

气候变化和人类活动对泾河上游径流的影响

党素珍,董国涛,蒋晓辉,何宏谋,张文鹤

(黄河水利委员会 黄河水利科学研究院, 郑州 450003)

摘要: 根据泾河上游流域内 1973 年-2012 年水文气象数据,采用气候弹性系数法研究了气候变化和人类活动对径流量的影响。结果表明:泾河年径流呈显著减少趋势,减少速率为 $-13.1\text{ mm}/10\text{a}$,且在 1985 年前后发生了径流突变;气候变化对泾河上游流域径流减少的贡献率为 $36.8\% \sim 43.8\%$,而人类活动的贡献率为 $56.2\% \sim 63.2\%$ 。可见,气候变化和人类活动均会导致泾河流域上游径流减少,但人类活动是主要驱动力。

关键词: 气候变化;人类活动;泾河上游;弹性系数;径流

中图分类号: P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)04-0003-05

Impacts of Climate Change and Human Activities on Runoff in the Upper Reaches of Jinghe River

DANG Su zhen, DONG Guo tao, JIANG Xiao hui, HE Hong mou, ZHANG Wen ge

(Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: The impacts of climate change and human activities on the runoff in the upper reaches of the Jinghe River Basin were investigated using the climate elasticity method based on the hydrological and meteorological data from 1973 to 2012. The results showed that the annual runoff decreased significantly with a rate of $-13.1\text{ mm}/10\text{a}$ and an abrupt change occurred around year 1985. The climate change accounted for $36.8\% \sim 43.8\%$ to the decreasing in runoff, while human activities accounted for $56.2\% \sim 63.2\%$. Both of the climate change and human activities can result in the decline of runoff in the upper reaches of the Jinghe River Basin, but human activities played a dominant role.

Key words: climate change; human activities; upper reaches of Jinghe River Basin; climate elasticity; runoff

河川径流是受气候变化和人类活动共同作用的^[1,2],气候变化与人类的负面活动已经大大破坏了水资源可持续的地域耦合空间结构和流域和谐的生态水文过程,导致严重的水资源问题和一系列由水资源短缺衍生出的生态环境问题^[3]。对某一区域或某一流域,受地理条件和人类生产能力的限制,对水资源产生影响的主要因素可能有所区别,因此,定量分离气候变化和人类活动对径流影响已经成为目前研究的热点问题之一。

近年来,黄土高原入黄径流呈减少趋势,对该区及下游的水资源供给造成了严重威胁。泾河作为黄土高原地区的一条重要入黄支流,是西北干旱、半干旱地区的重要水源,近些年来其径流变化备受研究者关注。邱国玉等^[4]利用 SWAT 模型,采用分别固定气候因子和土地利用/覆被变化因子的情景模拟方法,定量区分气候和土地利用/覆被变化对流域径流的影响方式和程度,并据此探讨了北方干旱化和土地利用变化对泾河流域径流的影响;张淑兰等^[5]分析了泾

河上游降水变化和人类活动对径流的影响;索安宁等^[6]分析了流域植被景观格局对泾河径流的调节作用;冉大川等^[7]选取了主要站点分析了人类活动对地表径流的影响。

本文以泾河泾川站以上的上游流域为研究区,通过分析研究区内气象要素(降水、蒸发)和径流序列的变化,采用基于气候弹性系数的评估方法,量化区分气候变化和人类活动对泾河上游流域径流的影响。

1 研究区概况

泾河是黄河流域十大水系之一,发源于宁夏回族自治区泾源县,流经宁夏、甘肃、陕西三省(区),于陕西省高陵县陈家滩注入渭河。泾河上游区域位于泾河流域的西南部($106^{\circ}11' \sim 107^{\circ}21' \text{E}$, $35^{\circ}15' \sim 35^{\circ}45' \text{N}$),是土石山区向黄土高原过渡地带,地势以西部的六盘山脉最高,由西向东倾斜,境内高差起伏较大,最高海拔 2 922 m,最低海拔为 1 026 m,区域总面积为 3 164 km²。地形地貌复杂多样,山地、塬、

收稿日期: 2013-11-26 修回日期: 2014-03-10 网络出版时间: 2014-06-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.04.001.html>

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(HKY-JBYW-2013-23; HKY-JBYW-2013-22)

作者简介: 党素珍(1983-),女,河南灵宝人,工程师,博士,主要从事水文水资源方面研究。E-mail: dangsuzhen@gmail.com

通讯作者: 董国涛(1982-),男,山东青州人,工程师,博士,主要从事水文水资源遥感方面研究。E-mail: dongguotao@hky.yrcc.gov.cn

梁、峁、川、沟壑齐全,其中山地主要是六盘山及其余脉崆峒山和太统山。

研究区土壤类型以灰褐土(土石山区)和黄土(黄土高原)为主。西部山地植被类型多样,具有较高的森林覆盖率,降水和径流较丰富,是泾河的发源地;东部黄土高原森林植被稀少,主要是农田和灌草丛,属于旱缺水区。

该区具有山地气候特征和黄土高原暖温带气候,是半湿润过渡带。根据该区域内各气象站点多年观测资料,泾河流域上游多年平均气温 8.9℃,多年平均年降水量为 586 mm,年降水量在 355~ 845 mm 之间,其中汛期 6 月~ 9 月的平均降雨量达 409 mm,占全年总降水量的 53%~ 85%。夏秋季出现大强度暴雨的频率较高,年水量的年际变化显著,最大、最小年降水量相差 2.4 倍。

2 数据来源与数据处理

本研究采用的数据包括:泾川站 1973 年~ 2012 年的逐月径流数据和区内 34 个雨量站的月降水数据,均来源于黄河水利委员会水文局;潜在蒸散发数据,为区内平凉气象站点的常规观测资料,包括 1973 年~ 2012 年的月降水资料、月平均气温、月平均最高气温、月平均最低气温、月日照时数、10 m 处风速、相对湿度,来源于中国气象局气象中心。

对于月降水数据,利用 ArcGIS 软件中的泰森多边形法计算得到研究区的面降雨量见图 1;对于平凉气象站点的常规观测资料,采用联合国粮农组织推荐的修正 Penmar Monteith 公式^[7],计算得到该站的月参考蒸散发,代表泾河流域上游的面参考蒸散发。

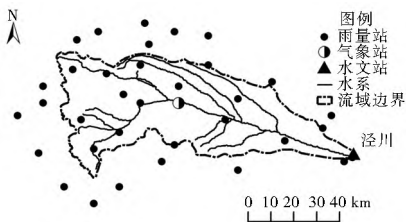


图 1 研究区站点分布

Fig. 1 Distribution of gauging stations in the study area

3 研究方法

3.1 气候弹性系数法

基于气候弹性系数来定量评价气候变化水文响应的方法最早是由 Schaake 于 1990 年提出,采用气候弹性系数来表征径流对气候变化的敏感性^[8]。

闭合流域的水量平衡方程可表示为:

$$Q = P - E_a + \Delta S \quad (1)$$

式中: Q 为径流量(mm); P 为降水量(mm); E_a 为实际蒸散发量(mm); ΔS 为流域蓄水量的变化(mm)。若研究时间尺度较大,则可以认为 ΔS 近似于零。

基于 Budyko 假设^[12],实际蒸散发(E_a)是干燥指数(ϕ)的函数,流域实际蒸散发可表示为:

$$E_a = PF(\phi) \quad (2)$$

式中: $\phi = E_0/P$, E_0 为潜在蒸散发(mm)。表 1 给出了六种基于 Budyko 假设来计算 $F(\phi)$ 的公式。

河川径流是受气候变化和人类活动共同作用的,前者如降水和潜在蒸散发的变化,后者如农业灌溉用水和工业用水的变化。因此,年均径流的变化可表示为:

$$\Delta Q = \Delta Q_C + \Delta Q_H \quad (3)$$

$$\Delta Q_C = \Delta Q_P + \Delta Q_{E_0} \quad (4)$$

式中: ΔQ 为径流的总变化(mm); ΔQ_C 和 ΔQ_H 分别为气候变化和人类活动引起的径流变化。径流的总变化量可由水文站点的实测径流资料求的,即 $\Delta Q = \Delta Q_{obs,2} - \Delta Q_{obs,1}$,其中, $\Delta Q_{obs,1}$ 和 $\Delta Q_{obs,2}$ 分别代表径流突变点发生前和发生后的实测径流量。以上计算是基于气候变化和人类活动对径流变化的影响是相互独立的这样一个假设。

气候弹性系数定义为径流的变化率与某一气候因子(如降水或潜在蒸散发)的变化率的比值^[8],即

$$\varepsilon = \frac{dQ/Q}{dX/X} \quad (5)$$

式中: ε 为气候弹性系数(无量纲); Q 为径流量(mm); X 为某一气候变量,例如降水或者潜在蒸散发。

因此,气候变化对径流的影响可表示为:

$$\Delta Q_C = \left[\varepsilon_P \frac{\Delta P}{P} + \varepsilon_{E_0} \frac{\Delta E_0}{E_0} \right] Q \quad (6)$$

式中: ΔP 、 ΔE_0 分别为降水和潜在蒸散发的变化量, ε_P 和 ε_{E_0} 分别为径流对降水和潜在蒸散发的弹性系数, $\varepsilon_P = 1 + \frac{\phi F'(\phi)}{1 - F(\phi)}$,且 $\varepsilon_P + \varepsilon_{E_0} = 1$ 。其他符号同前。

表 1 基于 Budyko 假设的年实际蒸散发计算公式

Table 1 Formula for annual actual evapotranspiration estimation based on the Budyko hypothesis

参考文献	计算方法
Schreiber[1904] ^[13]	$F(\phi) = 1 - e^{-\phi}$
Ol' dekop[1911] ^[14]	$F(\phi) = \phi \tanh(1/\phi)$
Budyko[1948] ^[12]	$F(\phi) = [\phi \tan(1/\phi) (1 - e^{-\phi})]$
Turc[1954] ^[15] and Pike[1964] ^[16]	$F(\phi) = 1 / \sqrt{1 + \phi^2}$
Fu[1981] ^[17]	$F(\phi) = 1 + \phi - (1 + \phi^m)^{1/m}$
Zhang et al.[2001] ^[18]	$F(\phi) = (1 + w\phi) / (1 + w\phi + 1/\phi)$

(在本研究中, m 和 w 分别取值为 2.5 和 2.0.)

3.2 潜在蒸散发计算方法

本研究中泾河上游潜在蒸散发采用修正的 Penmar Monteith 方程进行计算,修正的 Penmar Monteith 方程由世界粮农组织于 1998 年推出^[7],是目前最常用的潜在蒸散发估算方法之一。其中参考下垫面是植被高度为 0.12 m 的草地,表面阻抗固定为 70 s/m,反照率是 0.23,计算表达式为:

$$E_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{mean} + 273} U_2 (v_p s - v_p)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (7)$$

式中: E_0 为潜在蒸散发(mm); R_n 为净辐射(MJ/(m²·d)); G 为土壤热通量(MJ/(m²·d)); T_{mean} 为日平均气温(℃); Δ 为饱和水汽压曲线斜率(kPa/℃); γ 为干湿表常数(kPa/℃); U_2 为 2 m 高度处风速(m/s); $v_p s$ 为饱和水汽压(kPa); v_p 为实际水汽压(kPa)。其中,净辐射为太阳短波辐射与地面长波辐射之差,太阳短波辐射 R_n 是太阳辐射 R_s 的函数,即

$$R_n = f(R_s) \quad (8)$$

$$R_s = (a_s + b_s \frac{S}{N}) R_a \quad (9)$$

其中: R_s 为太阳辐射 (W/m^2); R_a 为大气层外太阳辐射 (W/m^2); N 为月最大可照时数 (h), a_s 和 b_s 为经验系数, FAO 推荐值分别为 0.25 和 0.50. 韩虹等^[19] 利用黄土高原 7 个站点实测值验证 Penmar Monteith 公式在黄土高原的适用性时得出, 当 a_s 和 b_s 分别取值为 0.18 和 0.55 时, 效果最好. 因此, 本研究计算太阳辐射时也采用这组经验值.

3.3 Mann-Kendall 非参数检验

Mann-Kendall 非参数检验方法^[20-21] 不需要样本遵从一定的分布, 也不受少数异常值的干扰, 适用于水文、气象等非正态分布的数据, 计算简便^{1,22}. 本文采用该方法进行降水、潜在蒸散发和径流的变化趋势分析及突变点检验.

4 结果与讨论

4.1 流域内水文变化

应用 Mann-Kendall 检验方法分析泾河上游流域降水、潜在蒸散发及泾川站径流量的变化趋势和突变检验, 计算结果见图 2 及表 2. 从泾河上游流域 1973 年-2012 年间年降

水量 (P)、年潜在蒸散发量 (E_0) 和年径流量 (Q) 的长期变化见图 2, 可以看出年降水和径流呈现减少的变化趋势, 潜在蒸散发呈现增加趋势, 变化率分别为 $-3.8 \text{ mm}/10\text{a}$ 、 $-13.1 \text{ mm}/10\text{a}$ 和 $7.1 \text{ mm}/10\text{a}$. Mann-Kendall 趋势性检验结果见表 2, 年径流的变化趋势通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验, 减少趋势显著, 而年降水和年潜在蒸散发未通过趋势性检验, 变化趋势不显著.

Mann-Kendall 突变检验计算结果见图 2, 泾川站年径流在 1985 年前后发生了突变, 而泾河上游流域的降水和潜在蒸散发在 0.05 显著性水平上没有发生显著的突变. 与 1985 年前相比, 1985 年后泾河上游流域年径流、年降水和年潜在蒸散发的变化率分别为 -40.3% 、 -6.3% 和 0.5% (表 3), 年径流的变化率明显大于年降水和年潜在蒸散发的变化率.

4.2 气候变化和人类活动对径流影响的分离

为评估气候变化对径流的影响, 将基于 Budyko 假设的六种计算年实际蒸散发公式代入到公式 (5), 得到各方法计算出的 1973 年-2012 年间年降水和年潜在蒸散发对径流的弹性系数见表 4. 由表 4 可以看出, 各方法计算出的年降水对径流的弹性系数的变化范围是 2.26~2.67, 年潜在蒸散发

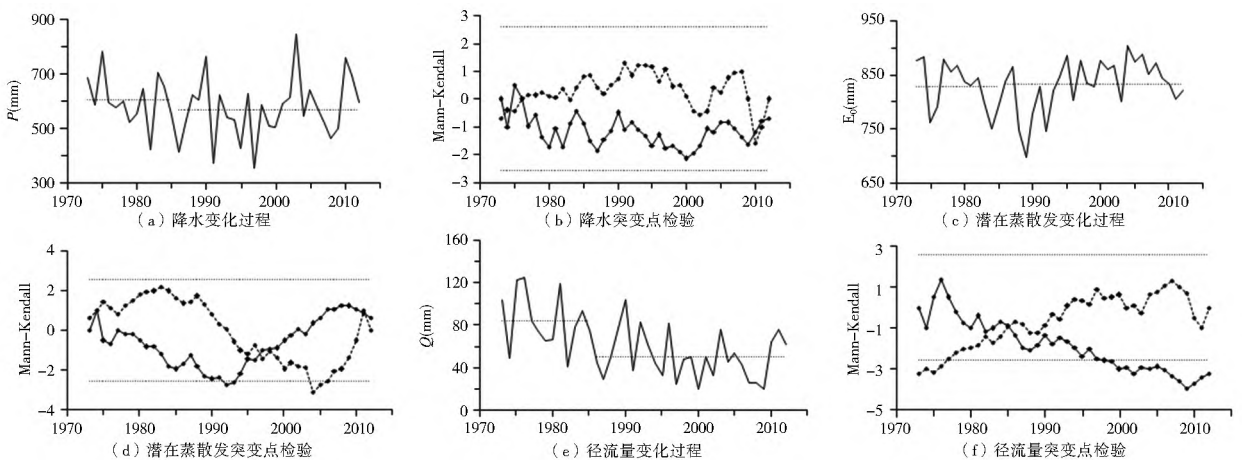


图 2 泾河上游降水 (P)、潜在蒸散发 (E_0)、径流 (Q) 变化趋势和突变点分析
(图 a、c、e 中虚线表示时段平均值; 图 b、d、f 中虚线表示 0.01 显著性水平)

Fig. 2 Long-term trend and abrupt change point of precipitation (P), potential evapotranspiration (E_0), and runoff (Q) in upper reaches of Jinghe River Basin (Dotted line in left represents long-term average values, and dotted line in right indicates significance level of 0.01)

表 2 泾河上游降水 (P)、潜在蒸散发 (E_0) 和径流 (Q) 趋势检验和变点分析

Table 2 Trend and abrupt change point analysis of precipitation (P), potential evapotranspiration (E_0), and runoff (Q) in upper reaches of Jinghe River Basin

变量	均值 /mm	变化率 /(mm·10a ⁻¹)	MK 趋势检验		Mann-Kendall 突变检验
			统计值	显著性	
P	573.8	-3.8	-0.7	-	-
E_0	832.9	7.1	0.65	-	-
Q	62.2	-13.1	-3.29	**	1985

(** 表示变化趋势在 0.01 水平上显著)

对径流的弹性系数取值在 $-1.67 \sim -1.26$ 之间, 由此可见, 泾川站的径流对降水更敏感一些. 若年实际蒸散发采用 Fu [1981] 的公式进行计算, 那么弹性系数法的计算结果表明, 10% 的降水减少将导致 22.6% 的径流减少, 而 10% 的潜在

表 3 泾河上游降水 (P)、潜在蒸散发 (E_0)、径流 (Q) 和干燥指数 (ϕ) 的变化

Table 3 Variations of precipitation (P), potential evapotranspiration (E_0), runoff (Q), and dryness index (ϕ) in upper reaches of Jinghe River Basin

时期	P /mm	E_0 /mm	Q /mm	干燥指数
1973-1985	605.7	829.3	84.5	1.40
1986-2012	567.8	833.7	50.4	1.54
绝对变化量	-37.9	4.4	-34.1	0.14
相对变化(%)	-6.3	0.5	-40.3	9.48

蒸散发增加将导致 12.6% 的径流减少.

表 3 显示, 相比于 1973 年-1985 年, 1986 年-2012 年的泾河上游流域的年降水量和泾川站年径流量分别减少了 37.9 mm 和 34.1 mm, 年潜在蒸散发增加了 4.4 mm. 根据公式 (6) 和计算的 ϵ_p 和 ϵ_{E_0} , 可以分离出气候变化对年径流

表4 泾河上游气候变化和人类活动对径流变化的贡献

Table 4 Proportional impacts of climate change and human activities on variation of runoff in upper reaches of Jinghe River Basin

方法	ϵ_p	ϵ_{E_0}	$\Delta Q_p / \text{mm}$	$\Delta Q_{E_0} / \text{mm}$	$\Delta Q_C / \text{mm}$	$\Delta Q_H / \text{mm}$	$\frac{\Delta Q_C}{\Delta Q} (\%)$	$\frac{\Delta Q_H}{\Delta Q} (\%)$
Schreiber[1904]	2.49	-1.49	-13.3	-0.63	-13.9	-20.2	40.7	59.3
Of dekop[1911]	2.67	-1.67	-14.2	-0.71	-14.9	-19.2	43.8	56.2
Budyko[1948]	2.57	-1.57	-13.7	-0.67	-14.3	-19.8	42.1	57.9
Turc[1954] and Pike[1964]	2.49	-1.49	-13.3	-0.63	-13.9	-20.2	40.7	59.3
Fu[1981]	2.26	-1.26	-12.0	-0.53	-12.6	-21.5	36.8	63.2
Zhang et al. [2001]	2.47	-1.47	-13.1	-0.62	-13.8	-20.3	40.4	59.6

的影响见表4, 37.9 mm的降水减少使得泾川站径流量减少了12~14.2 mm, 而4.4 mm的潜在蒸散发增加导致径流减少了0.53~0.71 mm。因此, 降水和潜在蒸散发对径流的综合作用的结果导致泾川站径流量减少了12.6~14.9 mm。因此, 气候变化对径流变化的贡献率为36.8~43.8%, 相对应的人类活动对径流变化的影响为56.2~63.2%。

4.3 讨论

研究表明, 黄土高原入黄径流的减少趋势是气候变化和人类活动综合作用的结果^[23, 25], 如气候趋向暖干, 直接减少水源并增加蒸散; 而水保、水利工程建设 and 工农业用水等人类活动也会大量减少径流。邱国玉等^[4]基于泾河流域的土地利用类型图分析得出, 20世纪80年代、90年代, 流域内耕地、城镇用地、裸地都呈上升趋势, 人类活动对流域生态系统的影响呈逐年增加趋势。张淑兰等^[5]分析认为人类活动是泾河上游径流变化的最主要原因。李志等^[26]基于 Mann Kendall 和双累积曲线等方法分离1972年~2000年气候变化和人类活动对泾河支流黑河流域径流的影响, 结果表明, 气候变化和人类活动均导致黑河径流减少, 而且人类活动是导致黑河径流减少的主要驱动力。

在计算气候变化和人类活动对径流影响时存在一定的不确定性。由表4也可以看出, 采用不同的实际蒸散发计算公式, 基于气候弹性系数法计算出的气候变化对泾川站径流的影响也不同, 变化范围为36.8%~43.8%, 从而人类活动对泾川站径流的影响占56.2%~63.2%。虽然不同方法算出的结果略有不同, 但是都表明人类活动是泾川站径流变化的主要原因。另外, 气候弹性系数法在分离气候变化和人类活动对径流的影响时, 都假设气候变化和人类活动是相互独立的两个变量, 这也会导致计算结果的不确定性。事实上, 气候变化和人类活动(如土地覆被/土地利用变化)并非完全独立的两个变量。在气候变化影响水资源量的过程中, 人类活动利用水资源的方式逐渐发生改变, 以满足自身的需要; 人类活动在利用水资源的生产过程中, 会释放一定量的温室气体, 这也是近几十年来导致气候变暖的主要原因。

5 结论

根据1973年~2012年流域内的气象、水文数据分析了泾河泾川以上流域的径流变化规律, 泾川站年径流呈显著地减少趋势, 年降水和年潜在蒸散发的变化趋势不显著。同时, Mann Kendall 突变检验计算结果表明, 泾川站年径流在1985年前后发生了突变。与1985年前相比, 1985年后泾河

流域上游的多年平均年径流由84.5 mm减少到50.4 mm, 变化率达到-40.3%。

采用基于Budyko假设的六种实际蒸散发计算公式, 基于气候弹性系数法计算出气候变化对泾河上游流域径流变化的贡献率为36.8%~43.8%, 相对应的人类活动对径流变化的影响为56.2%~63.2%。综合分析后可以认为, 气候变化和人类活动共同导致泾河流域上游径流减少, 但人类活动是导致径流减少的主要驱动力。

参考文献(References):

- [1] Liu, C., J. Xia. Water Problems and Hydrological Research in the Yellow River and the Huai and Hai River Basins of China [J]. Hydrological Processes, 2004, 18(12): 2197-2210.
- [2] Lioubimtseva, E., R. Cole, J. M. Adams, et al. Impacts of Climate and Land-cover Changes in Arid Lands of Central Asia [J]. Journal of Arid Environments, 2005, 62(2): 285-308.
- [3] Cheng, G. Study on the Sustainable Development in Heihe River Watershed from the View of Ecological Economics [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(4): 335-343.
- [4] 邱国玉, 尹婧, 熊育久, 等. 北方干旱化和土地利用变化对泾河流域径流的影响 [J]. 自然资源学报, 2008, 23(2): 211-218. (QIU Guoyu, YIN Jing, XIONG Yujiu, et al. Studies on the Effects of Climatic Warming-drying Trend and Land Use Change on the Runoff in the Jinghe River Basin [J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(2): 211-218. (in Chinese))
- [5] 张淑兰, 王彦辉, 于鹏涛, 等. 定量区分人类活动和降水量变化对泾河上游径流变化的影响 [J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 53-58. (ZHANG Shulan, WANG Yanhui, YU Pengtao, et al. Study for Separating the Impact of Precipitation Variation and Human Activities on Runoff Change of the Upper Reaches of Jing River [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(4): 53-58. (in Chinese))
- [6] 索安宁, 于波, 王天明, 等. 泾河流域植被景观格局对流域径流的调节作用 [J]. 水土保持学报, 2005, 19(4): 40-43. (SUO Anning, YU Bo, WANG Tianming, et al. Regulation of Vegetation Landscape Pattern on Runoff in Watershed of Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(4): 40-43. (in Chinese))
- [7] Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, et al. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. [J]. United Nations Food and Agriculture Organization, Irrigation and Drainage Paper: 56, 1998.
- [8] Schaake, J. C. Flow climate to flow, in Climate Change and U.

- S. Water Resources[M]. New York: John Wiley, 1990.
- [9] Dooge, J. C. I. Sensitivity of Runoff to Climate Change: A Hortonian Approach[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1992, 73(12): 2013-2024.
- [10] Fu, G., S. P. Charles, F. H. S. Chiew. A Two parameter Climate Elasticity of Streamflow Index to Assess Climate Change Effects on Annual Streamflow[J]. Water Resour. Res., 2007, 43(11): W11419.
- [11] Zheng, H., L. Zhang, R. Zhu, et al. Responses of Streamflow to Climate and Land Surface Change in the Headwaters of the Yellow River Basin[J]. Water Resour. Res., 2009, 45(7): W00A19.
- [12] Budyko, M. I. Evaporation Under Natural Conditions, Translated from Russian by Isr. [J]. Program for Sci. Transl. staff, Isr. Program for Sci. Transl., Jerusalem, 1948.
- [13] Schreiber, P. Über die Beziehungen Zwischen dem Niederschlag und der Wasserführung der Flüsse in Mitteleuropa [J]. Z. Meteorol, 1904, 21(10): 441-452.
- [14] Oldekop, E. M. On Evaporation from the Surface of River Basins, in: Transactions on Meteorological Observations, Iur evskogo (in Russian) [R]. 1911.
- [15] Turc, L. Le Bilan d'eau Des Sols. Relation Entre la Précipitation, l'Évaporation et l'Écoulement[J]. Ann. Agron., 1954(5): 491-569.
- [16] Pike, J. G. The Estimation of Annual Runoff from Meteorological data in a Tropical climate[J]. Journal of Hydrology, 1964, 2(2): 116-123.
- [17] 傅抱璞. 论陆面蒸发的计算[J]. 大气科学, 1981, 5(1): 23-31. (FUH Bao-puh. On the Calculation of the Evaporation from Land Surface[J]. Scientia Atmospherica Sinica, 1981, 5(1): 23-31. (in Chinese))
- [18] Zhang, L., W. R. Dawes, G. R. Walker. Response of Mean Annual Evapotranspiration to Vegetation Changes at Catchment Scale[J]. Water Resources Research, 2001, 37(3): 701-708.
- [19] 韩虹, 任国玉, 王文, 等. 黄土高原地区太阳辐射时空演变特征[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(1): 61-66. (HAN Hong, REN Guoyu, WANG Wen, et al. Temporal and Spatial Variation Characteristics of Total Solar Radiation over the Loess Plateau Region[J]. Climatic and Environmental Research, 2008, 13(1): 61-66. (in Chinese))
- [20] Mann, H. Nonparametric Tests Against trend[J]. Econometrica, 1945, 13: 245-259.
- [21] Kendall, M. Rank Correlation Methods[M]. London: Charles Griffin, 1975.
- [22] 彭兆亮, 何斌, 王国利, 等. 碧流河流域气候变化对水资源量的影响研究[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(5): 76-79. (PENG Zhaoliang, HE Bin, WANG Guoli, et al. A Study on Characteristics of Climate Change and its Influence on Water Resources in Recent 30 Years in Biliuhe River Basin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(5): 76-79. (in Chinese))
- [23] 李玉山. 黄土高原治理开发与黄河断流的关系[J]. 水土保持通报, 1997, 17(6): 41-45. (LI Yushan. Relation Between Control in Loess Plateau and No flow in the Yellow River[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1997, 17(6): 41-45. (in Chinese))
- [24] 穆兴民, 巴桑赤烈, Zhang Lu, 等. 黄河河口镇至龙门区间来水来沙变化及其对水利水保措施的响应[J]. 泥沙研究, 2007(2): 36-41. (MU Xingmin, BASANG Chilie, ZHANG Lu, et al. Impact of Soil Conservation Measures on Runoff and Sediment in Hekou Longmen Region of the Yellow River[J]. Journal of Sediment Research, 2007(2): 36-41. (in Chinese))
- [25] 许炯心, 孙季. 近50年来降水变化和人类活动对黄河入海径流量的影响[J]. 水科学进展, 2003, 14(6): 690-695. (XU Jiongxin, SUN Ji. Influence of Precipitation and Human Activities on Water Fluxes from the Yellow River into the Sea in the Past 50 years[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(6): 690-695. (in Chinese))
- [26] 李志, 刘文兆, 郑粉莉, 等. 黄土塬区气候变化和人类活动对径流的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(9): 2379-2386. (LI Zhi, LIU Wen zhao, ZHENG Fen li, et al. The Impacts of Climate Change and Human Activities on River Flow in the Loess Tableland of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(9): 2379-2386. (in Chinese))

(上接第20页)

- [2] 袁新, 李恩羊. 参照作物需水量的空间变异性[J]. 水利学报, 1990(2): 35-39. (YUAN Xin, LI En yang. Spatial Variability of Crop Water Requirements [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009(2): 8-10. (in Chinese))
- [3] 王仁铎, 胡光道. 线性地质统计学[M]. 地质出版社, 1988. (WANG Ren duo, HU Guang dao. Linear Geostatistics [M]. Beijing: Geology Publishing House, 1988. (in Chinese))
- [4] 侯景儒, 黄竞先. 地质统计学的理论和方法[M]. 地质出版社, 1990. (HOU Jing ru, HUANG Jing xian. Theory and Method of Geostatistics[M]. Beijing: Geology Publishing House, 1990. (in Chinese))
- [5] 雷志栋, 杨诗秀. 土壤特性空间变异性初步研究[J]. 水利学报, 2009(2): 8-10. (LEI Zhi dong, YANG Shi xiu. Preliminary Investigation of the Spatial Variability of Soil Properties [J]. 2009, 2: 8-10. (in Chinese))
- [6] 刘廷玺, 朝伦巴根. 多时段泛克立格空间估计理论及其在水文领域中的应用[J]. 水利学报, 1995(2): 76-83. (LIU Ting xi, CHAO Lun ba gen. The Theory of Universal Kriging Spatial Estimation with Multiple Time Period and its Application in Hydrology[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995(2): 76-83. (in Chinese))