:

$$Y_i = (1 - \frac{AET_i}{P_i}) \times P_i \tag{1}$$

$$W_i = \min(1, \frac{249}{V}) \times \min(1, \frac{0.9T}{3}) \times \min(1, \frac{K}{300}) \times Y_i \tag{2}$$

$$T = \log_{10}(\frac{Q}{D \times S}) \tag{3}$$

式中, Y_i 为第 i 个栅格的产水量 (mm); AET_i 为第 i 个栅格的实际蒸散发量 (mm); P_i 为第 i 个栅格的降水量 (mm); W_i 为第 i 个栅格的水源涵养量 (mm); V 为流速系数; T 为地形指数; K 为土壤饱和导水率; Q 为研究区栅格数量; D 为土壤厚度 (mm); S 为百分比坡度 (%)。

潜在蒸散发采用 Penman-Monteith 公式计算得到, 植物可利用水量利用 SPAW 软件得到, 土壤饱和导水率利用 Neuro Theta 软件得到。生物物理表和流速系数参照已有研究成果^[27], 并结合实际情况进行适当修正, 在 ArcGIS 中使用反距离插值获取降水和潜在蒸散发空间分布数据。Zhang 系数^[28]取值范围为 1~30, 依据研究区多年平均径流量, 并参考已有研究^[29-30], 最终确定为 9。所有数据分辨率为 1 km。详细计算过程可参见文献^[10, 31]。

2.5 数据及来源

本文选择 1960—2019 年共 31 个站点的逐日气象数据, 其中 I 区 21 个、II 区 7 个、III 区 3 个。定义春季为 3—5 月, 夏季为 6—8 月, 秋季为 9—11 月, 冬季为 12—次年 2 月。数据信息详见表 1。

3 降水、气温和径流演变特征

3.1 降水演变特征

3.1.1 年尺度

由三区降水年际变化特征 (图 2) 可见, I 区年降水以 8.06 mm/10a 的速率不显著增加 ($P > 0.05$), 在 2002 年发生突变, 突变后 (2003—2019 年) 降水均值增加 44.75 mm, 变化速率从 -6.27 mm/10a 增到 32.24 mm/10a。II 区和 III 区年降水分别以 0.15 mm/10a 和 2.62 mm/10a 的趋势不显著减少

表 1 数据类型及来源

Tab. 1 Data types and sources of this study

类型	数据要素	数据来源
气象数据	降水, 气温, 相对湿度, 风速, 日照时数	中国气象数据共享服务网 (https://data.cma.cn/)
水文数据	兰州、咸阳、黑石关实测径流量	黄河水文年鉴 ^[32]
地形数据	DEM (Digital Elevation Model)	地理空间数据云 (https://www.gscloud.cn/)
遥感数据	土地利用 (1980—2020 年, 共 10 期)	中国科学院资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn/)
土壤数据	土壤厚度、质地、有机质含量	世界粮农组织 (FAO) (https://data.apps.fao.org/)
	根系限制层深度	土壤和地形数据库 (https://data.isric.org:443/geonetwork/srv/eng/catalog.search)

($P > 0.05$)。年降水变化趋势的空间分布(图 3a)显示,Ⅰ区大部分地区降水呈增加趋势,黄河源区降水增速较大,Ⅱ区和Ⅲ区绝大多数地区降水呈减少趋势。

由小波系数实部等值线和小波方差图(图 4 和图 5)可见,Ⅰ区年降水存在三类尺度的周期变化特征,为 20 ~ 32 a、8 ~ 16 a、1 ~ 7 a,周期变化中心在 32 a、12 a 和 3 a。Ⅱ区年降水也存在三类尺度的周期变化特征,周期变化中心在 28 a、8 a 和 4 a。Ⅲ区年降水的周期变化中心为 20 a 和 5 a。

3.1.2 季节尺度

由季节降水变化特征(表 2)可见,Ⅰ区四季降水呈增加趋势,春冬季降水通过了 99% 水平的显著

性检验,冬季降水在 1986 年发生突变,突变后(1987—2018 年)降水均值增加 3.26 mm。Ⅱ区和Ⅲ区春秋降水呈不显著减少趋势($P > 0.05$),夏冬季降水呈增加趋势,仅Ⅱ区冬季降水通过了 95% 水平的显著性检验。由季节降水变化趋势的空间分布(图 3c, d, e, f)可见,Ⅰ区夏秋季降水在南部出现减少趋势,变化速率为 $-3 \sim 0$ mm/10a,三区冬季降水在绝大多数地区呈增加趋势。

季节降水周期变化特征(表 3)显示,Ⅰ区季节降水周期变化特征主要集中在大中尺度,Ⅱ区和Ⅲ区季节降水周期变化中心在大、中、小尺度上都有分布,但在大中尺度上能量波动更剧烈。

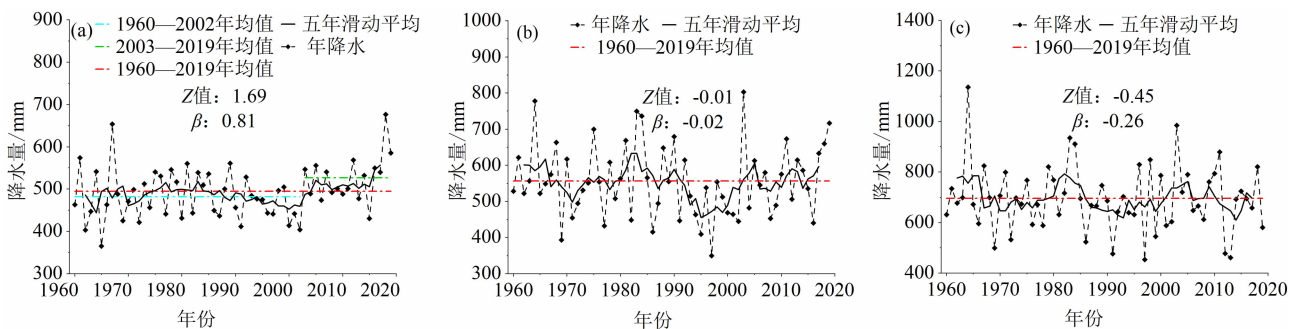


图 2 1960—2019 年降水年际变化:(a) Ⅰ区;(b) Ⅱ区;(c) Ⅲ区

Fig. 2 Inter-annual variation of precipitation from 1960 to 2019: (a) the area I; (b) the area II; (c) the area III

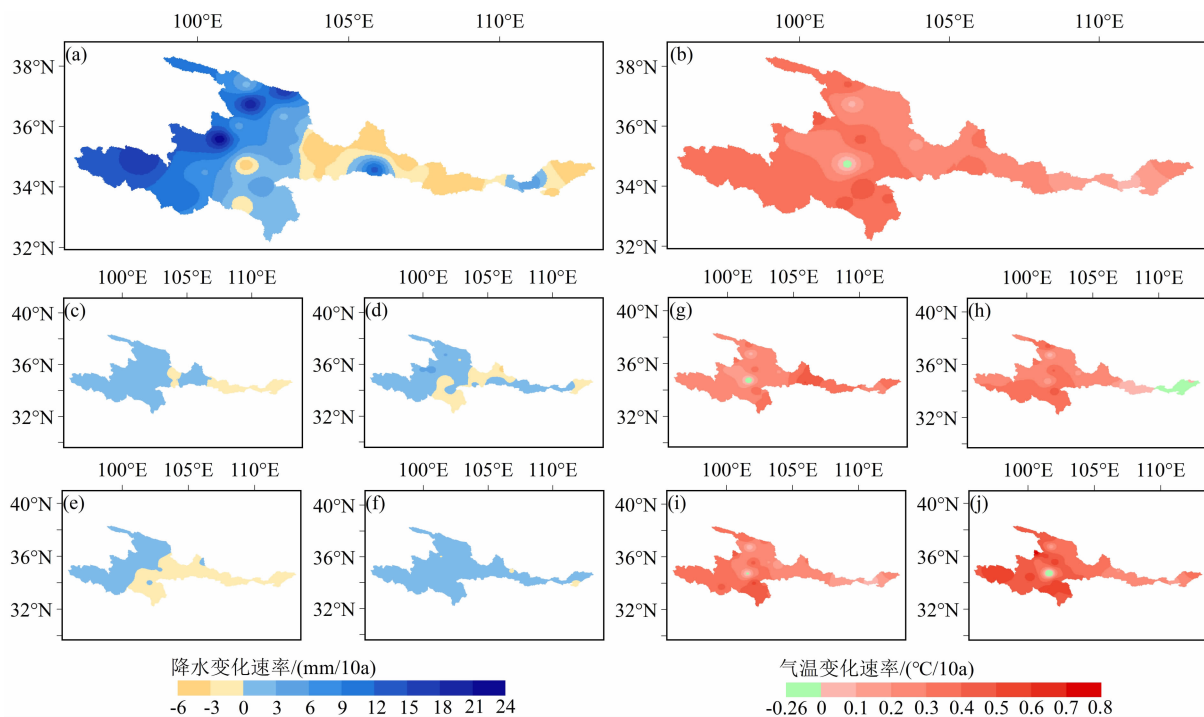


图 3 年、季降水 and 气温变化趋势空间分布:(a) 年降水;(b) 年气温;(c) 春季降水;(d) 夏季降水;(e) 秋季降水;(f) 冬季降水;(g) 春季气温;(h) 夏季气温;(i) 秋季气温;(j) 冬季气温

Fig. 3 Spatial distribution of annual and seasonal precipitation and temperature trends:

(a) annual precipitation; (b) annual mean temperatures; (c) spring precipitation; (d) summer precipitation; (e) fall precipitation; (f) winter precipitation; (g) spring temperature; (h) summer temperature; (i) autumn temperature; (j) winter temperature

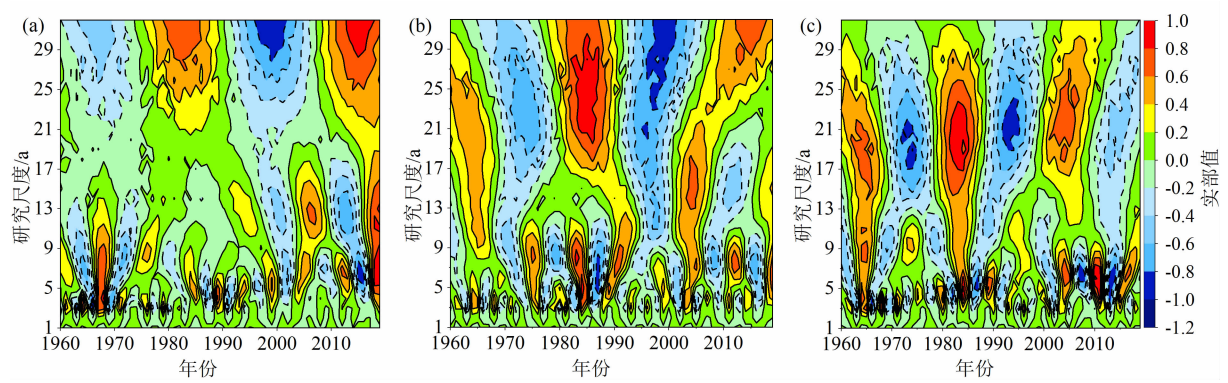


图 4 1960—2019 年降水小波系数实部等值线图:(a) I 区;(b) II 区;(c) III 区

Fig. 4 Wavelet coefficient real part contour of annual precipitation from 1960 to 2019: (a) the area I ; (b) the area II ; (c) the area III

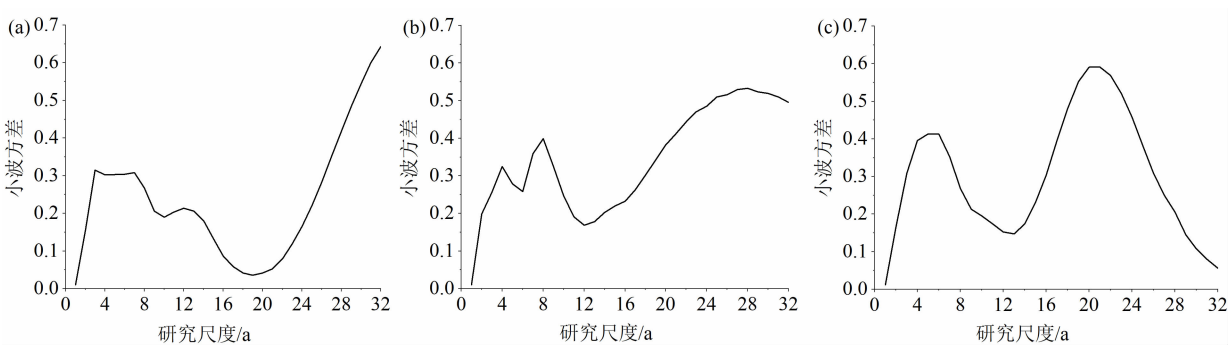


图 5 1960—2019 年降水小波方差图:(a) I 区;(b) II 区;(c) III 区

Fig. 5 Wavelet variance of annual precipitation from 1960 to 2019: (a) the area I ; (b) the area II ; (c) the area III

表 2 三区季节降水、气温和径流变化特征

Tab. 2 Variation character of seasonal precipitation, temperature, and runoff in the three regions

地区	季节	降水				气温				径流			
		突变点	时段	均值/ mm	变化速率/ (mm/10a)	突变点	时段	均值/ ℃	变化速率/ (℃/10a)	突变点	时段	均值/ 10 ⁸ m ³	β / (10 ⁸ (m ³ /a))
I 区	春	1960—2019 年	99.77	3.78 **	1996 年	1960—1996 年	3.65	-0.11	1966 年	1956—1966 年	46.60	0.98	
						1997—2019 年	4.57	0.40		1967—2019 年	65.06	0.19 *	
						1960—2019 年	4.00	0.23 **		1956—2019 年	61.89	0.38 **	
	夏	1960—2019 年	270.93	2.45	1996 年	1960—1996 年	12.41	0.05	1986 年	1956—1986 年	129.07	-0.32	
						1997—2019 年	13.45	0.37		1987—2019 年	94.95	0.63	
						1960—2019 年	12.81	0.28 **		1956—2019 年	111.48	-0.71 **	
	秋	1960—2019 年	113.98	0.83	1997 年	1960—1997 年	2.75	0.11	1974、1985 年	1956—1974 年	107.79	-0.45	
						1998—2019 年	3.83	0.31		1975—1985 年	122.75	-1.50	
						1960—2019 年	3.15	0.30 **		1986—2019 年	81.12	0.93 **	
	冬	1986 年	1960—1986 年	7.80	0.66	1997 年	1960—1997 年	-8.57	0.33 *	1956—1970 年	30.10	1.05 *	
			1987—2018 年	11.06	-0.21		1998—2018 年	-7.13	0.31	1970 年	1971—2018 年	42.99	-0.08
			1960—2018 年	9.57	0.90 **		1960—2018 年	-8.06	0.43 **	1956—2018 年	39.92	0.20 **	

表 2(续)

地区	季节	降水				气温				径流			
		突变点	时段	均值/ mm	变化速率/ (mm/10a)	突变点	时段	均值/ ℃	变化速率/ (℃/10a)	突变点	时段	均值/ 10 ⁸ m ³	β / (10 ⁸ (m ³ /a))
Ⅱ区	春		1960—2019 年	113.79	-2.45	1996 年	1960—1996 年	9.86	-0.20	1994 年	1956—1994 年	8.82	-0.08
							1997—2019 年	11.23	0.30		1995—2019 年	3.53	0.19 **
							1960—2019 年	10.38	0.30 **		1956—2019 年	6.75	-0.09 **
	夏		1960—2019 年	263.09	5.86	1993 年	1960—1993 年	20.89	-0.48 **	1993 年	1956—1993 年	15.90	-0.15
							1994—2019 年	21.20	0.39 **		1994—2019 年	7.67	0.20
							1960—2019 年	21.06	0.07		1956—2019 年	12.56	-0.19 **
	秋	1985 年	1960—1985 年	183.18	-5.60	1986 年	1960—1986 年	9.27	-0.08	1987 年	1956—1987 年	20.10	-0.14
			1986—2019 年	147.21	13.73 *		1987—2019 年	9.99	0.22		1988—2019 年	10.41	0.11
			1960—2019 年	162.80	-6.04		1960—2019 年	9.67	0.21 **		1956—2019 年	15.25	-0.18 **
	冬	1986 年	1960—1986 年	14.29	0.06	1985 年	1960—1985 年	-3.02	0.23	1972 年	1956—1972 年	5.31	-0.05
			1987—2018 年	18.62	-0.50		1986—2018 年	-1.84	0.04		1973—2018 年	2.66	0.00
			1960—2018 年	16.64	1.12 *		1960—2018 年	-2.36	0.33 **		1956—2018 年	3.37	-0.04 **
Ⅲ区	春		1960—2019 年	145.13	-2.13	1998 年	1960—1998 年	13.17	-0.04	1976 年	1956—1976 年	5.77	-0.09
							1999—2019 年	14.67	0.51		1977—2019 年	3.06	0.01
							1960—2019 年	13.69	0.33 **		1956—2019 年	3.95	-0.05 **
	夏	2010 年	1960—2010 年	344.95	13.47	1975 年	1960—1975 年	24.72	-0.23	1990 年	1956—1990 年	11.58	-0.11
			2011—2019 年	288.69	87.53		1976—2019 年	24.18	0.26 **		1991—2019 年	5.00	-0.03
			1960—2019 年	336.51	0.21		1960—2019 年	24.33	-0.05		1956—2019 年	8.60	-0.12 **
	秋		1960—2019 年	185.49	-4.38	1997 年	1960—1997 年	13.01	0.01	1982 年	1956—1982 年	9.75	-0.15
							1998—2019 年	13.82	0.57		1983—2019 年	7.17	-0.07
							1960—2019 年	13.30	0.17 **		1956—2019 年	8.26	-0.09 **
	冬		1960—2018 年	27.48	0.32	1989 年	1960—1989 年	0.55	-0.02	1976 年	1956—1976 年	3.91	-0.07
							1990—2018 年	1.52	0.11		1977—2018 年	2.81	0.00
							1960—2018 年	1.03	0.25 **		1956—2018 年	3.18	-0.03 *

注：* 表示通过 95% 显著性水平检验；** 表示通过 99% 显著性水平检验。

表 3 三区季节降水、气温和径流周期变化特征

Tab. 3 Periodic variation of seasonal precipitation, temperature, and runoff in the three regions

地 区	季 节	降水			气温			径流		
		第一/a	第二/a	第三/a	第一/a	第二/a	第三/a	第一/a	第二/a	第三/a
Ⅰ 区	春	17	24	5	6	32		22	32	5
	夏	32	3、5	13	9	32	3	27	8	4
	秋	32	4	7	6	32	15	18	4	8
	冬	19	32	6	15	8	32	32	21	7
Ⅱ 区	春	27	4	7	32	5	18	26	7	
	夏	30	14	4	25、32	4	10	29	7	3
	秋	9	32	20	4	9	19	21	8	3
	冬	16	6		8	21	4、14	24	7	
Ⅲ 区	春	5	26		32	20	6	25	10	6
	夏	23	6	3	25	6		25	8	2
	秋	10	3		10	4	32	21	10	
	冬	15	4		20	4	8	22	9	4

注：第一、第二、第三分别对应第一、第二、第三主周期；定义大尺度为 20 ~ 32 a, 中尺度为 10 ~ 19 a, 小尺度为 0 ~ 9 a。

3.2 气温演变特征

3.2.1 年尺度

由气温年际变化特征(图 6)可见, I 区年气温以 $0.30\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的趋势显著上升($P < 0.01$), 在 1997 年发生突变, 突变后(1998—2019 年)气温均值增加 $1.12\text{ }^{\circ}\text{C}$, 并以 $0.30\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的趋势显著上升($P < 0.01$)。II 区和 III 区年气温以 $0.22\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的趋势显著上升($P < 0.01$), 均在 1993 年发生突变, 突变后(1994—2019 年)气温均值分别增加 $0.88\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。从年气温变化趋势的空间分布来看(图 3b), 三区气温都呈上升趋势, I 区气

温变化速率相对较大, 最大增温率为 $0.49\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。

II 区东部气温和 III 区西部气温增率相对较小, 为 $0 \sim 0.20\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。

小波分析结果显示(图 7 和图 8), 三区气温都存在三类尺度的周期变化特征, 主要集中在大尺度, 第一主周期分别为 32、20 和 20 a, 三区气温在中小尺度上也存在周期变化特征, 但振荡相对较弱。在 2019 年末, 三区气温都处于偏多状态。

3.2.2 季节尺度

由季节气温变化特征(表 2)及其变化趋势的空间分布(图 3g, h, i, j)可见, 三区大部分地区气温

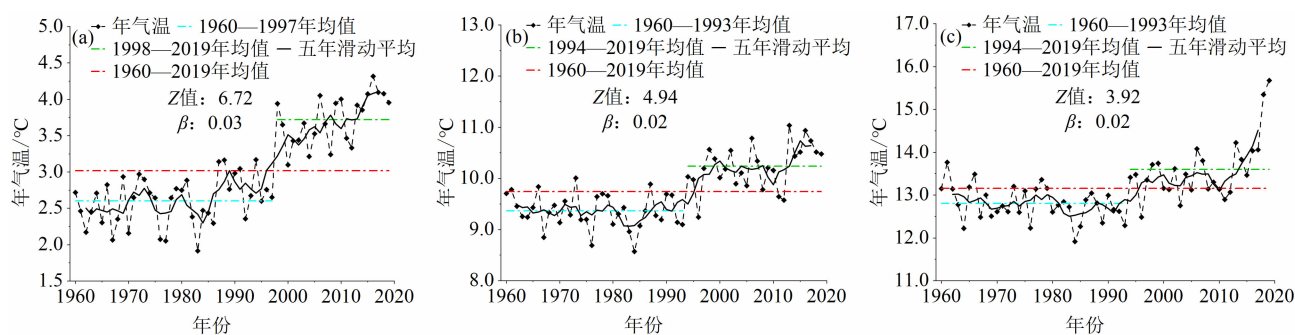


图 6 1960—2019 年气温年际变化特征: (a) I 区; (b) II 区; (c) III 区

Fig. 6 Inter-annual variation of annual mean temperatures from 1960 to 2019: (a) the area I; (b) the area II; (c) the area III

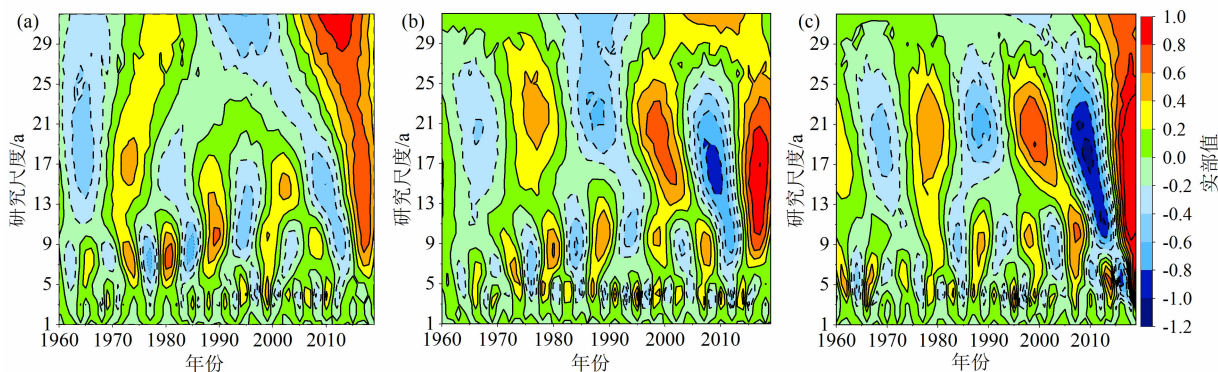


图 7 1960—2019 年气温小波系数实部等值线图: (a) I 区; (b) II 区; (c) III 区

Fig. 7 Wavelet coefficient real part contour of annual mean temperatures from 1960 to 2019: (a) the area I; (b) the area II; (c) the area III

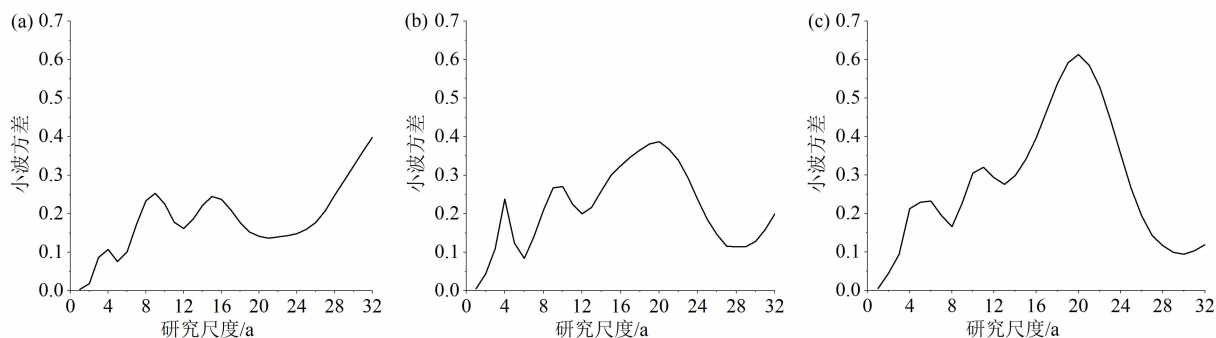


图 8 1960—2019 年气温小波方差图: (a) I 区; (b) II 区; (c) III 区

Fig. 8 Wavelet variance of annual mean temperatures from 1960 to 2019: (a) the area I; (b) the area II; (c) the area III

呈上升趋势,仅Ⅱ区和Ⅲ区夏季气温呈不显著波动($P>0.05$),分别在1993年和1975年发生突变,突变后以 $0.39\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.26\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的趋势显著上升($P<0.01$)。三区季节气温在2000年之后,升温速率增大,变暖趋势更加明显。

季节气温周期变化特征(表3)显示,Ⅰ区气温的周期变化特征以中小尺度为主,Ⅲ区气温的周期变化特征以大中尺度为主,Ⅱ区气温的周期变化中心在大尺度和小尺度上能量波动更强烈。

3.3 径流演变特征

3.3.1 年尺度

径流年际变化特征(图9)显示,三站径流量分

别以 $5.87 \times 10^7\text{ m}^3/\text{a}$ ($P>0.05$)、 $5.68 \times 10^7\text{ m}^3/\text{a}$ ($P<0.01$)和 $2.82 \times 10^7\text{ m}^3/\text{a}$ ($P<0.01$)的趋势减少,兰州站在2000年发生突变,突变后径流均值增加 $3.33 \times 10^9\text{ m}^3$;咸阳和黑石关站在1990年发生突变,突变后径流变化速率由负转正。三站径流在2000年之后有增加趋势,这主要和同期降水变化有关。

小波分析结果显示(图10和图11),三区年径流周期变化特征主要以大尺度为主。兰州站径流在1980年周期变化中心从15a左右上升到32a左右。咸阳和黑石关径流量出现多次丰枯交替,且在2019年末时,径流处于偏少状态。

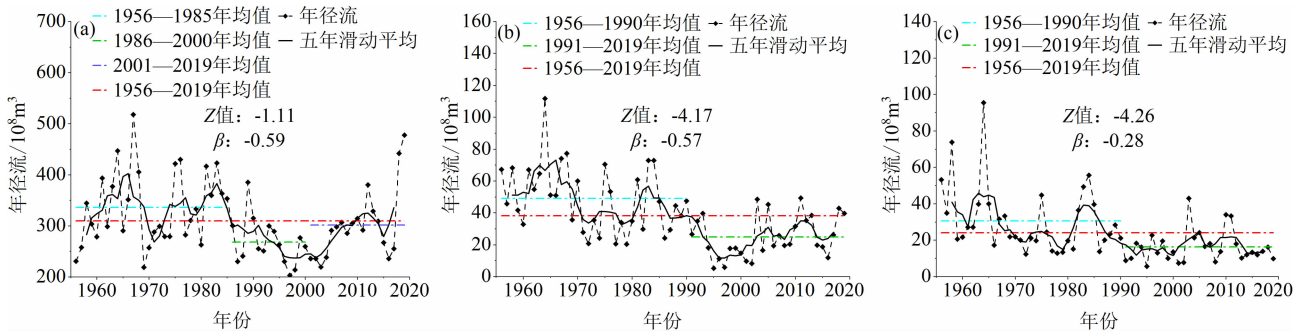


图9 1956—2019年径流量年际变化特征:(a)兰州站;(b)咸阳站;(c)黑石关站

Fig. 9 Inter-annual variation of annual runoff from 1956 to 2019: (a) Lanzhou station; (b) Xianyang station; (c) Heishiguan station

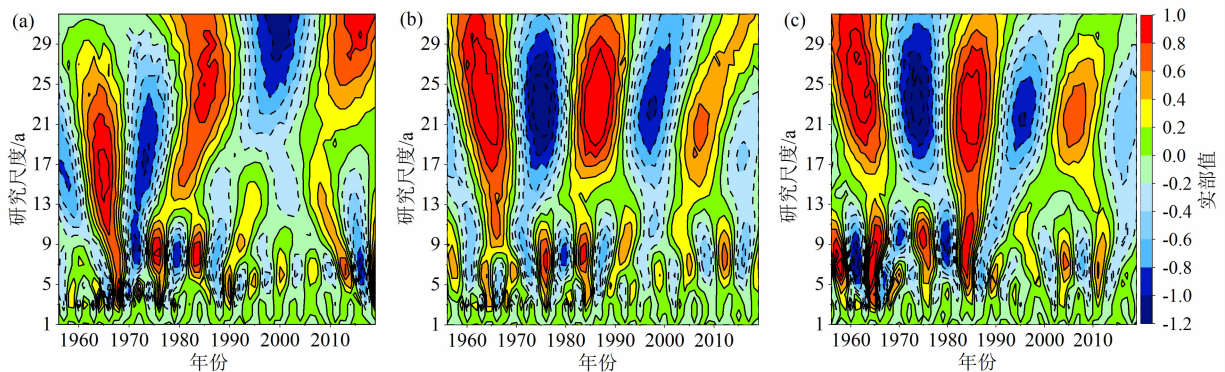


图10 1956—2019年径流小波系数实部等值线图:(a)兰州站;(b)咸阳站;(c)黑石关站

Fig. 10 Wavelet variance real part contour of annual runoff from 1956 to 2019: (a) Lanzhou station; (b) Xianyang station; (c) Heishiguan station

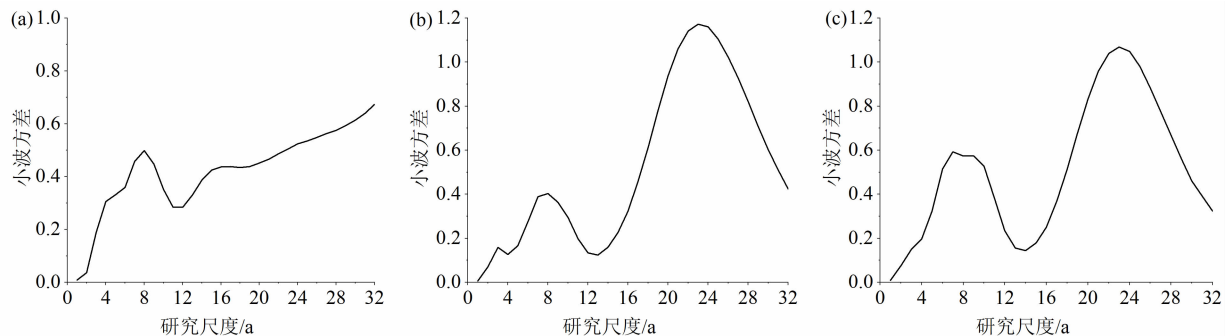


图11 1956—2019年径流小波方差图:(a)兰州站;(b)咸阳站;(c)黑石关站

Fig. 11 Wavelet analysis of annual runoff from 1956 to 2019: (a) Lanzhou station; (b) Xianyang station; (c) Heishiguan station

3.3.2 季节尺度

四季径流变化特征(表 2)显示,兰州站春冬季径流呈显著增加($P < 0.01$),兰州站夏秋季径流、咸阳和黑石关站的四季径流都呈显著减少趋势($P < 0.01$)。三站径流的突变点主要分布在 1980—2000 年内。兰州站夏季径流,黑石关春冬季径流和咸阳站四季径流在突变后径流变化速率由负转正,这进一步说明在进入 2000 年之后三区径流量出现回升。

由季节径流变化特征(表 3)可见,三站四季径流周期变化特征与年径流周期变化特征基本一致,多数季节的周期变化特征在大尺度上振荡最明显,仅兰州站秋季径流在中尺度上能量波动更大。

4 水源涵养量变化特征及其影响因素

4.1 水源涵养量时空变化特征

统计降水、气温和径流发生突变的年份,发现突变点主要集中在 1980—2000 年,据此将长序列分为三个时段:1960—1979 年(简称时段 1)、1980—2000 年(简称时段 2)和 2001—2019 年(简称时段 3),进一步分析水源涵养量的年际变化特征。

由水源涵养量年际变化特征(图 12)可见,三

区多年平均水源涵养量分别为 $8.77 \times 10^9 \text{ m}^3$ 、 $1.73 \times 10^9 \text{ m}^3$ 和 $7.91 \times 10^8 \text{ m}^3$,占同期多年平均径流量的 0.28、0.40 和 0.35。三区水源涵养量都呈下降趋势,其中Ⅱ区水源涵养量下降趋势最明显,通过了 99% 水平的显著性检验。三区多年平均水源涵养量在时段 1 内最大,其次为时段 3,这说明三区水源涵养量经历由减少到增加的阶段。

水源涵养量空间分布特征(图 13)显示,Ⅲ区单位面积水源涵养量最大,为 43.65 mm/km^2 ,Ⅰ区和Ⅱ区单位面积水源涵养量分别为 39.48 mm/km^2 和 33.78 mm/km^2 。就整个研究区而言,低纬度单位面积水源涵养量高于高纬度地区,东部地区高于西部地区。统计三区单位面积水源涵养量在不同等级中占比情况(表 4),结果表明:三区单位面积水源涵养量主要集中在前三个等级,分别占该区面积的 91.10%、95.98% 和 89.42%。在 9 个等级中,Ⅰ区单位面积水源涵养量在第一个等级占比最大,为 39.42%,Ⅱ区和Ⅲ区单位面积水源涵养量在第二个等级占比最大,分别为 43.46% 和 56.85%。

4.2 降水、气温和径流对水源涵养量的影响

利用 Pearson 相关性分析方法,计算水源涵养量同降水、气温和径流的相关系数(表 5),结果表明:水源涵养量和降水、径流呈显著正相关

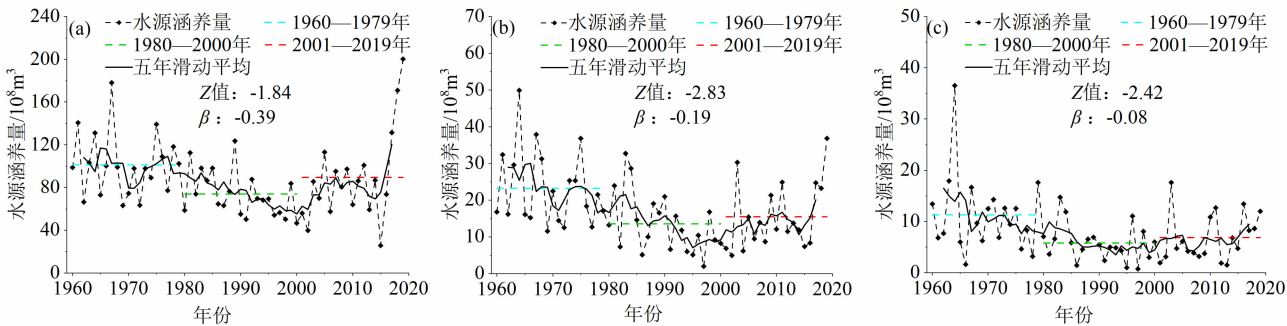


图 12 1960—2019 年水源涵养量年际变化特征:(a)Ⅰ区;(b)Ⅱ区;(c)Ⅲ区

Fig. 12 Inter-annual variation of annual water conservation from 1960 to 2019: (a) the area I; (b) the area II; (c) the area III

表 4 三区单位面积水源涵养量在不同等级下占比

Tab.4 The percentage of water conservation per unit area in the three regions under different grades (单位:%)

地区	单位面积水源涵养量等级								
	0 ~ 25	25 ~ 50	50 ~ 75	75 ~ 100	100 ~ 125	125 ~ 150	150 ~ 200	200 ~ 300	300
Ⅰ区	39.42	32.14	19.54	5.52	1.45	0.68	0.61	0.54	0.10
Ⅱ区	41.05	43.46	11.47	2.99	0.71	0.22	0.09	0.01	0.00
Ⅲ区	13.42	56.85	19.15	7.44	2.44	0.55	0.12	0.02	0.00

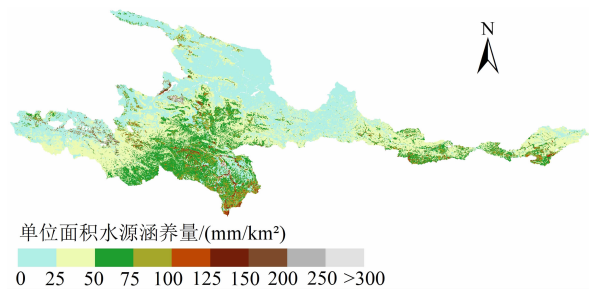


图 13 三区多年平均水源涵养量空间分布特征
Fig. 13 Spatial distribution characteristics of annual average water conservation in the three regions

($P < 0.01$), 与气温呈负相关, 其中 II 区水源涵养量和气温呈显著负相关关系 ($P < 0.01$)。同一要素与水源涵养量的相关系数存在差异, 这可能是因下垫面条件差异引起的。

表 5 三区水源涵养量与年降水、气温和径流的相关关系
Tab. 5 The correlation between water conservation and annual precipitation, temperature, and runoff in the three regions

地区	降水	气温	径流
I 区	0.81 **	-0.08	0.76 **
II 区	0.80 **	-0.34 **	0.83 **
III 区	0.75 **	-0.21	0.73 **

注: ** 在 0.01 水平, 相关性显著; * 在 0.05 水平, 相关性显著。

统计各要素在 3 个时段内的均值 (表 6), 结果表明: 降水和水源涵养量变化趋势基本一致, 呈先减少后增加的趋势; 气温基本在 3 个时段内持续升高。I 区径流在 2000 年后出现微弱增加, II 区和 III 区径流则不断减少, 但相比于时段 2, 时段 3 内径流变幅减小。综合相关性分析和要素年代际变化特征, 可以判断出降水很可能是影响水源涵养量的关键要素。

5 讨论

5.1 降水、气温和径流演变特征及其成因

研究表明, 1960—2019 年, I 区年降水不显著增加 ($P > 0.05$), 温度显著上升 ($P < 0.01$), 径流不显著减少 ($P > 0.05$), 这与已有的研究结论相同^[33-34]; II 区和 III 区降水不显著减少 ($P > 0.05$), 气温显著上升 ($P < 0.01$), 径流显著减少 ($P <$

0.01), 这与已有在渭河流域^[35-36]和伊洛河流域^[37]开展的研究结论相似, 但变化速率存在差异, 主要是因为选取的数据序列不一致。

表 6 各要素年代际均值变化特征
Tab. 6 The interdecadal variation of each factor

地区	时段	降水/ mm	径流/ 10^8 m^3	气温/ $^{\circ}\text{C}$	水源涵养量/ 10^8 m^3
I 区	时段 1	487.91	337.95	2.53	101.13
	时段 2	480.95	294.87	2.82	73.67
	时段 3	515.36	300.93	3.75	89.16
II 区	时段 1	557.91	49.31	9.42	23.17
	时段 2	542.62	33.05	9.53	13.53
	时段 3	569.10	27.72	10.30	15.37
III 区	时段 1	700.65	27.97	12.92	11.22
	时段 2	690.50	21.94	12.86	5.77
	时段 3	692.22	17.53	13.69	6.80

I 区主要受东亚季风、南亚季风和西风环流的共同影响^[38], 但近年来季风和环流异常, 东亚季风和西风环流协同增加, 带来大量水汽, 同时积雪和冰川冻土融化, 使得该区变得更“湿”。降水是影响径流的关键因素, 同径流呈正相关关系, 但 I 区径流变化趋势并未同降水一致, 仅在 2000 年后出现波动上升^[39]。这是因为径流虽主要受降水条件^[40]的控制, 但还受其他要素的影响。降水增多使径流增加, 但同时气温升高, 蒸散发增强削减径流, 在该区开展的生态修复工程、跨区调水工程^[41]等改变了径流的年内和年际变化特征。II 区处于半干旱和半湿润过渡地带, 呈暖干化趋势。近年来, 因大气环流异常, 北风活动增强, 削减了来自东南方向的水汽^[42], II 区还受到南方涛动等大气环流因素的影响, 导致该地区降水不断减少, 同时极端降水的强度不断增大, 极端降水事件发生的频率增强^[43-44]。II 区降水减少和气温升高是径流减少的重要原因, 再加上水土保持措施的影响, 改变了下垫面条件, 影响径流的年际和年内分配过程。III 区呈暖干化趋势, 径流呈显著下降趋势 ($P < 0.01$)。相比 1980—2000 年, 2000—2019 年降水均值增加 0.25%, 气温增加 6.45%, 径流减少 20.10%。降水微弱增加, 气温大幅上升是引起径流衰减的重要原因。同时伊洛河流

域内修建了大量的淤地坝、梯田^[37],再加上退耕还林还草工程的影响,改变了流域下垫面特征,影响径流的产汇流过程,从而使该区径流呈现复杂的变化特征^[45]。

5.2 水源涵养量时空变化特征及其影响因素

1960—2019 年,Ⅰ区多年平均水源涵养量最大,为 $8.77 \times 10^9 \text{ m}^3$,Ⅲ区单位面积水源涵养量最大,为 43.65 mm/km^2 。三区年水源涵养量变差系数分别为 0.38、0.57 和 0.74,属中等变异。

水源涵养量和降水的相关系数($P < 0.01$)最大,两者的变化趋势基本一致,水源涵养量同气温呈负相关关系($P > 0.05$),这与已有的研究结果相一致^[24, 46],但部分学者认为水源涵养量同气温呈正相关^[11],这可能是因研究区不同,驱动要素对水源涵养量的影响存在差异造成的。降水减少和气温升高是Ⅱ区和Ⅲ区年水源涵养量减少的重要原因,Ⅰ区降水增加,但水源涵养量不显著减少($P > 0.05$),这说明水源涵养量还受其他因素的影响。

造成三区水源涵养量时空分布差异的原因除水文气象条件外,下垫面条件也可能是一项重要影响因素。三区土壤类型、海拔、植被结构等都存在较大差异。Ⅰ区以毡土、钙土为主,Ⅱ区以黄绵土、黑麻土为主,Ⅲ区主要以褐土、棕壤土、冲积土为主。Ⅰ区到Ⅲ区,海拔逐渐降低,土壤饱和导水率逐渐增大。其次,Ⅰ区以草地和森林为主,Ⅱ区以旱田和草地为主,Ⅲ区以旱田和森林为主。林草地等植被层截流部分降水,凋落物吸收水分,减缓地表径流,增大土壤层水分含量,从而涵养更多水源。Ⅰ区和Ⅱ区的植被类型存在较大差异,这可能是造成Ⅱ区降水较Ⅰ区丰沛,但单位面积水源涵养量却较小的主要原因。通过上述分析,下垫面也会影响水源涵养量,应进行深入研究,厘清其影响机制。

5.3 研究不足及展望

水循环要素和水源涵养量的变化特征是基于对水文气象站点数据分析所得,但文中站点密度较大,平均每个站点覆盖约 9423 km^2 ,仅达到世界气象组织对干旱区站网密度布设标准^[47]。在今后研究中,应结合高精度的卫星遥感数据,更加科学地认识该区降水、气温和水源涵养量的变化情况。论文中分析了水文气象要素对水源涵养量的影响,但尚未考虑地形、土壤质地等下垫面因素。后续研究应重点考虑植被类型、土壤类型等因素对水源涵养量的影

响,深入分析水源涵养量驱动机制,识别关键影响因素,构建流域水源涵养调控框架,为流域水源涵养功能提升提供支撑。

6 结论

本文以黄河水源涵养区为研究对象,分析了降水、气温和径流的演变特征,并对水源涵养量时空分布特征及其影响因素开展研究,主要结论如下。

(1)水循环要素趋势性结果表明:兰州以上地区年降水以 8.06 mm/10a 的趋势增加,春季增速最快;渭河南山支流和伊洛河流域年降水分别以 0.15 mm/10a 和 2.62 mm/10a 的趋势不显著减少($P > 0.05$),春秋降水呈减少趋势,夏冬季降水呈不显著增加趋势。三区年气温以 $0.30 \text{ }^\circ\text{C/10a}$ 、 $0.22 \text{ }^\circ\text{C/10a}$ 、 $0.18 \text{ }^\circ\text{C/10a}$ 的趋势显著上升($P < 0.01$),四季气温基本都呈上升趋势。三区年径流分别以 $5.87 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$ 、 $5.68 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$ 、 $2.82 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$ 的趋势减少,年内变差系数增大,将对黄河流域未来水资源安全提出更大的挑战。

(2)水循环要素周期性结果表明:三区降水、气温和径流存在多种尺度的周期变化特征。年尺度,降水、气温和径流的周期变化特征在大尺度上能量波动更明显;季节尺度,降水、气温和径流的周期变化特征在大、中、小尺度上都有分布。

(3)水源涵养量分析结果表明:兰州以上地区水源涵养总量最大,伊洛河流域最小,但伊洛河流域单位面积水源涵养量最大。三区年水源涵养量均呈减少趋势。

(4)水文气象要素和下垫面分布差异是影响水源涵养量时空分布的重要因素。对于黄河水源涵养区,降水、径流减少和气温升高是导致水源涵养量减少的最主要原因,为提升区域水源涵养功能,可以采用优化植被结构等方式,避免草地退化和湿地萎缩。

参考文献(References)

- [1] 王云飞,叶爱中,乔飞,等. 水源涵养内涵及估算方法综述[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(6): 1041 - 1071. [WANG Yunfei, YE Aizhong, QIAO Fei, et al. Review on connotation and estimation method of water conservation [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2021, 19(6): 1041 - 1071] DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtq.2021.0109
- [2] 左其亭,王骄阳,杨峰,等. 水源涵养相关概念辨析及水源涵

- 养能力计算方法[J]. 水利水电科技进展, 2022, **42**(2): 13 – 19. [ZUO Qiting, WANG Jiaoyang, YANG Feng, et al. Concept analysis of water conservation and calculation methods of water conservation capacity [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, **42**(2): 13 – 19] DOI: 10.3880/j. issn. 1006 – 7647. 2022. 02. 003
- [3] 肖寒, 欧阳志云, 赵景柱, 等. 森林生态系统服务功能及其生态经济价值评估初探——以海南岛尖峰岭热带森林为例[J]. 应用生态学报, 2000, **11**(4): 481 – 484. [XIAO Han, OUYANG Zhiyun, ZHAO Jingzhu, et al. Forest ecosystem services and their ecological valuation: A case study of tropical forest in Jianfengling of Hainan island [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, **11**(4): 481 – 484] DOI: 10.13287/j. 1001 – 9332. 2000. 0119
- [4] 张彪, 李文华, 谢高地, 等. 森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法[J]. 生态学杂志, 2009, **28**(3): 529 – 534. [ZHANG Biao, LI Wenhua, XIE Gaodi, et al. Water conservation function and its measurement methods of forest ecosystem [J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, **28**(3): 529 – 534] DOI: 10.13292/j. 1000 – 4890. 2009. 0089
- [5] 吴波, 石培礼, 井学辉, 等. 大兴安岭东部林区植被蓄水潜力与价值的评估[J]. 林业科学研究, 2006, **19**(6): 706 – 712. [WU Bo, SHI Peili, JING Xuehui, et al. Water conservation capacity and its value evaluation of vegetation types in Eastern Daxing'anling Mountain forest area [J]. Forest Research, 2006, **19**(6): 706 – 712] DOI: 10.3321/j. issn: 1001 – 1498. 2006. 06. 006
- [6] 林峰, 陈兴伟, 姚文艺, 等. 基于 SWAT 模型的森林分布不连续流域水源涵养量多时间尺度分析[J]. 地理学报, 2020, **75**(5): 1065 – 1078. [LIN Feng, CHEN Xingwei, YAO Wenyi, et al. Multi-time scale analysis of water conservation in a discontinuous forest watershed based on SWAT model [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, **75**(5): 1065 – 1078] DOI: 10.11821/dlxb202005013
- [7] 尹云鹤, 吴绍洪, 赵东升, 等. 过去 30 年气候变化对黄河源区水源涵养量的影响[J]. 地理研究, 2016, **35**(1): 49 – 57. [YIN Yunhe, WU Shaohong, ZHAO Dongsheng, et al. Ecosystem water conservation changes in response to climate change in the source region of the Yellow River from 1981 to 2010 [J]. Geographical Research, 2016, **35**(1): 49 – 57] DOI: 10.11821/dlyj201601005
- [8] 王晓学, 李叙勇, 莫菲, 等. 基于元胞自动机的森林水源涵养量模型新方法——概念与理论框架[J]. 生态学报, 2010, **30**(20): 5491 – 5500. [WANG Xiaoxue, LI Xuyong, MO Fei, et al. Exploration of a new modeling method for forest water conservation based on cellular automata: Concept and theoretical framework [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, **30**(20): 5491 – 5500]
- [9] 黄菁, 范继辉, 何晓蓉. 基于 InVEST 模型的张家口地区水源涵养功能研究[J]. 山地学报, 2021, **39**(3): 327 – 337. [HUANG Jing, FAN Jihui, HE Xiaorong. InVEST-model based evaluation of water conservation function in Zhangjiakou area, China [J]. Mountain Research, 2021, **39**(3): 327 – 337] DOI: 10.16089/j. cnki. 1008 – 2786. 000599
- [10] 张成虎, 刘菊, 胡宝清, 等. 广西西江流域水源涵养服务空间格局及其影响因素[J]. 浙江农林大学学报, 2022, **39**(5): 1104 – 1113. [ZHANG Chenghu, LIU Ju, HU Baoqing, et al. Spatial pattern and its influencing factors of water conservation services in Xijiang River Basin, Guangxi [J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2022, **39**(5): 1104 – 1113] DOI: 10.11833/j. issn. 2095 – 0756. 20210616
- [11] 龚诗涵, 肖洋, 郑华, 等. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2017, **37**(7): 2455 – 2462. [GONG Shihan, XIAO Yang, ZHENG Hua, et al. Spatial patterns of ecosystem water conservation in China and its impact factors analysis [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37**(7): 2455 – 2462] DOI: 10.5846/stxb201512012406
- [12] 王国庆. 黄河流域水源涵养区界定[J]. 水文, 2022, **42**(2): 65. [WANG Guoqing. Definition of water source conservation area in the Yellow River basin [J]. Journal of China Hydrology, 2022, **42**(2): 65] DOI: 10.3969/j. issn. 1000 – 0852. 2022. 2. sw202202012
- [13] 金双彦, 高源, 张萍, 等. 黄河干流兰州断面不同时期径流指标变化及成因分析[J]. 人民黄河, 2022, **44**(7): 14 – 17. [JIN Shuangyan, GAO Yuan, ZHANG Ping, et al. Analysis of runoff indicator variation and influencing factor in Lanzhou section of the Yellow River [J]. Yellow River, 2022, **44**(7): 14 – 17] DOI: 10.3969/j. issn. 1000 – 1379. 2022. 07. 003
- [14] 张永民. 基于地形坡面的土地覆被变化强度分析——以伊洛河流域为例[J]. 资源开发与市场, 2021, **37**(11): 1316 – 1322. [ZHANG Yongmin. Intensity analysis of land cover change in slope units—a case study of Yiluo River watershed [J]. Resource Development and Market, 2021, **37**(11): 1316 – 1322] DOI: 10.3969/j. issn. 1005 – 8141. 2021. 11. 006
- [15] SHANGGUAN Wei, DAI Yongjiu, LIU Baoyuan, et al. A China dataset of soil properties for land surface modeling [J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2013, **5**(2): 212 – 224. DOI: 10.1002/jame.20026
- [16] 徐东坡, 李金明, 周祖昊, 等. 1956—2018 年中国降水特征的时空分布规律研究[J]. 水利水电技术, 2020, **51**(10): 20 – 27. [XU Dongpo, LI Jinming, ZHOU Zuhao, et al. Study on the spatial and temporal distribution of precipitation characteristics in China from 1956 to 2018 [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, **51**(10): 20 – 27] DOI: 10.13928/j. cnki. wrahe. 2020. 10. 003
- [17] PETTITT A N. A non-parametric approach to the change-point problem [J]. Journal of the Royal Statistical Society Series C—Applied Statistics, 1979, **28**(2): 126 – 135. DOI: 10.2307/

2346729

- [18] 王乐, 刘德地, 李天元, 等. 基于多变量 M-K 检验的北江流域降水趋势分析[J]. 水文, 2015, **35**(4): 85–90. [WANG Le, LIU Dedi, LI Tianyuan, et al. Trend analysis of precipitation in Beijiang river basin based on multivariate Mann-Kendall test [J]. Journal of China Hydrology, 2015, **35**(4): 85–90] DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2015.04.015
- [19] 牛存稳, 张利平, 夏军. 华北地区降水量的小波分析[J]. 干旱区地理, 2004, **27**(1): 66–70. [NIU Cunwen, ZHANG Liping, XIA Jun. Wavelet analysis on the precipitation in north China [J]. Arid Land Geography, 2004, **27**(1): 66–70] DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2004.01.013
- [20] 王文圣, 金菊良, 丁晶. 随机水文学(第三版)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016: 144–145. [WANG Wensheng, JIN Juliang, DING Jing. Random hydrology (third edition) [M]. Beijing: China Water and Power Press, 2016: 144–145]
- [21] 王立康. 南水北调中线水源区水文要素演变特征研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2018: 4–28. [WANG Likang. Study on evolution characteristics of hydrological factors in water source area of the middle route South to North Water Transfer project [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2018: 4–28] DOI: 10.7666/d.D01533849
- [22] 卓静, 何慧娟, 邹继业. 近 15 a 秦岭林区水源涵养量变化特征[J]. 干旱区研究, 2017, **34**(3): 604–612. [ZHUO Jing, HE Huijuan, ZOU Jiye. Spatiotemporal variation of water conservation capacity in the Qinling Mountain in recent 15 years [J]. Arid Zone Research, 2017, **34**(3): 604–612] DOI: 10.13866/j.azr.2017.03.17
- [23] 蒋桂芹, 毕黎明, 贺逸清. 若尔盖湿地水源涵养时空变化及影响因素[J]. 科学技术与工程, 2021, **21**(29): 12688–12694. [JIANG Guiqin, BI Liming, HE Yiqing. Spatiotemporal variation of water conservation and its influencing factors in Zoige wetland [J]. Science Technology and Engineering, 2021, **21**(29): 12688–12694] DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2021.29.044
- [24] 薛健, 李宗省, 冯起, 等. 1980—2017 年祁连山水源涵养量时空变化特征[J]. 冰川冻土, 2022, **44**(1): 1–13. [XUE Jian, LI Zongxing, FENG Qi, et al. Spatiotemporal variation characteristics of water conservation amount in the Qilian Mountains from 1980 to 2017 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, **44**(1): 1–13] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0016
- [25] WANG Yunfei, YE Aizhong, PENG Dingzhi, et al. Spatiotemporal variations in water conservation function of the Tibetan Plateau under climate change based on InVEST model [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022, **41**: 101064. DOI: 10.1016/j.ejrh.2022.101064
- [26] SHARP R, TALLIS H T, RICKETTS T, et al. InVEST 3.2.0 user's guide [M]. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy and World Wildlife Fund, 2015: 123–144.
- [27] 李莹莹, 马晓双, 祁国华, 等. 基于参数本地化 InVEST 模型的安徽省水源涵养功能研究[J]. 长江流域资源与环境, 2022, **31**(2): 313–325. [LI Yingying, MA Xiaoshuang, QI Guohua, et al. Studies on water retention function of Anhui province based on InVEST model of parameter localization [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, **31**(2): 313–325] DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202202006
- [28] ZHANG L, DAWES W R, WALKER G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale [J]. Water Resource Research, 2001, **37**(3): 701–708. DOI: 10.1029/2000WR900325
- [29] JIA Guanyu, HU Wenmin, ZHANG Bin. Assessing impacts of the Ecological Retreat project on water conservation in the Yellow River basin [J]. Science of the Total Environment, 2022, **828**: 154483. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.154483
- [30] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 基于 InVEST 模型的黄河流域产水量时空变化及其对降水和土地利用变化的响应[J]. 应用生态学报, 2020, **31**(8): 2731–2739. [YANG Jie, XIE Baopeng, ZHANG Degang. Spatio-temporal variation of water yield and its response to precipitation and land use change in the Yellow River basin based on InVEST model [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, **31**(8): 2731–2739] DOI: 10.13287/j.1001-9332.202008.015
- [31] 涂安国, 莫明浩, 李英, 等. 2000—2014 年江西东江源区水源涵养量时空变化[J]. 山地学报, 2022, **40**(5): 694–703. [TU Anguo, MO Minghao, LI Ying, et al. Spatio-temporal variation of water conservation in the source area of the Dongjiang River in Jiangxi province from 2000 to 2014 [J]. Mountain Research, 2022, **40**(5): 694–703] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000704
- [32] 中华人民共和国水利部水文局. 中华人民共和国水文年鉴——黄河流域水文资料[M]. 北京: 水利部水文局, 1956—2019. [Hydrology Bureau of the Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Hydrological yearbook of the People's Republic of China: Hydrological data of the Yellow River basin [M]. Beijing: Hydrology Bureau of Water Resources Ministry, 1956—2019]
- [33] 叶培龙, 张强, 王莺, 等. 1980—2018 年黄河上游气候变化及其对生态植被和径流量的影响[J]. 大气科学学报, 2020, **43**(6): 967–979. [YE Peilong, ZHANG Qiang, WANG Ying, et al. Climate change in the upper Yellow River basin and its impact on ecological vegetation and runoff from 1980 to 2018 [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2020, **43**(6): 967–979] DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20200924001
- [34] 成艺, 武兰珍, 刘峰贵, 等. 黄河上游近 60 a 径流量与降水量变化特征研究[J]. 干旱区地理, 2022, **45**(4): 1022–1031. [CHENG Yi, WU Lanzhen, LIU Fenggui, et al. Changes of runoff and precipitation in the upstream of Yellow River during the

- past 60 years [J]. *Arid Land Geography*, 2022, **45**(4): 1022 – 1031 DOI: 10.12118/j.issn.1000-6060.2021.452
- [35] 冯建栋, 刘赛艳, 解阳阳, 等. 渭河流域降水年内分配不均匀性时空变化研究[J]. *水文*, 2022, **42**(2): 85 – 90. [FENG Jiandong, LIU Saiyan, XIE Yangyang, et al. Spatio-temporal variations of inhomogeneous distribution of precipitation in the Weihe River basin [J]. *Journal of China Hydrology*, 2022, **42**(2): 85 – 90] DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20210135
- [36] 刘俊萍, 周俊杰, 邹先柏. 渭河流域宝鸡段气温及降水突变分析[J]. *浙江工业大学学报*, 2018, **46**(4): 423 – 428 + 472. [LIU Junping, ZHOU Junjie, ZOU Xianbai. Mutation analysis of temperature and precipitation of Weihe River basin in Baoji section [J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2018, **46**(4): 423 – 428 + 472] DOI: 10.3969/j.issn.1006-4303.2018.04.012
- [37] 倪用鑫, 余钟波, 吕锡芝, 等. 近 50 年伊洛河流域径流演变归因分析[J]. *水利水运工程学报*, 2022, **44**(1): 59 – 66. [NI Yongxin, YU Zhongbo, LYU Xizhi, et al. Analysis on attribution of runoff evolution in Yiluo River basin in the past 50 years [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2022, **44**(1): 59 – 66] DOI: 10.12170/20211026001
- [38] 杨金虎, 张强, 杨博成, 等. 黄河上游暖湿化的多时间尺度特征及对生态植被的影响[J]. *高原气象*, 2022: 1 – 13. [YANG Jinhu, ZHANG Qiang, YANG Bocheng, et al. The multi-time scale characteristics and impacts on ecological vegetation of warming and humidification in the upper Yellow River [J]. *Plateau Meteorology*, 2022: 1 – 13] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2022.00087
- [39] 蓝永超, 刘根生, 喇承芳, 等. 近 55 年来黄河河源区径流的变化及区域差异[J]. *山地学报*, 2017, **35**(3): 257 – 265. [LAN Yongchao, LIU Gensheng, LA Chengfang, et al. Study on the characteristics and trend of runoff change in the source region of the Yellow River and its regional difference [J]. *Mountain Research*, 2017, **35**(3): 257 – 265] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000220
- [40] 杨志峰, 李春晖. 黄河流域天然径流量突变性与周期性特征[J]. *山地学报*, 2004, **22**(2): 140 – 146. [YANG Zhifeng, LI Chunhui. Abrupt and periodic changes of the annual natural runoff in the subregions of the Yellow River [J]. *Mountain Research*, 2004, **22**(2): 140 – 146] DOI: 10.3969/j.issn.1008-2786.2004.02.002
- [41] 王学良, 李洪源, 陈仁升, 等. 变化环境下 1956—2020 年黄河兰州站以上干支流径流演变特征及驱动因素研究[J]. *地球科学进展*, 2022, **37**(7): 726 – 741. [WANG Xueliang, LI Hongyuan, CHEN Rensheng, et al. Runoff evolution characteristics and driving factors of Yellow River above Lanzhou station from 1956 to 2020 under changing environment [J]. *Advances in Earth Science*, 2022, **37**(7): 726 – 741] DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2022.027
- [42] 董晴晴, 王会肖. 60 年来渭河关中地区气温与降水变化及其原因[J]. *南水北调与水利科技*, 2016, **14**(6): 33 – 38 + 49. [DONG Qingqing, WANG Huixiao. Variation and reason analysis of temperature and precipitation of Weihe River in Guanzhong area in the last 60 years [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016, **14**(6): 33 – 38 + 49] DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2016.06.006
- [43] 邹磊, 余江游, 王飞宇, 等. 渭河流域极端降水时空演变规律及其对大气环流因子的响应[J]. *干旱区研究*, 2021, **38**(3): 764 – 774. [ZOU Lei, YU Jiangyou, WANG Feiyu. Spatial-temporal variations of extreme precipitation indices and their response to atmospheric circulation factors in the Weihe River basin [J]. *Arid Zone Research*, 2021, **38**(3): 764 – 774] DOI: 10.13866/j.azr.2021.03.18
- [44] 周旗, 张海宁, 任源鑫. 1961—2016 年渭河流域极端降水事件研究[J]. *地理科学*, 2020, **40**(5): 833 – 841. [ZHOU Qi, ZHANG Haining, REN Yuanxin. Extreme precipitation events in the Weihe River basin from 1961 to 2016 [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, **40**(5): 833 – 841] DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2020.05.018
- [45] 贺瑞敏, 王国庆, 张建云. 环境变化对黄河中游伊洛河流域径流量的影响[J]. *水土保持研究*, 2007, **14**(2): 297 – 298 + 301. [HE Ruimin, WANG Guoqing, ZHANG Jianyun. Impacts of environmental change on runoff in the Yiluohe River basin of the middle Yellow River [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, **14**(2): 297 – 298 + 301] DOI: 10.3969/j.issn.1005-3409.2007.02.097
- [46] 王冶, 薛忠财, 王琳, 等. 承德市武烈河流域水源涵养功能的时空特征[J]. *草业科学*, 2021, **38**(6): 1047 – 1059. [WANG Ye, XUE Zhongcai, WANG Lin, et al. Analysis of the spatio-temporal characteristics of the water retention function of the Wulie River basin in Chengde city [J]. *Pratacultural Science*, 2021, **38**(6): 1047 – 1059] DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0059
- [47] 何惠. 中国水文站网[J]. *水科学进展*, 2010, **21**(4): 460 – 465. [HE Hui. China gauging station network [J]. *Advances in Water Science*, 2010, **21**(4): 460 – 465] DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2010.04.004

Precipitation, Temperature and Runoff for the Recent 60 Years in the Yellow River Water Conservation Area of China and Their Influence on Water Conservation

SUI Yaobing, NIU Cunwen^{*}, JIA Yangwen, YAN Xiang, WANG Dongdong

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,
China Institute of Water Resource and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Water conservation function (WCF) is an essential component of ecosystem services. Determination of the tempo-spatial fluctuation of WCF associated with governing factors is a prerequisite for guiding an efficient use of water resources and formulate a water security policy. Past research progress on WCF mostly referred to the construction of quantitative correlation between water conservation and its influence factors, but less was made to regional-specific spatiotemporal characteristics of these factors. And there were unknown about the difference in influences of the factors because of spatial heterogeneity. In this study, WCF was investigated in the Yellow River water conservation area of China using the Pettitt test, Mann-Kendall trend analysis, wavelet analysis, and InVEST model. Based on the data of meteorology, hydrology, soil, and topography data, the annual and seasonal variation of precipitation, temperature, and runoff were analyzed as well as their influence on water conservation. Results include: (1) The annual precipitation increased at a mean rate of 8.06 mm/10a in the area above Lanzhou (i. e., the mainstream and tributary area of the upper reaches of Lanzhou station in the Yellow River), but decreased in the Nanshan tributary of the Weihe River (0.15 mm/10a) and the Yiluo River basin (2.62 mm/10a). The three regions' annual and seasonal mean temperatures exhibited a gradual increasing trend. The yearly runoff decreased with a trend of 58.70 million m³/a, 56.80 million m³/a, and 28.20 million m³/a in the three regions, respectively; (2) There existed multiscale periodic variation pattern of annual precipitation, temperature, and runoff, with considerable energy fluctuations over a long period; (3) The multi-year-averaged water conservation amounts were 8.77, 1.73, and 0.79 billion m³ in the area above Lanzhou, the Nanshan tributary of the Weihe River, and the Yiluo River basin, respectively. The maximum total quantity of water conservation occurred in the area above Lanzhou. The Yiluo River basin had the largest per unit area quantity; (4) From 1960 to 2019, water conservation in the three regions decreased significantly; (5) Water conservation was significantly ($P < 0.05$) positively correlated with precipitation and runoff, and negatively correlated with temperature. This research provides a reference for decision-making of water resources management and ecological protection in the Yellow River water conservation area of China.

Key words: temporal and spatial variation; influencing factors; trend analysis; InVEST model; correlation analysis; Yellow River water conservation area

(责任编辑 钟雨倩)