

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2017.05.017

灞河流域气候因子对水沙变化的影响

李洋洋^{1,2}, 白洁芳^{1,2}, 周维博^{1,2}, 宋 扬^{1,2}

(1. 长安大学环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054;

2. 长安大学旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要:利用灞河流域蓝田气象站和马渡王水文站 1960—2012 年的气象、水文实测资料,分析灞河流域气候及水沙变化规律,同时运用相关性分析、灰色关联分析、多元线性回归模型等多种方法探讨了该流域水沙变化与气候变化的关系。结果表明:灞河流域降雨量、蒸发量、径流量和输沙量皆呈显著下降趋势,而气温呈上升趋势;降雨量与水沙都有重要的相关关系,1960—1990 年影响径流量的气候因子敏感度由大至小依次为降雨量、气温、蒸发量,而 1991—2012 年则为降雨量、蒸发量、气温,当气温和蒸发量不变时,降雨量每增加 1 mm,两阶段的年径流量分别增加 0.14 亿 m³ 和 0.08 亿 m³;1960—2012 年影响输沙量的气候因子敏感度由大至小依次为降雨量、气温、蒸发量,当气温和蒸发量不变时,降雨量每增加 1 mm,年输沙量增加 0.668 万 t。

关键词:水沙变化;气候因子;气候变化;气候-水沙量化关系模型;灞河流域

中图分类号:TV143

文献标识码:A

文章编号:1004-6933(2017)05-0098-08

Impact of climate factors on variations of water and sediment in Bahe River Basin

LI Yangyang^{1,2}, BAI Jiefang^{1,2}, ZHOU Weibo^{1,2}, SONG Yang^{1,2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecology in Arid Areas of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Based on the the climate data of Lantian meteorological station and hydrology data of Maduwang hydrological station and the climate data of Lantian meteorological station in the Bahe River Basin collected from 1960 to 2012, this paper analyzed climate and water-sediment change rules of the said basin, at the same time the relationship between water-sediment variation and climate change was discussed by using correlation analysis, gray relational analysis and multiple linear regression model, etc. The results showed that the rainfall, evaporation, runoff and sediment discharge in the Bahe River Basin all showed a significant downward trend while the temperature was on the rise. Rainfall had an important relationship with water and sediment, from the year 1960 to 1990 the sensitivity of climate factors affecting runoff was rainfall, temperature and evaporation in turn, and between the year 1991 and 2012 the sensitivity was rainfall, evaporation and temperature. When the temperature and evaporation were constant, if the rainfall increased 1mm each time, the annual runoff would increase by $0.014 \times 10^8 \text{ m}^3$ and $0.008 \times 10^8 \text{ m}^3$ respectively in the above two period. From the year 1960 to 2012, the climate factors affecting the sediment discharge in the Bahe River Basin were rainfall, temperature and evaporation. When temperature and evaporation were unchanged, the annual sediment discharge increased by 0.668×10^8 tons for each increase of rainfall by 1mm.

Key words: variation of water and sediment; climatic factors; climate change; climate-water sediment quantitative relation model; Bahe River Basin

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(12120113004800)

作者简介:李洋洋(1993—),男,硕士研究生,研究方向为水力学及河流动力学。E-mail:476951957@qq.com

通信作者:周维博,教授。E-mail:zwbzyz823@163.com

全球气候通过大气环流、冰雪条件改变等引起降水、入渗、蒸发、土壤湿度、河川径流、地下水等水文要素的变化,从而引起水资源在时空上的重新分配和影响区域水资源的状况,并对降水、蒸发、径流、泥沙等造成直接影响^[1]。因此,气候变化引起全世界的广泛关注,关于气候变化对水文过程的影响也成为当今水文气象领域的热点问题^[2]。

近年来,在气候变暖、极端天气频发的背景下,灞河流域干旱、洪涝等自然灾害频发,因此进行气候变化对灞河水沙的影响研究,对灞河流域的经济和社会的发展,尤其是对下游国家级生态区——泾渭生态区的发展具有重要意义。许多学者针对气候变化对河流水沙的影响做了大量研究,贾宪等^[3]通过分析灞河流域的径流特征,得出气温升高、降水减少是径流减少的主要原因;魏炳乾等^[4]通过对灞河流域 50 年的水沙资料分析,认为人类活动和气候变化是灞河水沙变化的主要因素;王战平^[5]分析了灞河流域 1953—2005 年的降水、泥沙、径流、蒸发、洪水等水文特性,发现流域内径流、洪水等主要受降水影响。上述研究仅仅在总体上说明气候变化对水沙的影响,而没有具体分析水沙对气候因子的敏感性,特别是近 20 年来灞河流域水文情势已发生很大改变。

20 世纪 90 年代以来,灞河流域进入枯水枯沙期,来水来沙量显著减少。笔者拟基于灞河流域水沙变化特征,分两阶段(1960—1990 年和 1991—2012 年)探讨气候变化对水沙的影响,用相关系数法、灰色关联度分析、多元线性回归模型分析了灞河流域径流泥沙对降雨、气温、蒸发等气候因子的敏感度,并建立了水沙与气候因子的定量关系式,用来定量预测灞河流域未来水沙的变化趋势,以期全面认识气候变化对水沙变化的长期影响提供依据。

1 研究区域概况

灞河是渭河的一级支流,发源于陕西省蓝田县灞源乡华岔村西部,沿途有库峪河、兰桥河、汤峪河、泾河等主要支流(图 1),是“八水绕长安”的主要水源。灞河流域位于 109°00'E ~ 109°47'E,33°50'N ~ 34°27'N,河道全长 104 km,流域总面积为 2581 km²,平均比降为 0.6%。该流域属暖温带半湿润季风气候区,四季冷暖干湿分明,流域多年平均降雨量为 616.3 mm,多年平均气温为 13.11℃,多年平均蒸发量为 946.6 mm。

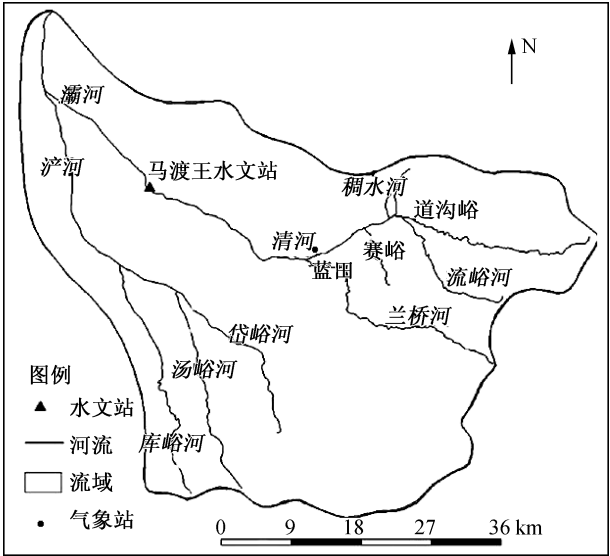


图 1 灞河流域水系

2 资料收集及研究方法

2.1 资料收集

选取马渡王水文站 1960—2012 年的实测径流量、输沙量、降雨量和蒸发量资料,以及蓝田气象站 1960—2012 年的逐年、逐月气温实测数据,按照 3—5 月为春季、6—8 月为夏季、9—11 月为秋季、12 月至次年 2 月为冬季进行季节划分。

2.2 研究方法

2.2.1 线性回归法

对气候要素的趋势变化^[6]一般采用一次直线方程或二次曲线方程,这里采用一元线性模型描述:

$$y = a + bx \tag{1}$$

式中: y 为气候要素序列; x 为时间序列; a 为回归常数; b 为回归系数,可用最小二乘法求得;回归系数 b 反映 y 的趋势倾向, b 为正值,说明 y 呈上升趋势, b 为负值,说明 y 呈下降趋势。

2.2.2 灰色关联度分析

灰色理论方法视不确定信息为灰数,应用灰色数学处理不确定量,可以最终使不确定量量化^[7-8]。

假设有 n 个时间序列: $\{X_1^{(0)}(t)\}, \{X_2^{(0)}(t)\}, \dots, \{X_n^{(0)}(t)\}, t = 1, 2, \dots, N$ 。

其中, N 为序列的长度,即数据个数, n 个序列代表 n 个变量。另设定时间序列 $m: \{X_0^{(0)}(t) (t = 1, 2, \dots, m)\}$, 该时间序列为母序列,而以上 n 序列为子序列。关联度是两个序列关联性大小的度量。根据这一观点,可给关联度一个量化模型。其计算步骤为:

步骤 1: 原始数据转换。由于系统中各因素

的量纲(或单位)不一定相同,且有时数值的数量级相差悬殊,数据很难直接进行比较,因此对原始数据需消除量纲(或单位),转换为可比较的数据序列。

步骤2: 计算关联系数。经数据转换的母序列记为 $\{X_0^{(0)}(t)\}$,子序列记为 $\{X_i(t)\}$,则在时刻 $t = k$ 时母序列 $\{X_0(t)\}$ 与子序列 $\{X_i(t)\}$ 的关联系数为 $L_{0i}(k)$ 。关联系数反映两个被比较序列在某一时刻的紧密程度,其计算式为

$$L_{0i}(k) = \frac{\Delta_{\min} + \rho\Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \rho\Delta_{\max}} \tag{2}$$

式中: $\Delta_{0i}(k)$ 为 k 时刻两比较序列的绝对差; $\Delta_{\min}$ 和 $\Delta_{\max}$ 分别为所有比较序列各个时刻绝对差中的最小值与最大值; ρ 为分辨系数。

步骤3: 求关联度。关联度分析实质上是对时间序列数据进行几何关系比较,因此两序列关联度便以两比较序列各个时刻的关联系数之平均值计算,即:

$$r_{0i} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n L_{0i}(k) \tag{3}$$

式中: r_{0i} 为子序列 i 与母序列 0 的关联度。

(4) 排关联序。将 m 个子序列对同一母序列的关联度按大小顺序排列起来,便组成关联序列,记为 $[X]$,它直接反映各个子序列与母序列的优劣关系。

2.2.3 多元线性回归法

设影响因变量 Y 的自变量个数为 p ,自变量分别为 $X_1, X_2, \dots, X_p$,假设

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p + \varepsilon \tag{4}$$

成立,其中 ε 服从 $N(0, \varepsilon^2)$,称式(4)为因变量 Y 对自变量 $X_1, X_2, \dots, X_p$ 的多元线性回归方程,其中自变量系数可以用最小二乘法进行计算^[9]。回归分析可以准确地计量各个因素之间的相关程度与拟合程度的高低,提高预测精度,因此应用较为广泛。

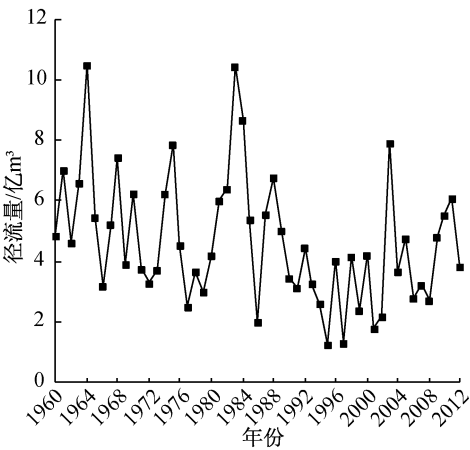
3 水沙变化规律分析

3.1 径流量变化

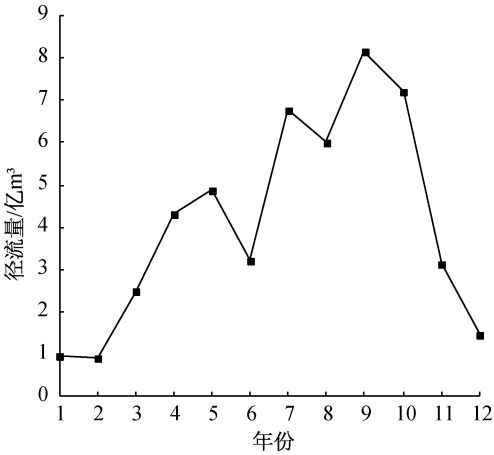
灞河流域马渡王水文站在1960—2012年的多年平均径流量为4.67亿 m^3 。由图2(a)可知,年径流量最大值出现在1964年,为10.50亿 m^3 ,最小值出现在1995年,为1.25亿 m^3 ,分别为多年平均径流量的2.25倍和0.27倍。年径流量在1960—1990年的减少趋势为0.019亿 m^3/a ,1960—2012年为0.046亿 m^3/a ;1991—2012年的多年平均径流量为3.64亿 m^3 ,而1960—1990年为5.41亿 m^3 ,

说明马渡王水文站径流量在1991—2012年减少了32.7%。马渡王水文站径流量的减少直接说明灞河流域径流量在这阶段逐渐减少,目前主要认为气候变暖与降雨量的减少是径流量减少的主要原因。

马渡王水文站径流量年内分布如图2(b)所示,径流量主要集中在7—10月,为主要产流期,约占全年径流量的60%,径流量最大值出现在每年的9—10月,因为灞河流域属于暖温带大陆性季风气候,降雨主要集中在夏季,主要是汛期的连续4个月内。



(a) 径流量年际分布



(b) 径流量年内分布

图2 灞河流域径流量年际分布和年内分布

3.2 输沙量变化

灞河流域马渡王水文站在1960—2012年的多年平均输沙量为182.86万t。由图3(a)可知,年输沙量最大值出现在1962年,为973.38万t,最小值出现在1997年,仅为8.73万t,分别为多年平均输沙量的5.32倍和0.05倍。年输沙量在1960—1990年的减少趋势为7.19万 t/a ,1960—2012年为6.15万 t/a ;1991—2012年的多年平均输沙量为80.27万t,而1960—1990年为255.67万t,说明马渡王水

文站输沙量在 1991—2012 年减少 68.6%。马渡王水文站 1991—2012 年相对于 1960—1990 年年输沙量减少的主要原因为径流量减少 32.7%,另外灞河橡胶坝蓄水工程的建设以及上游各种生态环境的建设也是导致灞河输沙量减少的原因。

马渡王水文站输沙量年内分布如图 3(b) 所示,输沙量主要集中在 6—9 月,为主要产沙期,约占全年输沙量的 70%,输沙量最大值出现在 7 月和 8 月,在夏季,灞河上游降雨量较多,且多为暴雨,灞河的悬移质和推移质泥沙多来源于暴雨径流,暴雨在山区和丘陵地区形成泥石流,泥石流输沙能力很强,因此在这段时间内输沙量急剧增加。

3.3 水沙关系

由图 4(a) 可知,年径流量与年输沙量呈现良好的幂关系,拟合程度达到 0.49。从图 4(b) 可以看出,年径流量与年输沙量变化规律基本一致,即大水大沙、小水小沙。

4 气候要素变化规律

4.1 降雨量变化

灞河流域马渡王水文站在 1960—2012 年的多年平均降雨量为 616.3 mm,由图 5(a) 可知,最大降雨量为 999 mm,发生在 1983 年,最小降雨量为 363 mm,发生在 1995 年,分别为多年平均降雨量的 1.62 倍和 0.59 倍。1960—1990 年年均降雨量为 643.57 mm,1991—2012 年年均降雨量为 577.89 mm,可知这阶段灞河流域年均降雨量稍有减少。随着灞河流域城市化的加快,地表水的径流发生变化,土壤下渗减少,导致地表蒸发量降低,从而影响降雨量。

由图 5(b) 可知,灞河流域降雨量主要集中在每年 7—9 月,约占全年降雨量的 47.55%,12 月份降雨量最少,只占全年的 0.97%,从整个年内趋势来看,降雨量从 1—5 月缓慢上升,在 7—9 月达到顶峰,之后降雨量开始快速下降。

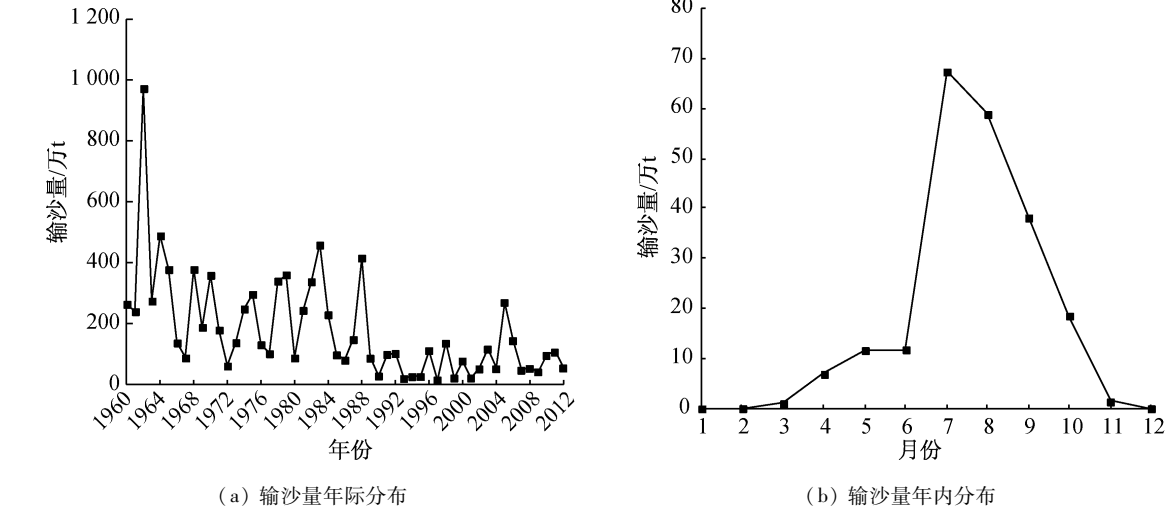


图 3 灞河流域输沙量年际分布和年内分布

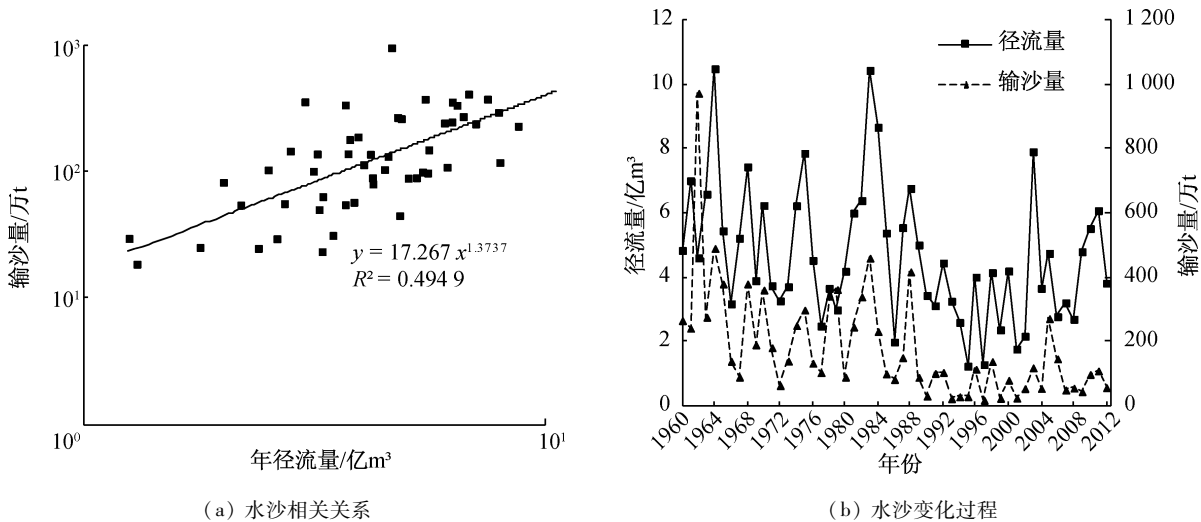
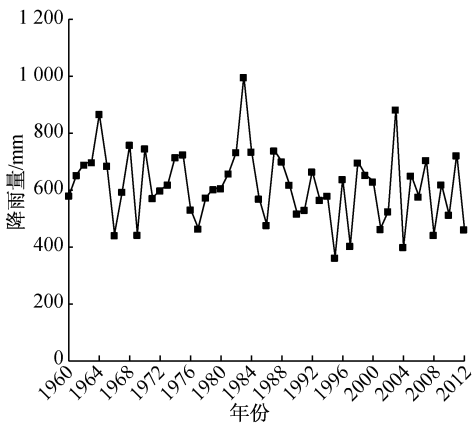
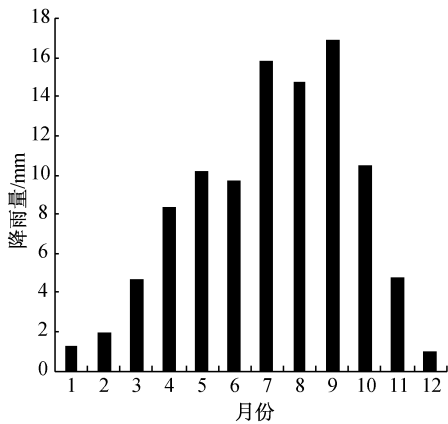


图 4 灞河流域水沙关系



(a) 降雨量年际分布



(b) 降雨量年内分布

图5 灞河流域降雨量年际分布和年内分布

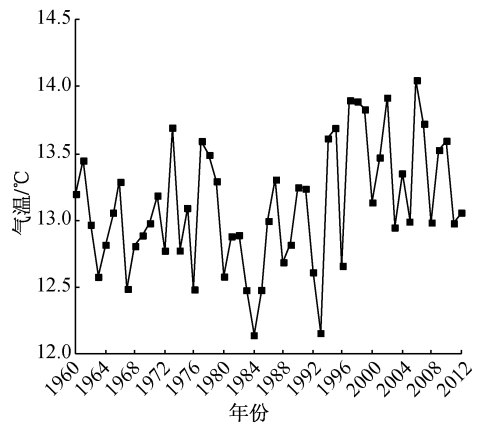
4.2 气温变化

选用灞河流域上游蓝田气象站 1960—2012 年的逐年、逐月实测气温资料(图6),可以看出灞河流域年平均气温变化总体与我国气温变化基本同步,都呈现出明显的增温趋势,多年平均气温为 13.11°C ,气候倾向率为 $0.01^{\circ}\text{C}/\text{a}$,年均气温最高值发生在 2006 年,达到 14.1°C ,最低值则在 1984 年,为 12.14°C 。蓝田气象站 1960—1990 年年均气温为 12.95°C ,1991—2012 年为 13.33°C ,可知后阶段灞河流域年均气温有明显上升趋势。

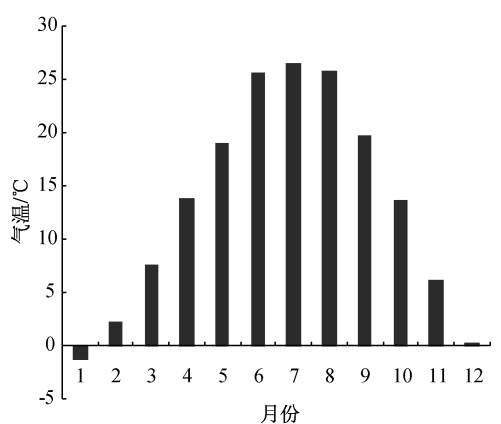
由图6(b)可知,灞河流域月平均气温年内气温差异较大,为典型的单峰型曲线,峰值主要集中在每年 6—8 月,呈正态曲线分布,气温范围在 $-1.29 \sim 26.55^{\circ}\text{C}$,最高值在每年 7 月份,最低值出现在 1 月份,整个曲线呈下抛物线形状。

4.3 蒸发量变化

灞河流域马渡王水文站在 1960—2012 年的多年平均蒸发量为 946.6 mm ,由图7(a)可知,最大蒸发量为 1304.7 mm ,最小蒸发量为 693.1 mm ,其值为多年平均蒸发量的 1.38 倍和 0.73 倍,分别发生在 1977 年和 1990 年。1960—1990 年年均蒸发量为 1028.9 mm ,1991—2012 年年均蒸发量为

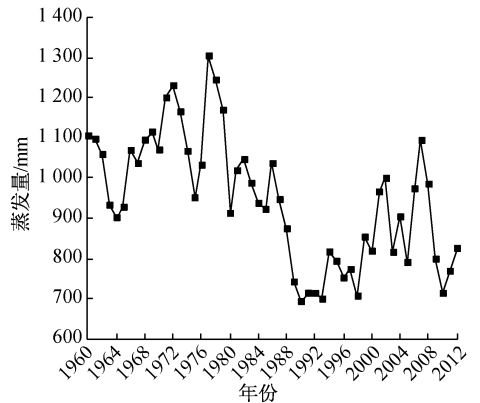


(a) 气温年际分布

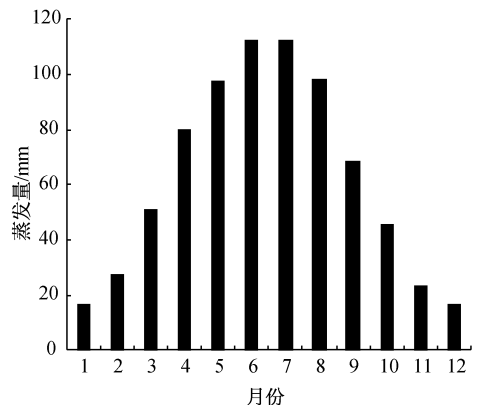


(b) 气温年内分布

图6 灞河流域气温年际分布和年内分布



(a) 蒸发量年际分布



(b) 蒸发量年内分布

图7 灞河流域蒸发量年际分布和年内分布

830.7 mm,同降雨量一样,后阶段灞河流域年蒸发量呈明显减少趋势。

由于水面蒸发量年内分配受各月的气温、空气湿度、风速等影响,冬季气温低,蒸发量小;夏季气温高,蒸发量大,因此由图 7(b)可知,全年月平均最小蒸发量出现在 1 月和 12 月,约占全年蒸发量的 4.5%,全年月平均最大蒸发量出现在 6—7 月,约占全年蒸发量的 30%。

5 气候因子与水沙关系分析

5.1 相关性分析

灞河流域 1960—2012 年水沙与气候因子相关关系系数见表 1。由表 1 可知,在 1960—1990 年和 1991—2012 年前后两个时期,径流量与降雨量相关系数均为正,而与气温和蒸发量相关系数均为负,即灞河流域径流量随着降雨量增加而增加,随着气温升高和蒸发量加大而减少。由图 8 可见看出,1960—1990 年灞河流域径流量与降雨量的线性拟合程度最好, $R^2 = 0.7745$,说明降雨量对径流量的影响最大;气温与径流量的决定系数较小, $R^2 = 0.2296$;蒸发量与径流量的决定系数仅为 0.1267,说明蒸发量与径流量相关性最弱。同样在 1991—2012 年间,降雨径流的决定系数($R^2 = 0.5184$)高于气温径流($R^2 = 0.1793$)和蒸发径流($R^2 = 0.1627$)的决定系数。

降雨对地表土壤的侵蚀是泥沙的主要补给,尤其是暴雨对泥沙的影响最大,因此降雨量在一定程度上影响泥沙的来源,气温和蒸发量虽然不直接参与输沙量的变化,但它们通过影响径流量间接地改变输沙量^[10-12]。由表 1 可知,在 1960—1990 年和 1991—2012 年两阶段输沙量与降雨量及蒸发量的相关系数为正,而与气温的相关系数为负,即灞河流域输沙量随着降雨量和蒸发量的增加而增加,随着气温的升高而减少。从图 8 可以看出,1960—2012 年灞河流域两时期的降雨量与输沙量的线性相关性都较好, R^2 分别为 0.2976、0.2018,而输沙量与气温及蒸发决定系数都较差, $R^2 < 0.1$,说明两阶段的气温及蒸发与输沙量之间不具有相关性。

表 1 径流泥沙与气候因子相关系数

	降雨量		气温		蒸发量	
	1960— 1990 年	1991— 2012 年	1960— 1990 年	1991— 2012 年	1960— 1990 年	1991— 2012 年
径流量	0.88	0.72	-0.4792	-0.4234	-0.3559	-0.4044
输沙量	0.5455	0.4492	-0.0436	-0.1688	0.0245	0.0424

5.2 灰色关联分析

选取灞河流域 1960—2012 年的逐年平均水沙

数据及年降雨量、年均蒸发量、年平均气温数据进行分析。首先以 1960—1990 年年均径流量和年均输沙量为母序列 $Y_i(i = 1, 2)$;其次以 1960—1990 年降雨量、年平均气温、年均蒸发量为子序列,分别设为 X_1 、 X_2 和 X_3 ;采用 DPS 数据处理软件,运用灰色关联度分析模块,在分析过程中首先对数据进行标准化变换,分辨系数取 0.1,参数 $\Delta_{\min}$ 取值为 0,输出灰色关联度矩阵,结果见表 2。

表 2 1960—1990 年水沙与气候因子的灰色关联度计算结果

母序列	子序列		
	X_1	X_2	X_3
Y_1	0.5360	0.2875	0.3177
Y_2	0.4288	0.3703	0.3688

从表 2 可以看出,1960—1990 年各气候因子序列对母序列径流量的关联度为: $r_{12}(=0.2875) < r_{13}(=0.3177) < r_{11}(=0.5360)$,这说明影响灞河流域径流量较为密切的气候因子是降雨量,径流量的变化波动趋势与降雨量变化波动趋势较为一致,其次是蒸发量,最后是气温。从母序列输沙量与气候因子序列关联度来看: $r_{23}(=0.3688) < r_{22}(=0.3703) < r_{21}(=0.4288)$,对灞河流域输沙量影响较为密切的气候因子同样是降雨量。

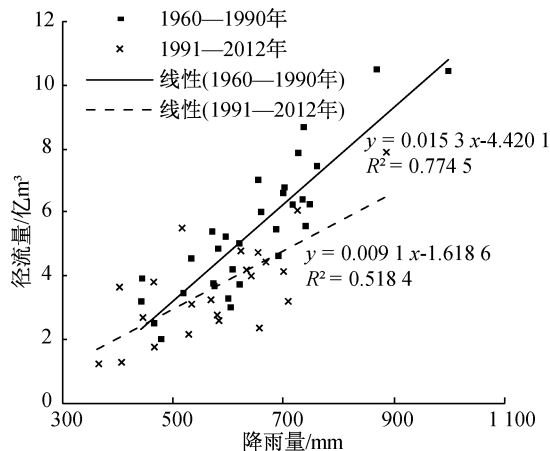
以 1991—2012 年年均径流量和年均输沙量为母序列 $Y_m(m = 3, 4)$;以 1991—2012 年均降雨量、年平均气温、年均蒸发量为子序列,分别设为 X_4 、 X_5 和 X_6 ,进行灰色关联计算,结果如表 3。

表 3 1991—2012 年水沙与气候因子的灰色关联度计算结果

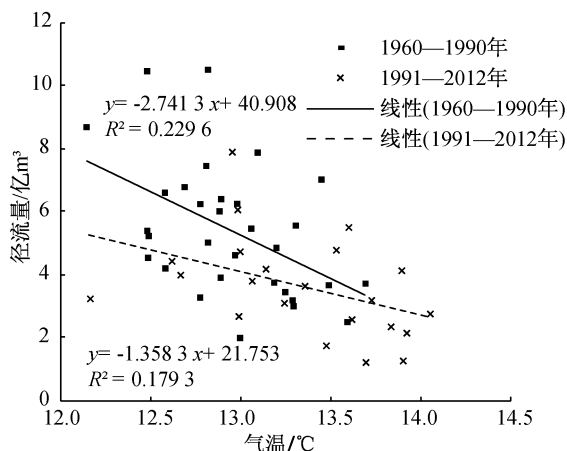
母序列	子序列		
	X_4	X_5	X_6
Y_3	0.4935	0.2948	0.2449
Y_4	0.4344	0.3388	0.3343

从表 3 可以看出,1991—2012 年各气候因子序列对母序列径流量的关联度为: $r_{36}(=0.2449) < r_{35}(=0.2948) < r_{34}(=0.4935)$,这说明近 22 年影响灞河流域径流量较为密切的气候因子是降雨量,其次是气温,最后是蒸发量。从母序列输沙量与气候因子序列关联度来看: $r_{46}(=0.3343) < r_{45}(=0.3388) < r_{44}(=0.4344)$,近 22 年对灞河流域输沙量影响较为密切的气候因子也是降雨量。

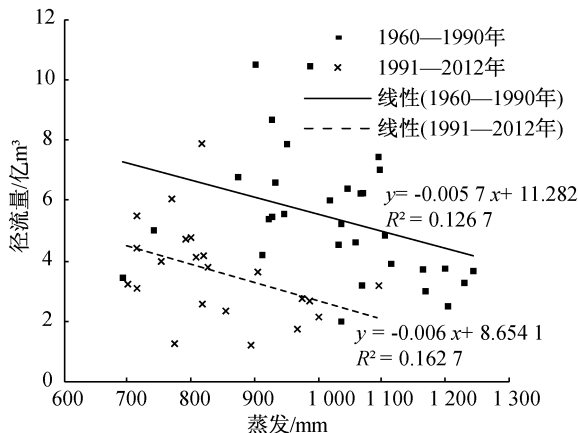
综上可知,灰色关联度计算结果与相关性计算结果基本一致,仅 1960—1990 年间蒸发径流的灰色关联度比气温径流的灰色关联度高,相关性计算结果不一致,这可能与用灰色关联度分析时变量间的量纲不一致有关,因此还需建立模型进一步分析。



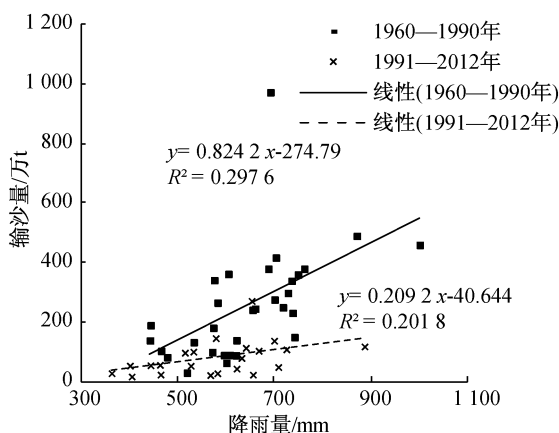
(a) 降雨与径流



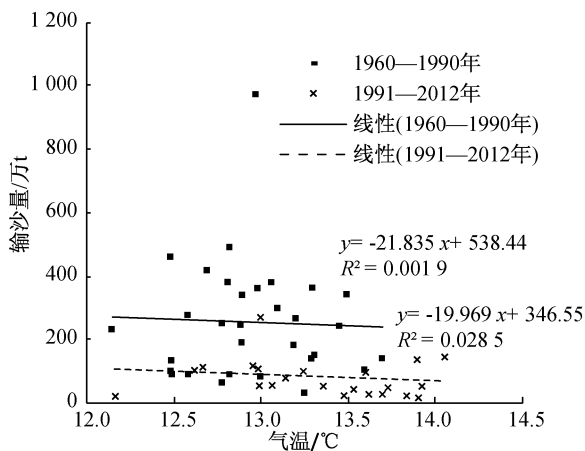
(b) 气温与径流



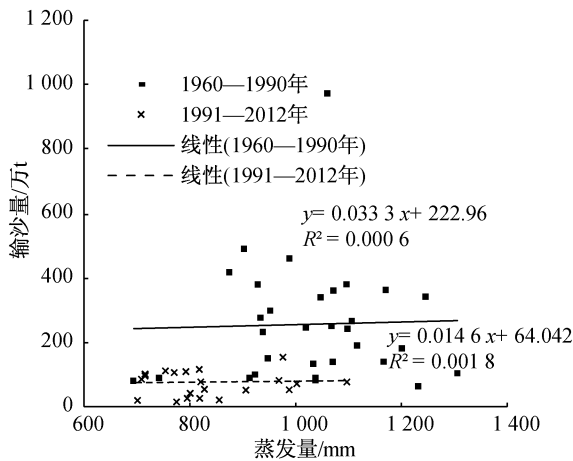
(c) 蒸发与径流



(d) 降雨与输沙



(e) 气温与输沙



(f) 蒸发与输沙

图8 灞河流域降雨量、气温、蒸发量与水沙关系

5.3 多元线性回归模型

为了进一步分析气候因子与水沙的关系,基于多元线性回归法建立了气候-水沙量化关系模型,其基本模型公式为

$$Q = aP + bT + cE + d \quad (5)$$

式中: Q 为径流量, m^3/s ; P 为降雨量, mm ; T 为气温, $^{\circ}\text{C}$; E 为蒸发量, mm ; a 、 b 、 c 、 d 均为常数。

根据多元线性回归分析,以 1960—1990 年和 1991—2012 年灞河流域降雨量、气温、蒸发量为自

变量,以径流量为因变量,进行多元线性回归分析,得回归方程:

$$Q_1 = 0.014P_1 - 0.94T_1 - 0.001E_1 + 10.093 \quad (6)$$

$$Q_2 = 0.008P_2 - 0.672T_2 - 0.002E_2 + 9.899 \quad (7)$$

式中: Q_1 、 P_1 、 T_1 、 E_1 分别为 1960—1990 年的径流量、降雨量、气温和蒸发量; Q_2 、 P_2 、 T_2 、 E_2 分别为 1961—2012 年的径流量、降雨量、气温和蒸发量。

经计算,1960—1990 年和 1991—2012 年的检验值 F 分别为 39.942 和 9.654,显著性概率均为 0,

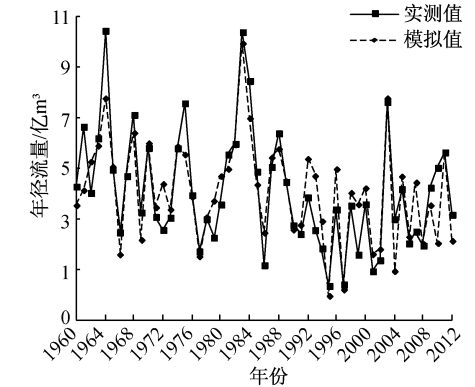
说明回归效果显著,对各系数进行 t 检验,结果除 1960—1990 年间蒸发量以外各显著性水平都小于 0.05,说明在 1960—1990 年间自变量降雨量、气温对因变量径流量的影响都很显著,与灰色关联度分析不一致。从回归方程看,两个时期的降雨量与径流量呈正相关,气温和蒸发量与径流量呈负相关,与相关性分析相一致。对于灞河流域年径流量来说,当气温和蒸发量不变时,降雨量每增加 1 mm,两阶段的年径流量分别增加 0.014 亿 m^3 和 0.008 亿 m^3 。

以 1960—2012 年灞河流域降雨量、气温、蒸发量为自变量,以输沙量为因变量,进行回归分析:

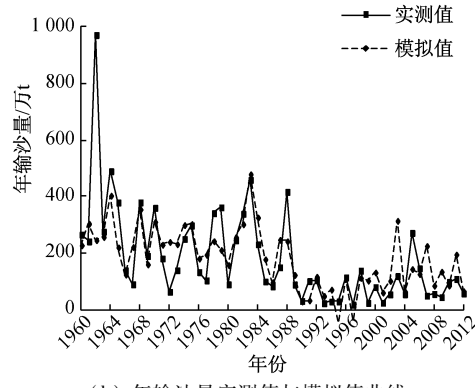
$$S = 0.668P - 29.267T + 0.336E - 162.735 \quad (8)$$

经计算,检验值 F 为 10.459,显著性概率为 0,说明输沙量与径流量一样回归效果显著,对各系数进行 t 检验,结果显示除蒸发量外,降雨量和气温显著性水平都小于 0.05,说明自变量降雨量、气温对因变量输沙量的影响显著,与灰色关联分析一致。从回归方程看,降雨量和蒸发量与输沙量呈正相关,气温与输沙量呈负相关,与相关性分析相一致。对于灞河流域年输沙量来说,当气温和蒸发量不变时,降雨量每增加 1 mm,年输沙量增加 0.668 万 t。

灞河流域近 53 年的水沙实测值与模拟值的比较如图 9,可以看出两者具有较好的拟合度,相关系数分别为 0.863 和 0.625,说明多元线性回归模型能较好地拟合灞河流域径流泥沙的变化情况。



(a) 年径流量实测值与模拟值曲线



(b) 年输沙量实测值与模拟值曲线

图 9 灞河流域水沙实测值和模拟值的比较

6 结 论

a. 灞河流域水沙整体呈下降趋势,1991—2012 年的年径流量和年输沙量相对 1960—1990 年分别减少了 32.7% 和 68.6%。径流量的 60% 集中在汛期(7—10 月),输沙量主要集中在 6—9 月,约占全年输沙量的 90%,汛期与多沙期不同步,多沙期比汛期稍提前。径流量与输沙量呈良好的乘幂关系,拟合程度达到 0.49。

b. 1991—2012 年灞河流域的降雨量、蒸发量都较 1960—1990 年呈明显减少趋势,而气温则呈明显上升趋势。

c. 选用相关性分析、灰色关联度分析、多元线性回归模型得出 1960—1990 年降雨量对径流量的影响最大,其次是气温,最后是蒸发量;而在 1991—2012 年影响径流量的气象因子依次是降雨量、蒸发量、气温。两个阶段降雨量都是灞河流域输沙量变化的主要因素,其次是气温,蒸发量对输沙量的影响较小。多元线性回归法能较好地模拟径流泥沙,所建立的线性回归模型具有较好的实用性。

参考文献:

[1] 刘红英. 降水变化和人类活动对北洛河上游水沙特性的影响研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2012.

[2] 贺瑞敏, 张建云, 鲍振鑫, 等. 海河流域河川径流对气候变化的响应机理[J]. 水科学进展, 2015, 26(1):1-9. (HE Ruimin, ZHANG Jianyun, BAO Zhengxin, et al. Response of runoff to climate change in the Haihe River basin[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(1):1-9. (in Chinese))

[3] 贾宪, 赵长森. 灞河流域气候变化及其对径流的影响研究[J]. 电网与清洁能源, 2014, 2(11):114-117. (JIA Xian, ZHAO Changsen. Study on impacts of climate changes on the runoff of the Bahe River[J]. Power Grid and Clean Energy, 2014, 2(11):114-117. (in Chinese))

[4] 魏炳乾, 杨川, 石忠科, 等. 灞河水沙特性变化分析[J]. 水资源与水工程学报, 2008, 19(2):38-40. (WEI Bingqian, YANG Chuan, SHI Zhongke, et al. Analysis on the changing characteristics of sediment and water in the Bahe River[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2008, 19(2):38-40. (in Chinese))

[5] 王战平. 灞河流域水文特性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(5):176-179. (WANG Zhanping. Hydrologic characteristics analysis in Bahe River Basin[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2009, 20(5):176-179. (in Chinese))

(下转第 122 页)

管部门以此为契机,开始实施以限采为主导的“压”、“替”、“节”、“保”、“补”、“管”、“经”等多种措施。2014 年初,洋河实现区域供水的同时,当地水行政主管部门开始实施封井压采工程,通过减少开采井数及减少开采量来进行地下水限采,用自来水逐步替代地下水解决当地企业及居民的工业及生活用水。

通过封填大批生产和生活用井,宿迁洋河地下水位明显上升,监测资料显示 2014 年 1 月至 12 月该地区地下水位上升了 5.38 m(由年初 47.69 m 升至 42.31 m),地下水限采效果显著,见图 5。

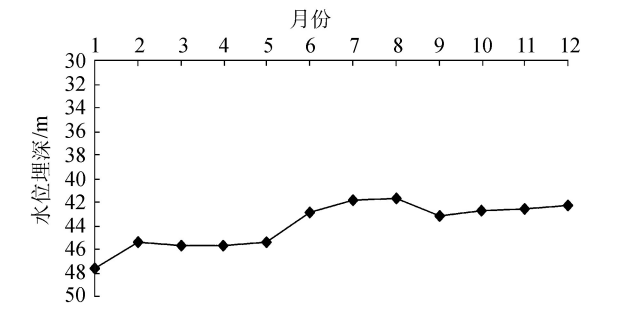


图 5 2014 年宿迁洋河地下水超采区水位动态变化

参考文献:

[1] 季红飞. 江苏省地下水超采区评价报告[R]. 南京:江苏省水利厅,江苏省地质调查研究院,2014: 98-99.

[2] 施小清,冯志祥,姚炳奎,等. 江苏省地下水水位控制红线划定研究[J]. 中国水利, 2015(1): 46-49. (SHI Xiaoqing, FENG Zhixiang, YAO Bingkui, et al.

Delimitation of red lines of groundwater level in Jiangsu Province[J]. China Water Conservancy, 2015(1):46-49. (in Chinese))

[3] 中华人民共和国水利部. SL286—2003 地下水超采区评价导则[S]. 北京:中国水利水电出版社,2003.

[4] 黄晓燕,冯志祥,李朗,等. 江苏省地下水超采区划分方法对比研究[J]. 水文地质工程地质,2014(6): 26-31. (HUANG Xiaoyan, FENG Zhixiang, LI Lang, et al. Contrastive analysis of division methods for groundwater-overdraft regions in Jiangsu [J]. Hydro-geological Engineering Geology, 2014(6):26-31. (in Chinese))

[5] 黄晓燕,冯志祥,李朗,等. 江苏省地下水超采区变化趋势分析[J]. 地下水, 2014, 36(4): 53-54. (HUANG Xiaoyan, FENG Zhixiang, LI Lang, et al. Trend analysis of groundwater overdraft in Jiangsu [J]. Groundwater, 2014, 36(4): 53-54. (in Chinese))

[6] 于军. 长江三角洲苏锡常地区环境地质调查评价[R]. 南京:江苏省地质调查研究院, 2002:77.

[7] 冯志祥. 苏锡常地区地下水压采效果后评估报告[R]. 南京:江苏省地质调查研究院,2010: 93-94.

[8] 施小清,冯志祥,姚炳奎,等. 苏锡常地区深层地下水禁采后土层变形特征分析[J]. 第四纪研究, 2014, 34(5): 1062-1071. (SHI Xiaoqing, FENG Zhixiang, YAO Bingkui, et al. Study on the deformation characteristics of soil layers after banning groundwater pumping in Su-Xi-Chang area [J]. Quaternary Research, 2014, 34(5): 1062-1071. (in Chinese))

(收稿日期:2016-09-09 编辑:彭桃英)

(上接第 105 页)

[6] 贺伟,布仁仓,熊在平,等. 1961—2005 年东北地区气温和降水变化趋势[J]. 生态学报, 2013,33(2):519-531. (HE Wei, BU Rencang, XIONG Zaiping, et al. Characteristics of temperature and precipitation in Northeastern China from 1961 to 2005[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2):519-531. (in Chinese))

[7] 穆艾塔尔·赛地,热孜燕,阿不都·沙拉木. 1957—2009 年乌鲁木齐河径流与气候变化的对应关系[J]. 水土保持研究, 2015, 22(5): 289-293. (MUATTAR Saydi, REZIYAN, SHALAMU Abudu, et al. Corresponding relationship between the runoff and climate change in the upper Urumqi River Basin during the period from 1957 to 2009 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(5):289-293. (in Chinese))

[8] 折远洋. 天山乌鲁木齐河山区径流特征及其对气候变化响应研究[D]. 西安:西北师范大学, 2013.

[9] 黄晓荣,奚圆圆,李晶晶,等. 荣经河流域径流变化过程分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),

2016, 37(4):67-70. (HUANG Xiaorong, XI Yuanyuan, LI Jingjing, et al. The analysis of runoff variation in Yingjing River Basin [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Nature Science),2016, 37(4):67-70. (in Chinese))

[10] 王璐. 黄河下游水沙演变及对湿地自然植被的影响研究[D]. 郑州:郑州大学, 2013.

[11] 原志华. 近 50 年来汾河水沙演变规律及驱动力研究[D]. 西安:陕西师范大学, 2009.

[12] 李志威,王兆印,田世民,等. 黄河源水沙变化及与气温变化的关系[J]. 泥沙研究, 2014(3):28-35. (LI Zhiwei, WANG Zhaoyin, TIAN Shimin, et al. Variation of streamflow and sediment discharge rate and relationship with temperature change in Yellow River source area[J]. Journal of Sediment Research, 2014(3): 28-35. (in Chinese))

(收稿日期:2016-11-30 编辑:徐娟)