

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2018.02.02

黄河流域 Budyko 方程参数 n 演变规律及其归因研究

王卫光^{1,2}, 陆文君^{1,2}, 邢万秋³, 李进兴^{1,2}, 李长妮^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;

3. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 基于移动窗口法、多元逐步回归模型、敏感性系数法和贡献评估法, 定量分析黄河流域 Budyko 水热耦合平衡方程中的参数 n 在黄河流域的变化规律及其与气候变化和人类活动的相关关系。结果表明, 参数 n 在 1956—2000 年间呈现上升趋势, 其变化与降水 (P)、人口状况 (P_{op})、生产总值 (G_{GDP}) 和有效灌溉面积 (A_{irr}) 最为相关。其中, 参数 n 的变化对 P 最为敏感, 敏感系数达到 1.169, 且 P 的变化抑制了参数 n 的增加 (贡献率为 -20.2%); 参数 n 对 P_{op} 、 G_{GDP} 和 A_{irr} 的敏感性系数分别为 0.795、0.038 和 -0.152 , 并随人类活动的加剧而上升, 其中 P_{op} 的增加对参数 n 增加的贡献最大 (128.7%)。

关键词: Budyko 方程参数 n ; 移动窗口法; 多元逐步回归模型; 敏感性系数法; 贡献评估法; 黄河流域
中图分类号: TV11; P343 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2018)02-0007-07

Analysis of change and attribution of Budyko equation parameter n in Yellow River

WANG Weiguang^{1,2}, LU Wenjun^{1,2}, XING Wanqiu³, LI Jinxing^{1,2}, LI Changni^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In the Yellow River, the Budyko equation parameter changes and its response to climate change and human activities were quantitatively analyzed based on the moving window, multiple stepwise regression (MSR), sensitive coefficient method and contribution assessment method. The results indicate that the Budyko equation parameter n increases during the period from 1956 to 2000 and the changes of the parameter are mostly relevant to P , P_{op} , G_{GDP} and A_{irr} . Wherein, the sensitive coefficient of P , which is the mostly sensitive to the Budyko equation parameter change, is 1.169 and the changes of P has a negative effect on the increase of the parameter n (contribution rate is -20.2%). In addition, the sensitive coefficients of P_{op} , G_{GDP} and A_{irr} are 0.795, 0.038 and -0.152 , respectively. Increasing human activities have positive effects on the increment of the parameter n and the increase in P_{op} has the major contributions to the increment of the parameter n (128.7%).

Key words: Budyko equation parameter n ; moving window; multiple stepwise regression (MSR); sensitive coefficient method; contribution assessment method; Yellow River

气候变化和人类活动对水文循环产生的影响一直是水文学家关注的焦点^[1-2]。蒸散发作为陆面水循环中最重要的水文过程之一,迄今仍然是研究中的薄弱点^[3]。关于蒸散发研究的基础理论较多,其中 Budyko 框架理论由于原理简单、物理机制明确,在基于气候-土壤-植被系统的气象学、水文学、生态水文学等研究中得到了广泛的应用^[4]。自 1948 年以来,众多关于 Budyko 框架的经验公式被提出,其中含有参数的经验公式在区域上对 Budyko 曲线的拟合精度较高,运用较广。1979 年,崔启武等^[5]首次将反映流域下垫面特征的参数 n 引入到 Budyko 方程中。目前在国内大多数的研究中,参数 n 都被当作恒定值来处理^[6-8]。但事实上,恒定不变的参数 n 并不能很好地模拟流域水文状况,因为不仅气候变化会影响参数 n ,人类对水资源的不断开发利用、城市经济的发展等都会改变 n 值,影响降雨产汇流过程,进而改变水资源的时空分布格局。因此,研究参数 n 随时间的演变规律及其驱动机制很有必要。

黄河流域流经不同气候区,流域气候和地貌差异显著^[9],在气候变化和人类活动的共同影响下,参数 n 变异的情况更复杂,但关于此流域参数 n 的演变规律和归因分析却未见报道。因此,本文基于花园口控制站以上黄河流域内 76 个气象站 1956—2000 年的逐日气象观测资料,和花园口水文站 1956—2000 年的逐月径流深(图 1),运用移动窗口法将 Budyko 方程的输入变量进行平滑和滤波处理后推算参数 n ,并在总结文献研究^[10-12]的基础上,筛选出 7 个代表气候变化的因子:降水量(P)、温度(T)、潜在蒸发量(E_0)、逐年最大日降水量($P_{\max}$)、降水季节性指标(S_1)、降雨集中度(C_1)、气候干旱指数(P_{DSI})和 3 个反映人类活动的因子:人口状况(P_{op})、生产总值(G_{GDP})和有效灌溉面积(A_{irr}),运用多元逐步回归模型、敏感性系数法和贡献评估法,定量评价黄河流域参数 n 的变化对气候变化和人类活

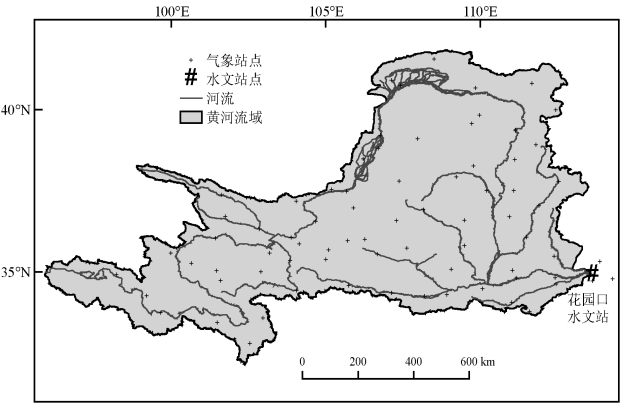


图 1 研究区的气象站点和水文站点分布

动的响应。

1 研究方法

1.1 Budyko 方程

Budyko 方程描述了实际蒸发依赖于潜在蒸发量(热能来源)和可利用水量(水量来源)的程度^[13],利用 Budyko 框架可以有效评价气候、植被和水文循环之间的相互影响^[14]。其中经量纲分析和数学推导并被广泛应用的傅抱璞公式^[15]可较好地表达流域内的水热耦合状态。Yang 等^[16]以傅抱璞公式为基础,对 Choudhury 公式变换成另一种表达 Budyko 曲线的方程为

$$E = \frac{E_0 P}{[E_0^n + P^n]^{1/n}} \quad (1)$$

式中: E 为流域实际蒸发量,mm。

本文采用式(1)结合流域水量平衡方程($E = P - R$)来推算 Budyko 方程中的参数 n 。

1.2 参数 n 各影响因子及计算方法

1.2.1 参数 n 各影响因子

a. 潜在蒸发量(E_0)。计算潜在蒸发的方法主要可分为综合法、温度法、辐射法和水面蒸发量法,其中 Penman-Monteith (PM) 法由于具有明确的物理机制而成为 FAO 唯一推荐的方法^[17]。因此,本文选取综合考虑了多种气象要素并经 Shuttleworth 于 1993 年修正的 Penman-Monteith (PM) 公式来计算 E_0 。

$$\lambda E_0 = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma}(R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma}6.43(1 + 0.536U_2)\left(\frac{100 - R_H}{100}\right)e_s \quad (2)$$

式中: Δ 为饱和水汽压曲线斜率,kPa/°C; γ 为干湿常数,kPa/°C; R_n 为净辐射,MJ/(m²·d); G 为土壤热通量,MJ/(m²·d); λ 为潜热,MJ/kg; U_2 为 2 m 高处的风速,m/s; e_s 为平均饱和水汽压,kPa; R_H 为相对湿度,%。

b. 逐年最大日降水量($P_{\max}$)。根据中国气象数据网上的气象数据统计出流域逐年最大日降水量($P_{\max}$)。

c. 降水季节性指标(S_1)。选用 Walsh 等^[18]的公式来计算降水季节性指标:

$$S_{1i} = \frac{1}{R_i} \sum_{n=1}^{12} \left| X_{in} - \frac{R_i}{12} \right| \quad (3)$$

式中: S_{1i} 是第 i 年的 S_1 ; R_i 为第 i 年的降水量,mm; X_{in} 代表第 i 年 n 月份的降水量,mm。

对公式(3)求得的逐年 S_1 取多年平均值即可得到本文所需的降水季节性指标。

d. 降雨集中度 (C_1)。采用 Martin-vide^[19] 于 2004 年提出的计算降雨集中度方法,此方法用于研究区域的降水极值情况更直观,且简单易行^[20]。根据降雨集中度的定义,累积降水量百分比 (Y) 和累积降水天数百分比 (X) 呈负的指数分布,即符合洛伦兹曲线分布:

$$Y = aX \exp(bX) \quad (4)$$

式中的 a 、 b 是可用最小二乘法率定得到的系数。则

$$C_1 = 2 \left\{ \int_0^{100} [X - aX \exp(bX)] dx \right\} / 10000 \quad (5)$$

e. 气候干旱指数 (P_{DSI})。气候干旱指数采用帕尔默干旱指数 (Palmer drought severity index, P_{DSI}) 代表。 P_{DSI} 是一个常用的干旱指标,不仅考虑当时的水分条件,而且考虑前期水分状况、持续时间,是个定量描述旱情的较好的指标,在水文、气象、农业等领域广泛应用。

f. 人口状况 (P_{op} , 万人)、生产总值 (G_{GDP} , 亿元) 和有效灌溉面积 (A_{irr} , 10^3 hm^2)。数据整理时,首先根据统计局官网年报整理得黄河流域流经各省的人口状况 P_{op} 、生产总值 G_{GDP} 和有效灌溉面积 A_{irr} 。将这些数据分别除以各省的行政区域面积即得各省的 P_{op} 密度、 G_{GDP} 密度和 A_{irr} 密度,然后乘以黄河流域在各省份分布的面积,最后将所得结果相加就可以得到黄河流域的人口状况 (P_{op})、生产总值 (G_{GDP}) 和有效灌溉面积 (A_{irr})。

1.2.2 影响关系的研究方法

a. 流域气象要素空间插值。黄河流域的降水 (P)、平均气温 (T)、最高气温、最低气温、相对湿度、平均风速和日照时数采用气象站点相应的气象数据通过插值方法获得。具体计算方法如下:①将研究区划分成 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 大小的网格;②根据网格内气象站点的数据通过反距离权重法得到每个网格的各气象要素值;③对覆盖整个研究区的所有网格的各气象要素值分别求平均,即可得到该研究区的气象要素值。

b. 平滑与滤波处理。移动窗口法 (moving window) 是简单且有效的平滑随机变化方法,被广泛应用于处理非平稳序列数据。在本文中,考虑到 Budyko 水热耦合平衡方程适用于多年平均尺度 (一般多于 10 年),该尺度下的流域蓄水变化几乎为 0,并且受自然气候变化的影响小,因此将移动窗口定为 11 年,以 1961 年代表 1956—1966 年段,以此类推,2000 年代表 1995 年以后的时段,然后对 Budyko 水热耦合平衡方程中的变量及各影响因子进行滑动平均。

c. 多元逐步回归模型 (MSR)。为确定各影响

因子对 Budyko 水热耦合平衡方程中参数 n 变化的影响,选用 MSR 模型来建立代表气候变化 (P 、 E_0 、 T 、 $P_{\max}$ 、 S_1 、 C_1 、 P_{DSI}) 和人类活动 (P_{op} 、 G_{GDP} 、 A_{irr}) 的各因子对参数 n 的响应关系。

$$n_t = \beta_0 + \beta_1 x_{1,t}^c + \cdots + \beta_k x_{k,t}^c + \beta_{k+1} x_{k+1,t}^h + \cdots + \beta_m x_{m,t}^h \quad (6)$$

式中: n_t 为第 t 时段的 Budyko 方程中参数; β_0 为多元逐步回归模型的截距; $\beta_1, \beta_2, \cdots, \beta_m$ 分别为从第 1 个到第 m 个自变量的模型系数; $x_{k,t}^c$ 为第 t 时段影响 Budyko 方程中参数 n 的第 k 个代表气候变化的因子; $x_{m,t}^h$ 为第 t 时段影响 Budyko 方程参数 n 的第 m 个反映人类活动的因子。

d. 敏感性系数法。为识别各因子对 Budyko 方程参数 n 变化的贡献,选用敏感性系数法来估算参数 n 的变化对各因子的敏感程度,计算公式为

$$S(x_i) = \frac{\partial n}{\partial x_i} \frac{x_i}{n} \quad (7)$$

式中: x_i 代表第 i 个自变量; $S(x_i)$ 为参数 n 的变化对变量 x_i 的敏感性系数; Δx_i 为第 i 个自变量的变化值; Δ_n 为参数 n 的变化值。

e. 贡献评估法。数学上,对于函数 $y = f(x_1, x_2, \cdots)$, t 时间序列的因变量 y 的变化可用微分方程表示:

$$\frac{dy}{dt} = \sum f'_i \frac{dx_i}{dt} \quad (8)$$

令 $T_{Ry} = \frac{dy}{dt}$, $T_{Ri} = \frac{dx_i}{dt}$ 分别代表 y 和 x_i 的长期

序列的坡度值,式(8)可转换为

$$T_{Ry} = \sum f'_i T_{Ri} \quad (9)$$

其中

$$f'_i T_{Ri} = C(x_i)$$

式中: T_{Ry} 和 T_{Ri} 可通过线性回归计算得到; $C(x_i)$ 由函数求导与坡度值的积得到, $C(x_i)$ 表示自变量 x_i 对因变量 y 随时间 t 变化的贡献率; f'_i 为函数 $y = f(x_1, x_2, \cdots)$ 对 x_i 所求的一阶偏导数。

2 结果与分析

2.1 参数 n 的变化趋势

以 P 、 R 和 E_0 的 11 年滑动平均值作为 Budyko 水热耦合平衡方程 (式(1)) 的输入数据推算参数 n 。图 2(a) 为变化的参数 n 值序列与恒定 n 值 (用实测 P 、 R 和 E_0 的 1956—2000 年均值通过 Budyko 计算得到恒定 n 值) 的比较。从图 2(a) 可以看出,从 20 世纪 70 年代初期到 80 年代中期滑动平均的参数 n 值在恒定 n 值上下波动,而 20 世纪 70 年代初期以前和 80 年代中期以后滑动平均的参

数 n 值分别明显小于和大于恒定 n 值。滑动平均的参数 n 值在 1961—2000 年间呈现显著的上升趋势。

整个研究时段中变参数 n 的最大值为 2.746, 最小值为 1.783, 分别出现在 1964 年和 1999 年。将它们分别代入式(1), 计算得蒸发率(E/P)相对于干旱指数(E_0/P)的分布(图 2(b))。从图 2(b)可以看出, 在相同的干旱指数下, 随着水热耦合状态改变(n 的提升), 流域的蒸发率越大, 即在降水量不变的条件下, 黄河流域的 n 越大, 蒸发越大, 根据流域水量平衡方程($E = P - R$)可知, 径流越小, 意味着整个流域越来越干旱。

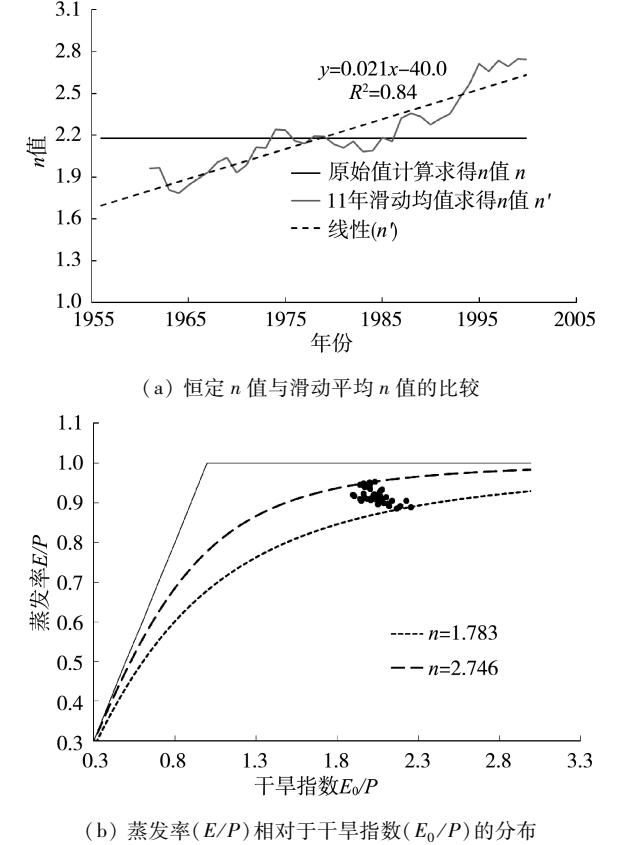


图 2 黄河流域参数 n 的变化趋势及蒸发率与干旱指数关系

此外, 将滑动平均的参数 n 值与恒定 n 值分别代入到 Budyko 方程中计算的 E 与根据水量平衡($E = P - R$)用实测 P 和 R 的滑动平均值计算的 E 进行比较, 并选用纳西系数(N_{SEC})和平均相对误差(R_E)来评价模型的模拟效果(图 3)。由滑动平均

的参数 n 计算的 E 与实测滑动平均值计算的 E 基本吻合, R_E 为 0, N_{SEC} 达到 1。而由恒定参数 n 计算的滑动平均窗口的 E 与实测滑动平均值计算的 E 有较大差距, R_E 为 -0.031, N_{SEC} 为 0.683。这说明恒定不变的 Budyko 水热耦合平衡方程参数 n 在模拟流域水文状况时效果较差, 证实了研究变参数 n 的必要性。

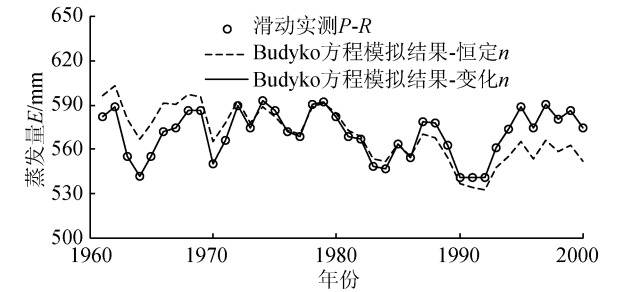


图 3 由恒定参数 n 和滑动平均 n 值经 Budyko 方程模拟的 E 和滑动实测计算的 E ($E = P - R$) 的比较

2.2 参数 n 各影响因子的演变趋势

表 1 为黄河流域代表气候变化和人类活动特征的因子的变化趋势及其显著性检验。由表 1 可知, 黄河流域 1956—2000 年的 R 、 E_0 和 P_{DSI} 呈现显著下降趋势, 并且 MK 检验和 T 检验的结果一致。对于 T , T 检验结果显示其呈显著上升趋势, 而 MK 检验结果并不显著。在其他代表气候变化的因子中, 除了 P 呈非显著下降趋势外, P_{max} 、 S_1 和 C_1 均呈现非显著上升趋势。表明虽然黄河流域降水量在过去几十年有微弱的下降, 但降水极值(P_{max} 、 C_1 等)变化却愈发剧烈。

图 4 展示了各水文气象变量的时间序列以及 11 年滑动平均值。从图 4 可以看出, 花园口水文站 R 从 1985 年开始持续下降, 流域 E_0 在 1985 年之后由下降趋势转为轻微的上升趋势, 流域 T 则在 1987 年之后上升趋势更为明显, S_1 在 1990 年之后呈现明显的增加趋势, P_{DSI} 呈现持续下降的趋势, 其他因子变化较为平缓。

图 5 为黄河流域反映人类活动特征的因子的变化趋势。结合表 1 可知流域 P_{op} 、 G_{GDP} 和 A_{irr} 均呈显著上升趋势(均通过 MK 检验和 T 检验)。流域 P_{op} 基本呈现线性增加趋势, G_{GDP} 在 1985 年之后迅速增加, 而 A_{irr} 则从 20 世纪 80 年代初增长变缓。

表 1 黄河流域上反映气候变化和人类活动的 10 个因子的变化趋势及其显著性特征

检验方法	R	P	E_0	T	P_{max}	S_1	C_1	P_{DSI}	P_{op}	G_{GDP}	A_{irr}
斜率	-0.86	-1.26	-4.54	0.011	0.135	4×10^{-4}	2×10^{-4}	-0.103	113.4	77.7	71.0
T 检验	$1 \times 10^{-4} *$	0.46	$9.34 \times 10^{-7} *$	0.039 *	0.66	0.80	0.57	$6.17 \times 10^{-6} *$	$9.08 \times 10^{-54} *$	$3.4 \times 10^{-10} *$	$3.71 \times 10^{-22} *$
MK 检验	-4.18 *	-0.65	-4.81 *	1.53	0.12	0.41	0.55	-4.12 *	9.66 *	9.17 *	7.89 *

注: “*” 代表显著性通过 0.05 显著性检验。

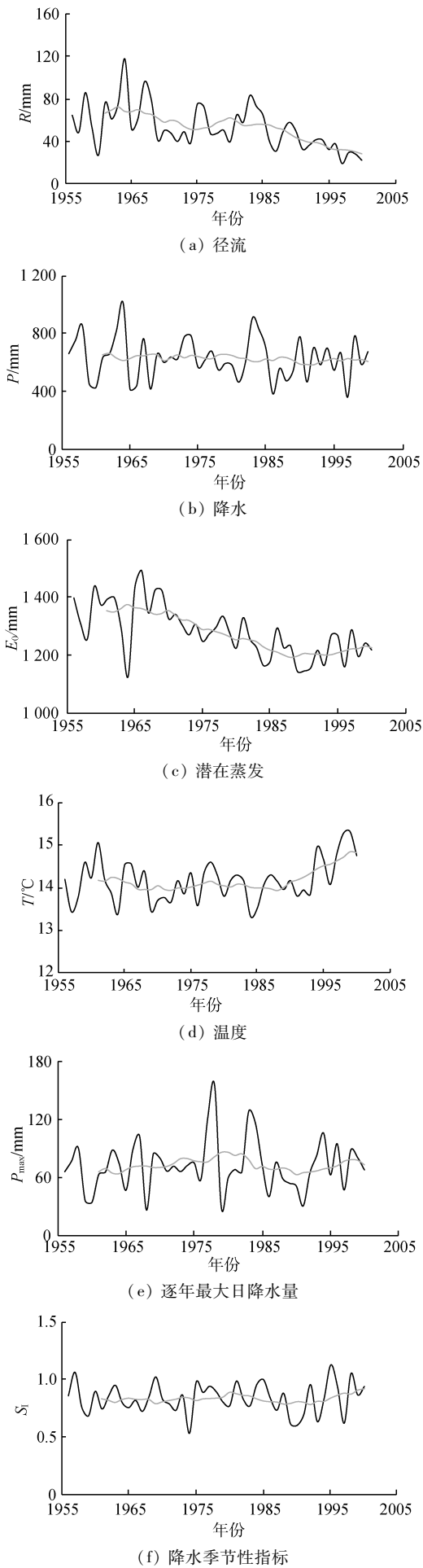


图4 黄河流域水文气候特征的变化情况

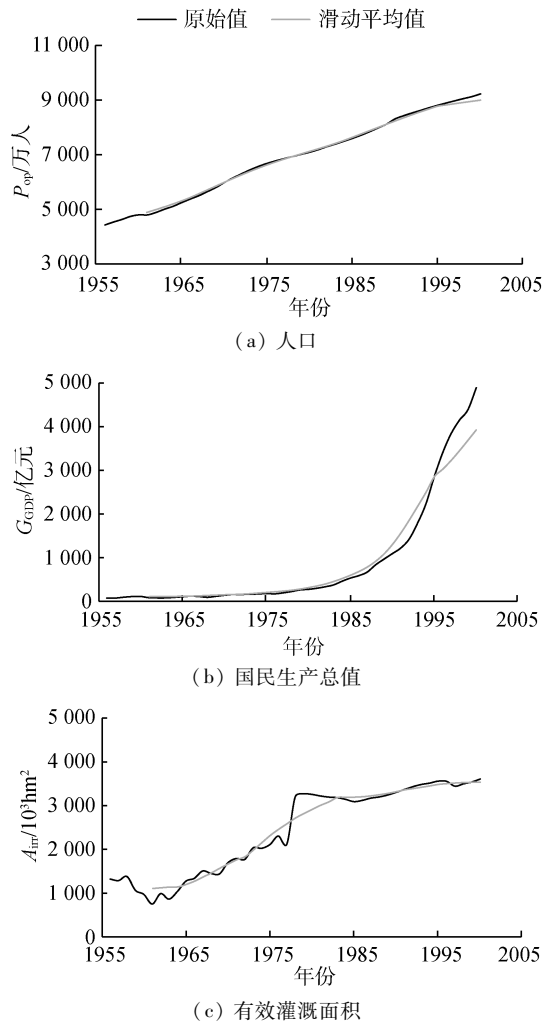


图5 黄河流域人类活动特征的变化情况

2.3 参数 n 变化对各影响因素的响应关系

为进一步研究各变量对参数 n 变化的影响,运用 MSR 模型将代表气候变化的因子和人类活动的因子分别作为模型的自变量,参数 n 为因变量进行

回归模拟。结果如下：

$$n = -1.886 + 0.00416P + 0.000248P_{op} + 0.0000886G_{GDP} - 0.00013A_{irr} \quad (10)$$

由式(10)可知,与参数 n 变化最为相关的变量分别为 P 、 P_{op} 、 G_{GDP} 和 A_{irr} 。用实测 P 、 P_{op} 、 G_{GDP} 和 A_{irr} 代入公式(10)模拟的参数 n 和滑动参数 n 的结果见图6。从图6可以看出 MSR 模型对 n 值模拟效果较好,趋势线 $y = 1.02x - 0.06$, R^2 为 0.98,同时说明参数 n 确实受 P 、 P_{op} 、 G_{GDP} 和 A_{irr} 的影响较大。

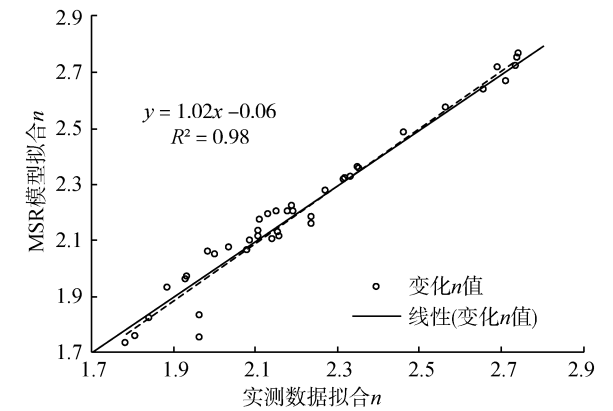


图6 MSR 模型模拟 n 值和滑动 n 值的比较

2.4 影响因子变化对参数 n 的影响评估

依据研究区 MSR 模型结果(式(10))进行敏感性系数和贡献率的计算,结果见表2。由表2可知,Budyko 方程参数 n 的变化对 P 最为敏感,敏感性系数数值达到 1.169;而对 P_{op} 、 G_{GDP} 和 A_{irr} 的敏感性系数值分别为 0.795、0.038 和 -0.152 。表2同时列出了这4个因子对参数 n 变化的贡献率, P_{op} 和 G_{GDP} 对参数 n 的增加起到促进作用,并且 P_{op} 的贡献最大,贡献率为 128.7%。 P 和 A_{irr} 对参数 n 值的增加起到抑制作用,贡献率分别为 -20.2% 和 -44.3% 。总之,气候变化和人类活动对参数 n 值变化的贡献分别为 -20.2% 和 120.2% ,气候变化中 P 抑制了 Budyko 方程参数 n 值的增加,而人类活动的加剧促进了参数 n 的增加。

表2 P 、 P_{op} 、 G_{GDP} 、 A_{irr} 对参数 n 变化的敏感性系数和贡献率

项目	f'	S	$C/\%$
P	8.86×10^{-5}	1.169	-20.2
P_{op}	2.48×10^{-4}	0.795	128.7
G_{GDP}	4.16×10^{-3}	0.038	35.8
A_{irr}	-1.30×10^{-4}	-0.152	-44.3
气候变化			-20.2
人类活动			120.2

3 结 论

a. 黄河流域的 Budyko 方程参数 n 在 1956—

2000 年间呈现增加的趋势,相应地,蒸散发也增加,从而出现了黄河流域的径流在 1956—2000 年间减小的现象。

b. 黄河流域 Budyko 方程参数 n 的变化与气候变化和人类活动均相关。 P 的变化对参数 n 的影响最大,对参数 n 的升高起到反作用。人类活动(P_{op} 、 G_{GDP} 和 A_{irr})对参数 n 的变化也较为敏感,人类活动的加剧对参数 n 的增加起到促进作用。

c. 在黄河流域,人类活动对 Budyko 方程中参数 n 变化的贡献率比气候变化的贡献率更大,而在气候因子中,降水和潜在蒸发对参数 n 变化的贡献率最大。

参考文献：

[1] 李洋洋,白洁芳,周维博,等. 澜河流域气候因子对水沙变化的影响[J]. 水资源保护,2017,33(5):98-105. (LI Yangyang, BAI Jiefang, ZHOU Weibo, et al. Impact of climate factors on variations of water and sediment in Bahe River Basin [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(5):98-105. (in Chinese))

[2] 郭巧玲,韩振英,丁斌,等. 窟野河流域径流变化及其影响因素研究[J]. 水资源保护,2017,33(5):75-80. (GUO Qiaoling, HAN Zhenying, DING Bin, et al. Study of runoff variation characteristics and influence factors in Kuye River [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(5):75-80. (in Chinese))

[3] ZHANG Yongqiang, LIU Changming, TANG Yanhong, et al. Trends in pan evaporation and reference and actual evapotranspiration across the Tibetan Plateau [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007, 112(D12): 1103-1118.

[4] ZHANG Lu, POTTER N, HICKEL K, et al. Water balance modeling over variable time scales based on the Budyko framework-Model development and testing [J]. Journal of Hydrology, 2008, 360(1/2/3/4): 117-131.

[5] 崔启武,孙延俊. 论水热平衡联系方程[J]. 地理学报, 1979, 34(2): 9-17. (CUI Qiwu, SUN Yanjun. On the correlative equation of the heat and water balance [J]. Acta Geographica Sinica, 1979, 34(2): 9-17. (in Chinese))

[6] 栗铭,陈喜. 基于 Budyko 假设的海河流域蒸散发量和径流量估算研究[J]. 中国农村水利水电, 2014(6): 107-111. (LI Ming, CHEN Xi. Research on the estimation of the evaporation and the runoff in the Haihe River Based on Budyko hypothesis [J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(6): 107-111. (in Chinese))

[7] 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. (in Chinese))

[8] 许珊珊, 金亦, 刘金涛, 等. Budyko 理论在水文气候分区中的应用研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(3):17-20. (XU Shanshan, JIN Yi, LIU Jintao, et al. The application of Budyko theory to hydro-climatic classification [J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(3):17-20. (in Chinese))

[9] 韩艳利, 娄广艳, 葛雷, 等. 黄河流域与水有关生态补偿框架的探讨[J]. 水资源保护, 2016, 32(6):142-150. (HAN Yanli, LOU Guangyan, GE Lei, et al. Discussion of water-related ecological compensation framework for Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(6):142-150. (in Chinese))

[10] YANG Dawen, SUN Fubao, LIU Zhiyu, et al. Analyzing spatial and temporal variability of annual water-energy balance in nonhumid regions of China using the Budyko hypothesis [J]. Water Resources Research, 2007, 43(4):436-451.

[11] SHAO Quanxi, TRAYLEN A, ZHANG Lu. Nonparametric method for estimating the effects of climatic and catchment characteristics on mean annual evapotranspiration [J]. Water Resources Research, 2012, 48(3):949-960.

[12] WILLIAMS C A, REICHSTEIN M, BUCHMANN N, et al. Climate and vegetation controls on the surface water balance: synthesis of evapotranspiration measured across a global network of flux towers [J]. Water Resources Research, 2012, 48(6):327-40.

[13] BUDYKO M I. Climate and life [M]. New York: Academic Press, 1974.

[14] DONOHUE R J, RODERICK M L, MCVICAR T R. On the importance of including vegetation dynamics in Budyko’s hydrological model [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2006, 11(2):983-995.

[15] 傅抱璞. 论陆面蒸发的计算[J]. 大气科学, 1981, 5(1):23-31. (FU Baopu. Calculation on land surface evaporation [J]. Scientia Atmospherica Sinica, 1981, 5(1):23-31. (in Chinese))

[16] 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):893-897.

[17] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements [M]. Rome: Fao Irrigation and Drainage Paper, 1998:56.

[18] WALSH R P D, LAWLER D M. Rainfall seasonality: description, spatial patterns and change through time [J]. Weather, 1981, 36(7):201-208.

[19] MARTIN-VIDE J. Spatial distribution of a daily precipitation concentration index in peninsular Spain [J]. International Journal of Climatology, 2004, 2(8):2709-2729.

[20] 邢万秋, 王卫光, 吴杨青, 等. 淮河流域降雨集中度的时空演变规律分析[J]. 水电能源科学, 2011, 29(5):1-5. (XING Wanqiu, WANG Weiguang, WU Yangqing, et al. Change properties of precipitation concentration in Huaihe River Basin [J]. Water Resource and Power, 2011, 29(5):1-5. (in Chinese))

(收稿日期:2017-10-27 编辑:彭桃英)

• 信息播报 •

《水资源保护》主编、河海大学教授王沛芳获“技术发明奖”一等奖

2018 年 2 月 11 日,教育部公布了 2017 年度高等学校科学研究优秀成果奖(科学技术)获奖项目。《水资源保护》主编王沛芳教授主持的“农田退水系统有机农药高效降解关键技术及应用”获技术发明奖一等奖。

“农田退水系统有机农药高效降解关键技术及应用”项目针对我国农业生产中农药施用引起的水体污染日益加剧、水生态系统不断退化及防控治理技术缺乏等突出问题,从提高农田退水系统中有机农药降解净化能力入手,研发了高效降解水体农药的新材料、新方法、新工艺和新产品,发明了多孔载体成形、纳米材料镀膜光催化、土著微生物驯化附着等核心技术,获得了农田退水沟河湿地系统有机农药高效降解去除的整装成套装备和产品,为实现农药逐级降解净化、水环境质量改善、水源地水质提升和水生生物安全提供了重要技术支撑。成果已获授权发明专利 21 项,发表学术论文 126 篇,取得了重要的生态环境及社会经济效益。

(本刊编辑部 供稿)