

# 基于 Budyko 假设的清水河和白河流域 径流变化及其影响因素分析

李赞<sup>1,2</sup>, 李博睿<sup>1,2</sup>, 张益闽<sup>1,2</sup>, 王伟<sup>1,2</sup>, 张良<sup>3</sup>, 张飘<sup>1,2</sup>, 裴宏伟<sup>1,2,4</sup>

(1.河北建筑工程学院, 河北 张家口 075000; 2.河北省水质工程与水资源综合利用重点实验室, 河北 张家口 075000; 3.河北省张家口水文勘测研究中心, 河北 张家口 075000; 4.北京大学 城市与环境学院, 北京 100871)

**摘要:** [目的] 综合分析清水河流域和白河流域的年径流变化及其主导因素, 进一步揭示永定河流域和潮白河流域实际径流的变化及其影响因素, 旨在为张家口地区水资源规划与管理提供理论依据。[方法] 基于 Budyko 模型以永定河上游的清水河流域和潮白河上游的白河流域为研究对象构建流域水热耦合平衡方程, 精确计算潜在蒸散发对主要气象因子的敏感系数, 再通过敏感系数计算径流对主要气象因子的弹性系数, 进一步计算气候变化和人类活动对径流变化的贡献率。[结果] ①近年来清水河流域和白河流域各气象因子的弹性系数呈现增加的趋势, 这种趋势揭示了这两个流域日益增强的气候—水文耦合关系。和白河流域相比, 清水河流域的水文过程对气候变化更加敏感。②人类活动对清水河流域和白河流域的径流量变化起主导作用。清水河流域和白河流域人类活动对径流变化的影响率分别是 65.37% 和 83.90%。③较之于 Fu, Choudhury-Yang 和 Wang-Tang 公式, Zhang 公式在清水河流域和白河流域具有更好的适用性, 能较好地模拟流域的实际蒸散发量,  $R^2$  达到 0.97。[结论] 人类活动对研究区径流变化的影响率为 65.37%~83.90%, 气候因素的影响率为 16.10%~34.63%, 今后应同时考虑气候和人类活动的影响, 继续加强水分限制区的径流蒸散发过程机理研究, 以保障水资源安全。

**关键词:** 清水河流域; 白河流域; 径流归因分析; Budyko 模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)03-0056-09

中图分类号: TV121

**文献参数:** 李赞, 李博睿, 张益闽, 等. 基于 Budyko 假设的清水河和白河流域径流变化及其影响因素分析 [J]. 水土保持通报, 2024, 44(3): 56-64. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.03.007; Li Yun, Li Borui, Zhang Yimin, et al. Analysis of runoff changes in Qingshui River and Baihe River basins based on Budyko hypothesis [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(3): 56-64.

## Analysis of Runoff Changes in Qingshui River and Baihe River Basins Based on Budyko Hypothesis

Li Yun<sup>1,2</sup>, Li Borui<sup>1,2</sup>, Zhang Yimin<sup>1,2</sup>, Wang Wei<sup>1,2</sup>, Zhang Liang<sup>3</sup>, Zhang Piao<sup>1,2</sup>, Pei Hongwei<sup>1,2,4</sup>

(1. Hebei University of Architecture, Zhangjiakou, Hebei 075000, China; 2. Hebei Key Laboratory of

Water Quality Engineering and Comprehensive Utilization of Water Resources, Zhangjiakou, Hebei

075000, China; 3. Zhangjiakou Research Centre for Hydrological Survey of Hebei Province, Zhangjiakou,

Hebei 075000, China; 4. College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** [Objective] The annual runoff changes and leading factors in Qingshuihe River basin and Baihe River basin were comprehensively analyzed, and the actual runoff changes and influencing factors in the two river basins were further revealed, in order to provide theoretical basis for water resources planning and management in Zhangjiakou region. [Methods] Based on Budyko model, the study was conducted for the Qingshui River basin in the upper reaches of the Yongding River and the Baihe River basin in the upper reaches of the Chaobai River. Coupled water-heat balance equations for the basins were constructed. Sensitivity coefficients of potential evapotranspiration to major meteorological factors were accurately

收稿日期: 2023-11-09

修回日期: 2023-12-11

资助项目: 河北省科技厅重点研发计划“张家口首都‘两区’生态环境保护与水资源涵养技术研究与示范”(22377001D); 河北省教育厅重点项目“北方农牧交错带典型饲草农田水分传输过程与适水灌溉制度研究”(ZD2022015); 河北省科技厅外专引智项目“冀西北集约农业环境评估模型联合研发”

第一作者: 李赞(1999—), 女(汉族), 山西省长治市人, 硕士研究生, 研究方向为变化环境下流域水文过程演变。Email: ly2021223104@hebi-ace.edu.cn.

通信作者: 裴宏伟(1987—), 男(汉族), 河北省张家口市人, 博士, 教授, 主要从事生态水文与水资源管理方面的研究。Email: hwpei@sjziam.ac.cn.

calculated, and then elasticity coefficients of runoff to major meteorological factors from the sensitivity coefficients were calculated. Finally, the contributions of climate change and human activities to runoff changes were calculated. [Results] ① The elasticity coefficients of meteorological factors in the Qingshui River basin and the Baihe River basin showed increasing trends in recent years, indicating that the increasing climate-hydrology coupling in these two basins and the hydrological processes in the Qingshui River basin were more sensitive to climate change than the coupling and processes in the Baihe River basin. ② Human activities dominated changes in the runoff of the Qingshui River basin and the Baihe River basin. The contribution rates of human activities to runoff changes in the Qingshui River basin and the Baihe River basin were 65.37% and 83.90%, respectively. ③ Compared with the Fu, Choudhury-Yang, and Wang-Tang formulas, the Zhang formula had better applicability in Qingshui River basin and the Baihe River basin. Actual evapotranspiration from the basins was modeled better, with the  $R^2$  value reaching 0.97. [Conclusion] The contribution of human activities to runoff changes in the study area ranged from 65.37% to 83.90%, and the contribution of climatic factors ranged from 16.10% to 34.63%. In the future, the impact of climate and human activities should be considered at the same time. Continued efforts should be made to strengthen research on the mechanisms and processes of runoff and evapotranspiration in water limited environments, therefore to ensure the security of water resources.

**Keywords:** Qingshui River basin; Baihe River basin; runoff attribution analysis; Budyko hypothesis

径流信号是气候变化和人类活动的重要指示器,同时对生产生活具有重要的影响。以流域为单元聚焦气候变化和人类活动对径流过程的影响,逐渐成为当前的研究热点<sup>[1-2]</sup>。近年来,受人类活动和环境变化的共同影响,京津冀协同发展、首都水源涵养功能区和生态环境支撑区建设等重大战略的区域气候问题与水资源问题互相交织,同时也提出了更高的水资源需求<sup>[3]</sup>。在此背景下,位于京津冀地区上风上水的永定河、潮白河流域的产汇流规律日益受到重视<sup>[4]</sup>。近 50 a 来永定河水系上游的清水河和潮白河水系上游的白河流域径流量明显减少,但是这种减少过程中气候变化和人类活动的影响却少见有定量的研究。

Budyko 框架是当前国际上研究气候变化对水资源影响的一个重要理论框架,已有广泛应用<sup>[5]</sup>。Xu Xiangyu 等<sup>[6]</sup>基于 Budyko 假说的水热耦合平衡方程研究了海河流域 33 个小流域径流减少的主要原因,认为海河流域径流变化的原因是气候变化和土地利用。Zhang Ke 等<sup>[7]</sup>使用基于 Budyko 框架的方法以永定河流域石匣里和响水堡子流域为研究对象,研究结果表明人类活动是径流量减少的主要原因,降水量是主要气候因子。Yang Lin 等<sup>[8]</sup>选取中国 64 个流域,采用 Budyko 假说的 Choudhury-Yang 方程评估降水、径流、潜在蒸散和地表变化的敏感性,结果表明径流对降水和地表变化更敏感,地表变化是辽河流域、海河流域、黄河流域和淮河流域径流量变化的主要原因。王晓颖等<sup>[9]</sup>采用基于 Budyko 假设的水量平衡法评估白河流域气候变化和人类活动对径流变化的影响,结果表明人类活动是白河流域径流量变化

的主要原因。根据现有研究,Budyko 假设的流域水热耦合平衡方法概念清晰,参数少且计算简单,其中以弹性系数法为代表,是进行流域径流量变化归因分析的有效方法<sup>[10]</sup>。但前人使用 Budyko 公式进行定量分析时少有对参数进行率定及验证,而是直接选用经验参数,因此,本文通过使用模拟分析中的单变量求解功能,拟合及验证参数,优选出最适用于清水河流域和白河流域的 Budyko 公式之后再行径流变化归因分析计算。

本文选择永定河上游清水河流域和潮白河上游白河流域,基于 Budyko 模型,通过分析近 50 a 的实测径流变化,定量评估了气候变化和人类活动对实测径流量的影响。首先,通过多元线性回归的方法计算各气象因子对潜在蒸散发的敏感性;其次,基于流域水热耦合平衡模型,计算清水河流域和白河流域年径流量变化的各气象因子的弹性系数,即各气象因子对流域年径流量的影响程度;最后,利用各气象因子的弹性系数,计算流域的年径流量在突变年份前后的变化量和气候与人类活动分别对径流变化的影响率大小。综合分析清水河流域和白河流域的年径流变化及其主导因素,进一步揭示永定河流域和潮白河流域实际径流的变化及其影响因素,旨在为张家口地区水资源规划与管理提供理论依据。

## 1 研究区概况

清水河位于河北省张家口市(流域边界几乎与崇礼区行政边界重叠),北邻内蒙古高原,400 mm 等降水量线从本流域穿过<sup>[11]</sup>。清水河流域包括东沟、正

沟、西沟 3 个主要的子流域(图 1),是海河流域永定河水系洋河上游的主要支流<sup>[12]</sup>。该流域雨热同期,春秋风多雨少,冬季寒冷漫长,春季回温较快,大风日数较多。流域多年平均水面蒸发量为 850~900 mm<sup>[13]</sup>,多年平均气温 3.9 °C,多年平均降水量约 422 mm,其中 6—9 月降水约占全年的 70%<sup>[14-15]</sup>。

白河发源于河北省张家口市沽源县九龙泉(流域主体部分在赤城县中西部),流入下堡水文站控制断面(图 1),是潮白河水系上的一条较大的支流。白河流域东南与北京市延庆区毗邻,属于半湿润、半干旱的温带大陆性季风气候区,春季雨雪较少,夏季炎热,蒸发量大<sup>[16]</sup>,流域多年平均气温 7.3~10.3 °C,温差较大,下堡水文站多年平均水面蒸发量为 800~900 mm,年降水的 70%~80%集中在 6—9 月,多年平均降水量为 511 mm<sup>[17]</sup>。

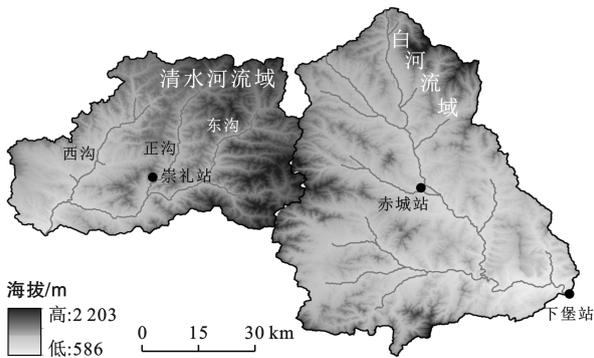


图 1 研究区地形图及水文气象站点分布

Fig.1 Topographic map of study area and distribution of hydrometeorological stations

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

清水河和白河的气象数据分别采用崇礼气象站(1960—2020年)、赤城气象站(1960—2020年)有观测数据以来的日降水、日均气温资料,该资料来源于河北气象局与中国气象数据共享网。清水河水文数据采用了张家口水文站 1960—2020 年的日均径流量观测数据,白河水文数据采用了下堡水文站 1970—2020 年的日均径流量观测数据,数据来源于河北省张家口水文勘测研究中心。

### 2.2 研究方法

2.2.1 Budyko 理论模型法 Budyko 通过分析全球的水量和能量平衡,认为在较长时间尺度内,陆面实际蒸散量(ET)主要由降水(P)和潜在蒸散发(ET<sub>0</sub>)的平衡关系决定的,也就是著名的 Budyko 假设<sup>[18]</sup>,并提出陆面蒸散发满足以下两个边界条件<sup>[19]</sup>:

在极端湿润的条件下,能量最大程度地用于蒸散发,实际蒸散量接近潜在蒸散发量:

$$ET_0/P \rightarrow 0 \text{ 时, } ET \rightarrow ET_0 \quad (1)$$

在极端干燥的环境下,实际蒸散量接近降水量,几乎所有的降水都转化为蒸发<sup>[20]</sup>:

$$ET_0/P \rightarrow \infty \text{ 时, } ET/P \rightarrow 1 \quad (2)$$

Budyko 提出了满足两边条件并且与水量平衡和能量平衡相互独立的水热耦合平衡方程,此边界条件的水热耦合平衡方程的一般形式<sup>[21]</sup>为:

$$\frac{ET}{P} = f\left(\frac{ET_0}{P}\right) \quad (3)$$

自从 Budyko 假设提出以来,吸引了众多学者的广泛关注,进入 21 世纪后,鉴于不同的流域特征研究者们从实际出发,针对不同的流域特征提出对应的 Budyko 公式,目前已有 4 种较为成熟且被广泛使用的 Budyko 公式:

中国气候学家傅抱璞先生于 1981 年以集水区的水文与气象为基础,对 Budyko 假定作了一种新的分析表达式<sup>[22]</sup>:

$$\frac{ET}{P} = 1 + \frac{ET_0}{P} - \left[1 + \left(\frac{ET_0}{P}\right)^\omega\right] \frac{1}{\omega} \quad (4)$$

2011 年张橹分析了全球的径流数据,建立了 Budyko 公式<sup>[23]</sup>:

$$\frac{ET}{P} = \frac{1 + \omega \frac{ET_0}{P}}{1 + \omega \frac{ET_0}{P} + \left(\frac{ET_0}{P}\right) - 1} \quad (5)$$

清华大学的杨汉波等人在 Mezentssev 和 Choudhury 的结论假设基础上进行了深入研究,并在此基础上得到 Mezentssev-Choudhury-Yang 公式<sup>[24]</sup>:

$$ET = \frac{PET_0}{(P^\omega + ET_0^\omega) \frac{1}{\omega}} \quad (6)$$

王定保和唐寅引入一个新的参数  $\epsilon$ ,受植被特性控制,建立了平均年时间尺度的单参数 Budyko 模型<sup>[25]</sup>:

$$\frac{ET}{P} = \frac{1 + \frac{ET_0}{P} - \sqrt{\left(1 + \frac{ET_0}{P}\right)^2 - 4\epsilon(2-\epsilon)} \frac{ET_0}{P}}{2\epsilon(2-\epsilon)} \quad (7)$$

2.2.2 参数  $\omega$  拟合及验证方法 由于不同研究区其下垫面条件存在差异,故应用 Budyko 公式时参数  $\omega$  的选用不可使用单一经验参数,需针对不同流域基于水量平衡方程估算结果进行率定和验证,检验结果合格后方可用于后续计算。具体拟合步骤如下<sup>[26]</sup>:

(1) 将研究区的降水数据、径流数据及实际蒸散发数据(水量平衡公式估算结果)和潜在蒸散发数据(彭曼公式计算结果)代入 Budyko 公式中。

(2) 采用模拟分析中单变量求解功能(默认最大误差 0.1%)反推参数  $\omega$ ,并在研究区进行验证计算。

为了检验 Budyko 公式的适用性,定量评价参数拟合精度及计算结果的合理性,采用纳什效率系数(NSE)、平均相对误差(MRE)和决定性系数( $R^2$ )来描述本文构建的  $\omega$  估算各流域由 Budyko 公式计算的年蒸散发量(模拟)与水量平衡计算得到的年蒸散发量(实测)间的偏差状况。

$R^2$  越接近 1 时,模型模拟误差越小。当 NSE 越接近 1 时,MRE 越接近于 0 时,模拟效果越优。

2.2.3 弹性系数法 径流对不同因素变化的敏感程度不同,可以用弹性系数法衡量该敏感性<sup>[27]</sup>。径流的弹性定义为单位因素变化引起的流域径流变化程度,即某一因素变化 1% 引起的年径流量相对于多年平均值变化的百分比,其计算公式<sup>[28]</sup>为:

$$\epsilon_{x_i} = \frac{\partial R}{\partial x_i} \times \frac{x_i}{R} \quad (8)$$

弹性系数为正,表明径流随此因素的增大而增大;当弹性系数为负数时,表明径流随此因素的增大而减少;当弹性系数越大,其对径流的影响也越大。

2.2.4 径流变化归因分析 基准期的平均年径流量被记为  $R_1$ ,变化期的平均年径流量被记为  $R_2$ 。年径流量从基准期到变化期的变化量可写为:

$$dR = R_1 - R_2 \quad (9)$$

各气象因子对径流变化的定量影响量公式<sup>[29]</sup>:

$$dR_x = \epsilon_x \frac{R}{x} dx \quad (10)$$

式中: $dR_x$  代表相应因子对径流变化的影响量; $\epsilon_x$  代表各因子对径流变化的弹性系数; $x$  代表影响径流变化的某一气候因子; $dx$  代表某一气候因子的变化量。

气候变化对径流变化的影响量为:

$$dR_{\text{climate}} = dR_P + dR_{\text{ET}_0} \quad (11)$$

式中: $dR_P$ ,  $dR_{\text{ET}_0}$  分别代表年平均降水量、潜在蒸散发量的变化量。

人类活动对径流变化的影响量为:

$$dR_H = dR - dR_C \quad (12)$$

各因子对径流变化的影响率计算公式为:

$$\eta_{x_i} = \frac{dR_{x_i}}{dR} \times 100\% \quad (13)$$

式中: $\eta_{x_i}$  为某因子对径流变化的影响率。

气候变化对流域径流的影响率为:

$$\eta_C = |\eta_P| + |\eta_{\text{ET}_0}| \quad (14)$$

人类活动对径流变化的影响率为:

$$\eta_H = 1 - \eta_C \quad (15)$$

式中: $\eta_C$  为气候变化对径流的影响率; $\eta_H$  为人类活动对径流的影响率。

### 3 研究结果

#### 3.1 不同 Budyko 方程中关键参数的适用性比较

流域的蒸散发是水量平衡和能量平衡共同作用的结果,通过单变量求解的方法对 Budyko 公式中参数  $\omega$  进行率定,并验证了 Fu, Choudhury-Yang, Wang-Tang 和 Zhang 主要 Budyko 方程在清水河流域和白河流域的适用性(图 2—3)。研究表明(详见表 1),Zhang 等提出的 Budyko 方程在清水河流域张家口水文站和白河流域下堡水文站的模拟结果最优,与水量平衡计算结果在率定期及验证期均拟合最好,统计指标 NSE 达到 0.80 以上,MRE 均小于 5.0%, $R^2$  均大于 0.97。

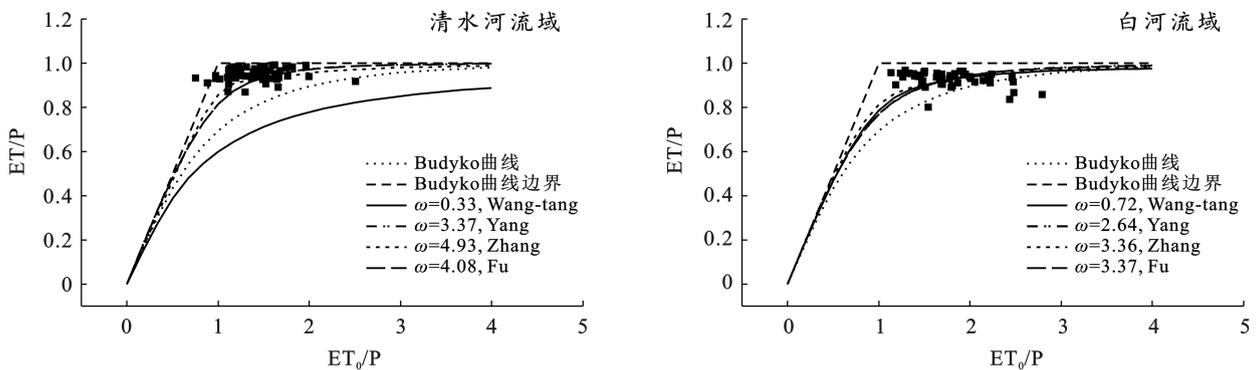


图 2 清水河流域和白河流域 Budyko 方程中  $\omega$  的近似求解

Fig. 2 Approximate solution of  $\omega$  in Budyko equation for Qingshui River basin and Baihe River basin

#### 3.2 敏感性分析

3.2.1 潜在蒸散对主要气象因子的敏感性分析 基于修正的 Penman-Monteith 模型得到潜在蒸散发全微分方程,通过多元线性回归方法,先求出式中所对应的各变量的偏导部分,计算清水河流域和白河流域

1960—2020 年崇礼气象站和赤城气象站  $\text{ET}_0$  对风速、太阳辐射、平均气温和实际水汽压的偏导数,也称为敏感系数,分别记作  $S'(u_2)$ ,  $S'(R_s)$ ,  $S'(T_{\text{mean}})$  和  $S'(e_a)$  (表 2—3)。对日敏感系数进行平均,即可得到 1960—2020 年清水河流域  $\text{ET}_0$  对 4 个气象因子的敏感系数

的季节值,对月均值进行平均,即可得到  $ET_0$ 。对 4 个气象因子的敏感系数的年值。根据式(8)可以分别计算

出 Budyko 框架构下水、潜在蒸散发、风速、太阳辐射、平均气温和实际水汽压对径流影响的具体弹性系数。

表 1 Budyko 公式估算流域年蒸散量的精度评估结果

Table 1 Results of accuracy assessment of Budyko's formula for estimating annual evapotranspiration in watersheds

研究区	站点名称	公式	$\omega$	统计指标					
				率定期(1960—1990)			验证期(1991—2020)		
				NSE	MRE	$R^2$	NSE	MRE	$R^2$
清水河流域	张家口水文站	Zhang	4.93	0.88	4.30	0.98	0.92	4.44	0.97
白河流域	下堡水文站		3.36	0.92	4.18	0.98	0.90	4.58	0.97
清水河流域	张家口水文站	Fu	4.08	0.81	4.97	0.97	0.75	6.14	0.95
白河流域	下堡水文站		3.37	0.89	4.75	0.98	0.86	5.09	0.96
清水河流域	张家口水文站	Choudhury-Yang	3.37	0.81	4.98	0.98	0.89	6.16	0.95
白河流域	下堡水文站		2.64	0.89	4.83	0.98	0.86	5.16	0.96
清水河流域	张家口水文站	Wang-Tang	0.33	0.72	6.36	0.97	0.85	7.64	0.96
白河流域	下堡水文站		0.72	0.91	4.26	0.98	0.88	4.69	0.96

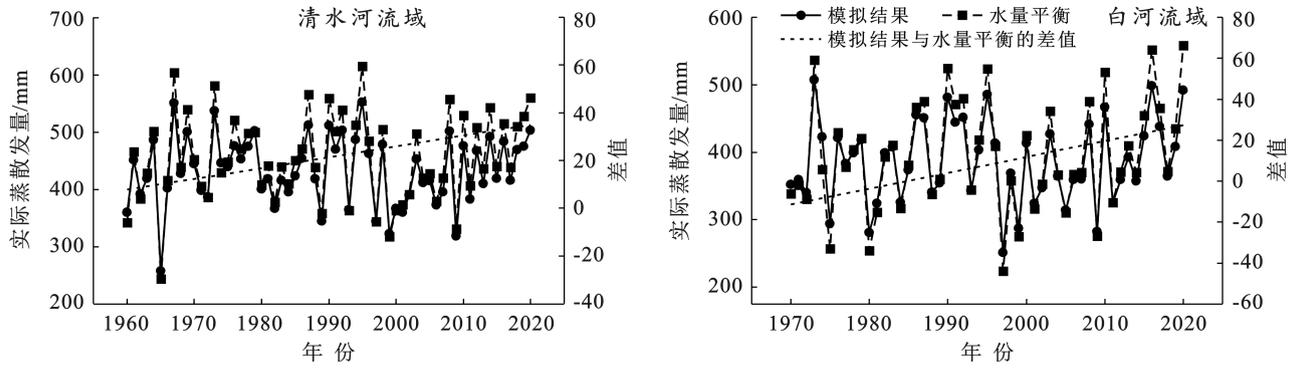


图 3 Zhang 公式与水量平衡结果拟合蒸散发效果

Fig.3 Zhang's formula and water balance results to fit effect of evapotranspiration

1960—2020 年清水河流域多年平均来看,4 个敏感系数中平均气温对  $ET_0$  的敏感系数最大,为 16.66,对实际水汽压的敏感系数次之,均为  $-0.12$ ,其后是太阳辐射,为 0.08,而对风速的敏感系数最小,仅为 0.05。以上结果说明,当太阳辐射、平均气温和风速降低 10%,则会导致  $ET_0$  响应减少 0.80%,166.60%,0.50%;然而实际水汽压降低 10%则反而会导致增加 1.20%。1960—2020 年白河流域从多年平均来看,4 个敏感系数中  $ET_0$  对平均气温的敏感系数最大,为 18.47,对实际水汽压的敏感系数次之,均为  $-0.71$ ,其后是太阳辐射,为 0.07,而对风速的敏感系数最小,仅为 0.04。以上结果说明,当太阳辐射、平均气温和风速降低 10%,则会导致  $ET_0$  相应减少 0.70%,184.70%和 0.40%;然而实际水汽压降低 10%则反而会导致  $ET_0$  增加 7.10%。在清水河流域和白河流域潜在蒸散发对平均气温的敏感性最大,对风速的敏感性最小。

表 2 清水河流域  $ET_0$  对气象因子的敏感性

Table 2 Sensitivity of  $ET_0$  to four meteorological factors in Qingshui River basin

项目	春季	夏季	秋季	冬季	全年
风速	-0.04	0.14	0.17	0.01	0.05
太阳辐射	0.08	0.10	0.07	0.03	0.08
平均气温	7.34	7.28	1.89	2.43	16.66
实际水汽压	-0.48	-0.16	-0.10	-0.23	-0.12

表 3 白河流域  $ET_0$  对气象因子的敏感性

Table 3 Sensitivity of  $ET_0$  to four meteorological factors in Baihe River basin

项目	春季	夏季	秋季	冬季	全年
风速	0.02	0.02	0.11	0.03	0.04
太阳辐射	0.05	0.12	0.08	0.02	0.07
平均气温	7.86	8.70	2.78	3.17	18.47
实际水汽压	-1.09	-0.38	-0.19	-1.24	-0.71

3.2.2 流域径流对主要气象因子响应 在对流域尺度进行深入研究时,采用了 Zhang 依据 Budyko 假设所提出的水热耦合平衡方程计算清水河流域和白河

流域年径流变化的各气象因子的弹性系数,即各气象因子对流域年径流量的影响程度。从总体上来看,径流和潜在蒸散发、风速、太阳辐射、平均气温呈负相关,即潜在蒸散发、风速、太阳辐射、平均气温的增大会导致径流减少,降水和实际水汽压呈正相关,降水和实际水汽压的增加会驱动径流增加。在清水河流域降水量的弹性系数波动范围为 0.45~18.88,潜在蒸散发的弹性系数波动范围为-18.52~-0.67,风速的弹性系数波动范围为-0.71~-0.03,太阳辐射的弹性系数波动范围为-12.16~-0.47,平均气温的弹性系数波动范围为-2.28~-0.06,实际水汽压的弹性系数波动范围为 0.02~0.51。在白河流域降水量的弹性系数波动范围为 0.27~8.17,潜在蒸散发的弹性系数波动范围为-6.24~-0.43,风速的弹性系数波动范围为-0.31~-0.02,太阳辐射的弹性系数波动范围为-3.29~-0.22,平均气温的弹性系数波动范围为-0.97~-0.08,实际水汽压的弹性系数波动范围为 0.08~1.20。1960—2020 年清水河流域和 1970—2020 年白河流域径流量对降水量、潜在蒸散发量、风速、太阳辐射、平均气温与实际水汽压的年弹

性系数见图 4。从图 4 中可以看出,各个气象因子的弹性系数呈现波动上升的趋势。清水河流域径流变化对各气象因子的弹性系数明显大于白河流域,表明在清水河流域径流变化对气候变化更为敏感。降水、相对湿度对径流变化有正向驱动作用,太阳辐射、平均气温、风速对径流变化有负向驱动作用。

在清水河流域和白河流域,对比弹性系数绝对值可知,降水>潜在蒸散发>太阳辐射。对弹性系数年际变化进行 M-K 趋势检验(见表 4),从整个研究阶段来看,清水河流域的降水、实际蒸散发、风速、太阳辐射、平均气温和实际水汽压的弹性系数的绝对值都呈极显著增加( $|Z| > 2.58$ ),且各弹性系数的 $|Z|$ 值 $\epsilon_{T_{mean}}$ 最大, $\epsilon_{ea}$ 次之, $\epsilon_{u_2}$ 最小,这表明近年来研究区各气象因子对流域年径流量的影响程度越来越大;白河流域 1970 至 2020 年的降水、实际蒸散发、风速、太阳辐射、平均气温和实际水汽压的绝对值呈显著增加( $|Z| > 2.58$ ),表明近年来降水量,潜在蒸散发量,风速、太阳辐射、平均气温和实际水汽压对径流量变化的影响程度也越来越大,充分揭示了清水河流域与白河流域之间气候与水文之间的耦合关系日趋紧密。

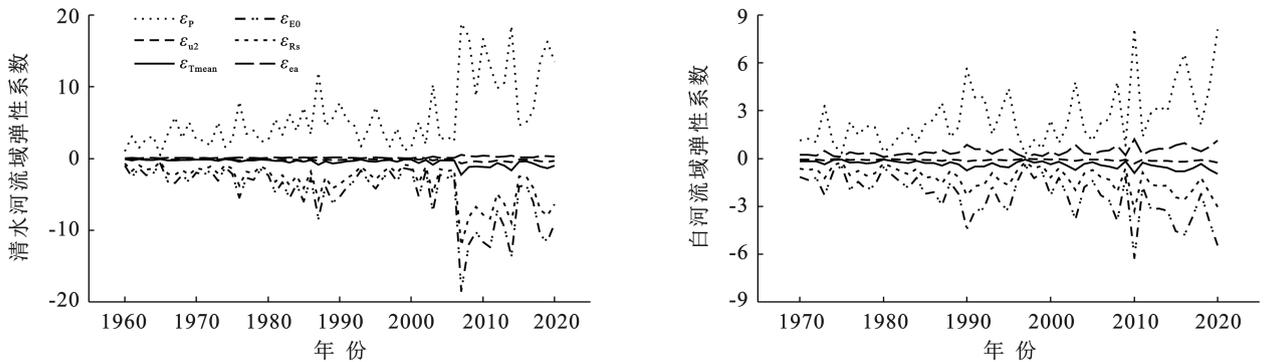


图 4 清水河流域和白河流域径流对主要气象因子的弹性系数年际变化

Fig.4 Interannual variation of elasticity coefficient of runoff to major meteorological factors in Qingshui River basin and Baihe River basin

表 4 清水河流域和白河流域各气象因子的弹性系数 M-K 趋势检验

Table 4 M-K trend test of elasticity coefficients of meteorological factors in Qingshui River basin and Baihe River basin

检验对象	清水河流域						白河流域					
	降水	潜在蒸散发	风速	太阳辐射	平均气温	实际水汽压	降水	潜在蒸散发	风速	太阳辐射	平均气温	实际水汽压
$ Z $ 值	4.13	-4.49	-3.46	-4.44	-5.44	4.57	3.46	-4.18	-3.17	-4.06	-4.51	4.06

注: $|Z|$ 大于 2.576 时,认为通过了 0.01 的显著性水平检验,具有显著的变化趋势。 $Z$  为正值表示序列存在上升趋势;反之,存在下降趋势<sup>[30]</sup>。

### 3.3 径流变化归因分析

利用径流对各气象因子的弹性系数,计算流域的年径流量在突变年份前后的变化量和气候与人类活动分别对径流变化的影响率大小。将研究时段的突变年份作为分界点来划分基准期和变化期两个子时

段,清水河流域 1960—2020 年期间,年径流序列在 1979 年发生突变,因此将年径流序列划分为两个子序列,1960—1978 年为基准期,1979—2020 年为变化期;白河流域 1970—2020 年期间,年径流序列在 1974 年发生突变,因此将年径流序列划分为两个子序列,

1970—1973 年为基准期,1974—2020 年为变化期,对年径流序列进行五年滑动平均后进行定量分析。利用公式(10)可以分别得到由降水量、潜在蒸散量、风速、太阳辐射、平均气温和实际水汽压变化引起的径流量变化(见表 5)。

采用上述 Budyko 理论分析方法,计算清水河流域和白河流域气候变化和人类活动对径流变化的影响率。计算结果见表 6。在清水河流域气候变化对径流变化的影响率为 34.63%,其中降水量对径流变化的影响率是 24.55%,潜在蒸散发对径流变化的影响率是 10.08%,风速对径流变化的影响率是 3.89%,太阳辐射对径流变化的影响率是 1.26%,平均气温对

径流变化的影响率是 12.71%,实际水汽压对径流变化的影响率是 0.53%;人类活动对径流变化的影响率为 65.37%。在白河流域气候变化对径流变化的影响率为 16.10%,其中降水量对径流变化的影响率是 11.76%,潜在蒸散发对径流变化的影响率是 4.34%,风速对径流变化的影响率是 2.64%,太阳辐射对径流变化的影响率是 0.41%,平均气温对径流变化的影响率是 6.38%,实际水汽压对径流变化的影响率是 1.5%;人类活动对径流变化的影响率为 83.90%。人类活动对清水河流域和白河流域的径流量变化起主导作用,降水量则是导致径流变化的主要气候因子。

表 5 清水河流域和白河流域气象水文变量特征值

Table 5 Characteristic values of meteorological and hydrological variables in Qingshui River basin and Baihe River basin

流域	年份	径流深	径流变化	降水	潜在蒸散发	风速	太阳辐射	平均气温	实际水汽压	气候变化	人类活动
清水河	1960—1979	36.56	-19.42	-4.77	-1.96	0.75	-0.25	-2.47	0.10	-6.73	-12.69
	1980—2020	17.15									
白河	1970—1974	51.21	-23.97	-2.82	-1.04	0.63	0.09	-1.53	0.36	-3.86	-20.11
	1975—2020	27.24									

表 6 清水河流域和白河流域气候变化和人类活动对径流变化的影响率

Table 6 Rate of impact of changes in runoff due to climate change and human activities in Qingshui River basin and Baihe River basin

流域	对径流变化的影响率								
	降水	潜在蒸散发	风速	太阳辐射	平均气温	实际水汽压	气候变化	人类活动	%
清水河	24.55	10.08	3.89	1.26	12.71	0.53	34.63	65.37	
白河	11.76	4.34	2.64	0.41	6.38	1.50	16.10	83.90	

## 4 讨论

本文以永定河上游清水河流域和潮白河上游白河流域作为研究对象,基于 Budyko 假设的流域水热耦合平衡方法对比分析清水河流域和白河流域气候和人类活动对径流量的影响率。研究发现人类活动是清水河流域和白河流域径流减少的主要原因,清水河流域各气象因子对径流变化的敏感性系数明显要大于白河流域,这说明了气候变化对清水河的影响率更大。20 世纪 70 年代,白河流域建立了部分蓄水工程,人类活动对流域内的水文过程影响增强,小型水库蓄水减少了水库下游的河川径流量。而清水河流域(1954—2008 年)多年来,位于清水河中下游的张家口站集水面下垫面条件和气候变化并没有发生大的变化,也没有大的水利工程建设<sup>[30]</sup>。秦丽欢等<sup>[31]</sup>人也得出类似结论,其研究结果表明,1973 年作为突变点,人类活动对白河流域径流影响在 89.90%~91.79%。所以今后应同时考虑气候和人类活动的

影响,继续加强水分限制区的径流蒸散过程机理研究,以保障水资源安全。

尽管本研究结果显示 Zhang 公式模拟蒸散发量的效果最好,但随着年份的增加,通过 Zhang 公式计算得到的模拟蒸散发量与水量平衡计算得到的实际蒸散发量的差距呈现上升的趋势,另外用 Zhang 公式模拟得到的实际蒸散发量通过水量平衡公式去反推径流量需进一步分析。总体来说,在张家口市径流资料不足或无实测径流资料的小流域通过 Budyko 公式可以计算实际蒸散发量,具有潜在的应用价值,但反推径流量还需深入研究。未来的研究区域可以选择人类活动对径流影响较小的地方,验证 Budyko 公式能否反推径流量,为科学合理开发利用水资源,进而促进水资源的可持续利用提供科学依据。

## 5 结论

(1) 清水河流域和白河流域径流对气候的弹性系数法定量分析结果表明,和白河流域相比,清水河

流域的水文过程对气候变化更加敏感,1960至2020年间这两个流域的各气象因素的弹性系数均呈现上升的趋势,这种趋势表明这两个流域之间的气象与水文之间的耦合关系正在加强。

(2) 在清水河流域,气候变化是导致径流减少的一个重要因素,其影响率达到了34.63%,而人类活动的影响更为显著,它对径流减少的影响高达65.37%;在白河流域,虽然气候变化所占的比例相对较小,为16.10%,但人类活动的影响却格外显著,达到83.90%,这两个流域的共同点在于人类活动已经成为影响径流量变化的主要驱动力。

(3) 基于 Budyko 假设的流域水热耦合平衡方法适用于张家口地区的清水河流域和白河流域,其中 Zhang 公式更适用于张家口地区的清水河流域和白河流域实际蒸散发的计算,在无实测径流数据的情况下,能够较好地模拟流域的实际蒸散发量。

## 参考文献 (References)

- [1] Han Pengfei, Sankarasubramanian A, Wang Xusheng, et al. One-parameter analytical derivation in modified Budyko framework for unsteady-state streamflow elasticity in humid catchments [J]. *Water Resources Research*, 2023,59(9): e2023WR034725.
- [2] Zhang Yongqiang, Li Congcong, Chiew F H S, et al. Southern hemisphere dominates recent decline in global water availability [J]. *Science*, 2023,382(6670):579-584.
- [3] Chen Haorui, Wu Mousong, Duan Zheng, et al. Forecasting the human and climate impacts on groundwater resources in the irrigated agricultural region of North China Plain [J]. *Hydrological Processes*, 2023,37(3): e14853.
- [4] 张利茹,王兴泽,王国庆,等.变化环境下水文资料序列的可靠性与一致性分析[J].*水文*,2015,35(2):39-43.  
Zhang Liru, Wang Xingze, Wang Guoqing, et al. Consistency and reliability analysis of hydrological sequence in environment change [J]. *Journal of China Hydrology*, 2015,35(2):39-43.
- [5] 韩鹏飞,王旭升,蒋小伟,等.跨流域地下水循环研究进展[J].*地质科技通报*,2023,42(4):107-117,129.  
Han Pengfei, Wang Xusheng, Jiang Xiaowei, et al. Advances in interbasin groundwater circulation [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023,42(4): 107-117.
- [6] Xu Xiangyu, Yang Dawen, Yang Hanbo, et al. Attribution analysis based on the Budyko hypothesis for detecting the dominant cause of runoff decline in Haihe basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2014,510:530-540.
- [7] Zhang Ke, Ruben G B, Li Xin, et al. A comprehensive assessment framework for quantifying climatic and anthropogenic contributions to streamflow changes: A case study in a typical semi-arid North China basin [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2020,128: 104704.
- [8] Yang Lin, Zhao Guangju, Tian Peng, et al. Runoff changes in the major river basins of China and their responses to potential driving forces [J]. *Journal of Hydrology*, 2022,607:127536.
- [9] 王晓颖,宋培兵,廖卫红,等.气候变化和人类活动对白河流域径流变化影响的定量研究[J].*水资源与水工程学报*,2020,31(4):50-56.  
Wang Xiaoying, Song Peibing, Liao Weihong, et al. Quantitative analysis of the influences of climate change and human activities on runoff variations of Baihe River basin [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2020,31(4):50-56.
- [10] 徐宗学,姜瑶.变化环境下的径流演变与影响研究:回顾与展望[J].*水利水运工程学报*,2022,44(1):9-18.  
Xu Zongxue, Jiang Yao. Studies on runoff evolution mechanism under changing environment: A state-of-the-art review [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2022,44(1):9-18.
- [11] 郝桂珍,宋凤芝,徐利,等.基于输出系数模型的清水河上游农业非点源污染负荷估算[J].*科学技术与工程*, 2020,20(33):13919-13927.  
Hao Guizhen, Song Fengzhi, Xu Li, et al. Estimation of pollution loads from agricultural non-point sources in the upstream of Qingshui River based on export coefficient models [J]. *Science Technology and Engineering*, 2020,20(33):13919-13927.
- [12] 班富孝.清水河流域水文特性[J].*河北水利科技*,2000,24(1):11-13.  
Ban Fuxiao. Hydrological characteristics of Qingshuihe River basin [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2000,24(1):11-13.
- [13] 王磊.清水河流域土地利用变化对径流的影响研究[D].河北保定:河北农业大学,2018.  
Wang Lei. Impacts of land use change on runoff in Qingshui River basin [D]. Baoding, Hebei: Hebei Agricultural University, 2018.
- [14] 刘孟竹,张红娟,杨佳,等.海河上游清水河流域土地利用变化特征[J].*水土保持通报*,2020,40(3):147-154.  
Liu Mengzhu, Zhang Hongjuan, Yang Jia, et al. Characteristics of land use change in Qingshui River watershed in upper reaches of Haihe River [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020,40(3):147-154.
- [15] 张良.清水河流域径流变化趋势及突变分析[J].*内蒙古水利*,2020,41(10):24-25.

- Zhang Liang. Analysis of runoff change trend and abrupt change in Qingshui River basin [J]. *Inner Mongolia Water Resources*, 2020,41(10):24-25.
- [16] 班富孝. 白河流域水文特性分析[J]. *现代农业科技*, 2009,38(24):261-268.
- Ban Fuxiao. Analysis of hydrological characteristics in Baihe River basin [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2009,38(24):261.
- [17] 王晨杨, 闫铁柱, 翟丽梅, 等. 密云水库白河流域基流演变特征[J]. *生态学报*, 2022,42(8):3181-3190.
- Wang Chenyang, Yan Tiezhu, Zhai Limei, et al. Change characteristics of baseflow in Bai River basin of Miyun Reservoir based on comparison of separation methods [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(8):3181-3190.
- [18] 彭骏, 贾仰文, 牛存稳, 等. 永定河三家店以上流域径流减少归因分析[J]. *水利水运工程学报*, 2022,44(1):67-76.
- Peng Tao, Jia Yangwen, Niu Cunwen, et al. Attribution of runoff attenuation in the Yongding River basin upstream of the Sanjiadian [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2022,44(1):67-76.
- [19] 申滔滔. 基于 Budyko 框架下漳河流域径流变化归因分析[D]. 河北省邯郸市: 河北工程大学, 2020.
- Shen Taotao. Attribution analysis of runoff variation in Zhanghe River basin based on Budyko framework [D]. Handan, Hebei: Hebei University of Engineering, 2020.
- [20] Zhou Sha, Yu Bofu, Huang Yuefei, et al. The complementary relationship and generation of the Budyko functions [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015,42(6):1781-1790.
- [21] 郭生练, 郭家力, 侯雨坤, 等. 基于 Budyko 假设预测长江流域未来径流量变化[J]. *水科学进展*, 2015,26(2):151-160.
- Guo Shenglian, Guo Jiali, Hou Yukun, et al. Prediction of future runoff change based on Budyko hypothesis in Yangtze River basin [J]. *Advances in Water Science*, 2015,26(2):151-160.
- [22] 傅抱璞. 论陆面蒸发的计算[J]. *大气科学*, 1981,5(1):23-31.
- Fu Baopu. On the calculation of the evaporation from land surface [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1981,5(1):23-31.
- [23] Zhang Lu, Dawes W R, Walker G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale [J]. *Water Resources Research*, 2001,37(3):701-708.
- [24] Yang Hanbo, Yang Dawen, Lei Zhidong, et al. New analytical derivation of the mean annual water-energy balance equation [J]. *Water Resources Research*, 2008,44(3):W03410.
- [25] Wang Dingbao, Tang Yin. A one-parameter Budyko model for water balance captures emergent behavior in darwinian hydrologic models [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014,41(13):4569-4577.
- [26] 冯雅茹. 基于 Budyko 假设的典型流域实际蒸散发特征分析[D]. 北京: 中国地质大学, 2020.
- Feng Yaru. Analysis of actual evapotranspiration characteristics of typical watersheds based on Budyko hypothesis [D]. Beijing: China University Geosciences, 2020.
- [27] 李敏欣, 邹磊, 夏军, 等. Budyko 框架下白河流域径流演变及其归因分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2023,32(4):774-782.
- Li Minxin, Zou Lei, Xia Jun, et al. Analysis of runoff change and its attribution in the Baihe River basin under the Budyko framework [J]. *Resources and Environment in the Yangtze basin*, 2023,32(4):774-782.
- [28] 张建云, 张成凤, 鲍振鑫, 等. 黄淮海流域植被覆盖变化对径流的影响[J]. *水科学进展*, 2021,32(6):813-823.
- Zhang Jianyun, Zhang Chengfeng, Bao Zhenxin, et al. Analysis of the effects of vegetation changes on runoff in the Huang-Huai-Hai River basin under global change [J]. *Advances in Water Science*, 2021,32(6):813-823.
- [29] 游元媛. 基于 Budyko 假设的全球径流模拟与定量归因[D]. 湖北 武汉: 中国地质大学, 2022.
- You Yuanyuan. Simulation and attribution of global streamflow changes based on Budyko hypothesis [D]. Wuhan, Hubei: China University Geosciences, 2022.
- [30] 李赟, 李雅丽, 张良, 等. 近 70 年首都水源涵养区水热条件及地表径流演变特征研究: 以清水河和白河流域为例[J]. *节水灌溉*, 2023,48(1):99-108,115.
- Li Yun, Li Yali, Zhang Liang, et al. A study on the water and heat conditions and the evolution of surface runoff in the water-source conservation areas of the capital in the past 70 years: A case study in the Qingshui River and the Bai River Basins [J]. *Water Saving Irrigation*, 2023(1):99-108,115.
- [31] 秦丽欢, 周敬祥, 李叙勇, 等. 密云水库上游径流变化趋势及影响因素[J]. *生态学报*, 2018,38(6):1941-1951.
- Qin Lihuan, Zhou Jingxiang, Li Xuyong, et al. Attribution analysis of changes in runoff in the upstream of the Miyun Reservoir [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018,38(6):1941-1951.