

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2021.06.001

黄淮海流域植被覆盖变化对径流的影响

张建云^{1,2}, 张成凤^{1,2}, 鲍振鑫^{2,3}, 李 淼⁴, 王国庆^{2,3}, 管晓祥^{1,2}, 刘翠善^{2,3}

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 水利部应对气候变化研究中心, 江苏 南京 210029; 3. 南京水利科学研究院
水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029; 4. 永州市水利局, 湖南 永州 425000)

摘要: 植被是流域水循环过程的重要环境因子之一, 植被变化对径流的影响是当前研究的国际前沿和热点问题。以全球变暖最突出的黄淮海流域为研究对象, 基于1982—2016年水文气象观测资料及归一化植被指数(NDVI)数据, 利用Mann-Kendall等趋势检验方法检测NDVI的时空变化特征。基于Budyko-Fu公式构建黄淮海流域水热耦合模拟模型, 分析模拟径流对Budyko-Fu模型参数 ω 的敏感性; 基于参数 ω 与气候、植被等要素的统计关系, 建立利用气候季节性指数和NDVI计算参数 ω 的经验公式, 利用弹性系数法, 识别参数 ω 对NDVI变化的响应, 利用复合函数链式求导法则研究NDVI变化对黄淮海流域径流的影响。结果表明: 1982—2016年黄淮海流域NDVI呈显著增加趋势; NDVI增加会使模型参数 ω 增加, 进而导致径流量减少; NDVI每增加10%, 黄淮海流域径流量平均减少8.3%; 植被变化对径流的影响具有显著的空间差异性, 气候越干旱、植被条件越差地区的NDVI变化对径流影响越显著。

关键词: 植被变化; 径流响应; Budyko假设; 弹性系数; 黄淮海流域

中图分类号: TV11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2021)06-0813-11

植被是地球生态系统的重要组成部分, 在陆面水分运移和能量传输中具有重要的驱动作用^[1]。近年来, 全球植被覆盖度显著提升, 以中国、印度、欧洲等国家或地区最为显著^[2-3]。以中国为例, 为保护和扩大森林、减少土地沙漠化、防治水土流失, 中国政府大力实施“退耕还林还草”和“三北防护林”等重点工程, 2000—2017年全国植被叶面积指数显著增加, 占全球叶面积净增加量的25%^[4]。植被变化改变了降水截留、蒸散发和土壤下渗等水文过程, 对流域水循环和径流量产生了显著的影响^[5-6]。全球变暖及其对水文水资源的影响是当前研究的国际前沿和热点问题, 国际水文科学协会将“水文与社会中的变化”列为2013—2022十年研究计划的主题^[7]。研究区域植被变化对水文水资源的影响, 对变化环境下的水循环演变机理认识和区域水资源规划与管理具有重要的科学意义和实际价值。

关于植被变化对径流的影响开展了大量的研究工作, 科学试验是一种重要的研究方法, 包括对比流域试验和人工控制试验等多种方法。对比流域法选取水文相似的2个相邻流域, 在其中1个流域进行森林砍伐或植被恢复, 另1个流域维持原来的植被特征, 对比分析2个流域的径流差异, 从而定量研究植被变化对径流的影响^[8]。另一些学者采用设计试验的方法, 例如, 张晨成等^[9]通过试验研究不同植被条件下土壤水分变化, 发现柠条地土壤水分含量远少于杏树地, 表明植被类型对水文过程具有显著的影响。然而, 由于研究案例的试验条件、气候特征、植被类型差异较大, 不同的科学试验未得到一致性的结论, 科学试验的结果主要适用于相似的试验流域和植被条件, 较难推广到其他流域^[10]。相比而言, 水文模拟法具有使用方便、适用范围广、便于推广等优点。大部分学者在利用水文模型研究植被条件与径流关系时, 侧重分析模型的不同植

收稿日期: 2021-03-15; 网络出版日期: 2021-11-02

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20211101.1931.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFA0605002); 国家自然科学基金资助项目(41961124007)

作者简介: 张建云(1957—), 男, 江苏沛县人, 院士, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: jyzhang@nhri.cn

通信作者: 鲍振鑫, E-mail: zxbao@nhri.cn

被输入对模拟径流的影响,关于水文模型中的敏感参数受植被变化影响的研究较薄弱^[11-12]。随着全球变化影响的逐渐增强,水文学家越来越认识到水文模型参数呈现出阶段性的变化特征,例如,熊立华等^[13]选取植被改变剧烈、代表性强的6个水文站为研究对象,提出水文模型参数时变估计框架,构建模型参数与植被条件的函数表达式。由于植被与模型参数之间存在复杂的非线性关系,且水文模型参数之间存在异参同效现象,模型参数个数越少,越容易分析植被与模型参数之间的定量关系^[14]。只有1个参数需要率定的Budyko方程,是解析气候、植被与水文相互关系的重要概念框架,被广泛应用于陆面水热耦合模拟与演变机理分析^[15-19]。相关研究表明Budyko方程参数与植被具有较好的统计关系,例如,Li等^[16]建立了模型参数与植被的线性经验公式;Ning等^[18]建立了模型参数与气候、植被的非线性经验公式。选用参数较少的水文模型、以模型参数为中间变量、利用模型参数与植被的统计关系或经验公式研究植被变化对水文水资源的影响是未来研究的重要方向。此外,以往在黄淮海地区的相关研究中主要以典型子流域为研究对象,为了更好地认识植被变化对径流影响的空间分布特征,亟需加强大尺度不同气候、植被与水文类型条件下的研究工作。

本文选取覆盖多种气候与植被类型、植被变绿显著突出的黄淮海流域为研究对象,在植被指数时空变化特征检测分析的基础上,基于Budyko-Fu公式构建黄淮海流域水热耦合模拟模型,分析模型参数与气候、植被等要素的统计关系并建立经验公式,以模型参数为中间变量,利用弹性系数法和复合函数链式求导法则研究植被变化对黄淮海流域径流的影响及其空间分布特征。研究结果可望提高对变化环境下水循环演变机理的认识,为流域水资源和植被管理政策制定提供科技支撑。

1 研究区概况与数据来源

黄淮海流域位于95°E—122°E、32°N—43°N,包括中国三大河流:黄河、淮河和海河。根据流域结构,将黄淮海流域分为海河山区、海河平原、兰州以上流域、兰州到头道拐、黄河中游、黄河下游、淮河流域以及山东半岛8个研究区(图1)。由于地域辽阔、地势复杂,黄淮海流域的气候条件复杂多变,整体属于大陆季风性气候。研究流域降水的空间分布高度不均匀,从东南沿海地区的1000 mm左右减少到西北地区的400 mm以下。黄淮海流域横跨多个气候带,植被种类多样,是中国重要的生态屏障。该地区径流量锐减^[20-21],水资源严重短缺,2018年黄淮海流域GDP约占全国35%,耕地面积约占全国28.9%,是中国经济发达区与重要粮食生产基地。黄淮海流域作为植被恢复工程的重点区域,近年来大部分区域的植被覆盖情况改善明显^[22]。

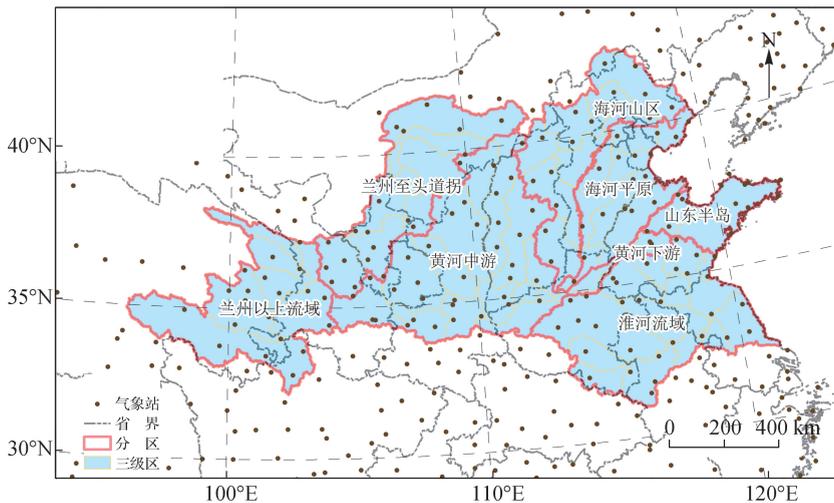


图1 黄淮海流域气象站点分布与分区

Fig. 1 Distribution of meteorological stations and zones in the Huang-Huai-Hai River basin

将黄淮海流域划分为 59 个三级流域, 1982—2016 年径流数据来自流域水文站及水资源公报。黄淮海流域 59 个三级流域 1982—2016 年潜在蒸散发量由彭曼公式计算^[23]。研究区实际蒸散发数据采用 GLEAM-V3.3a 产品^[24-25], 该产品基于卫星观测的地表辐射、气温、降水及植被光学厚度等再分析数据, 利用 Priestley-Taylor 公式估算了地面蒸散发不同的组成部分: 植被蒸腾(E_t), 植物冠层截留损失(E_i), 裸土蒸发(E_b), 雪升华(E_s)和水面蒸发(E_w), 数据集的时间跨度为 1980—2018 年, 空间分辨率为 0.25° 。归一化植被指数 (NDVI) 遥感数据集 GIMMS AVHRR NDVI 从中国西部环境与生态科学数据中心 (<http://westdc.westgis.ac.cn>) 下载得到, 空间分辨率为 8 km, 时间分辨率为 15 d, 时间长度为 1982—2016 年, 利用最大值合成法 MVC (Maximum Value Composites) 对 GIMMS AVHRR NDVI 数据进行处理, 计算得到逐月 NDVI 数据。

2 研究方法

收集流域 1982—2016 年水文气象以及 NDVI 数据, 利用 Slope 趋势法^[26]分析流域 NDVI 变化趋势, 采用 Mann-Kendall 非参数检验方法^[27]进行显著性检验。建立 Budyko-Fu 模型, 基于弹性系数法, 计算得到径流对模型参数变化的弹性系数; 通过最小二乘法拟合模型参数与 NDVI 的半经验公式, 利用决定系数(R^2)和 Pearson 相关系数评价拟合结果, 计算模型参数对 NDVI 变化的弹性系数; 以模型参数为纽带, 研究 NDVI 与径流之间的关系, 得到径流对 NDVI 变化的弹性系数, 定量分析流域植被变化对径流的影响。

2.1 趋势分析法

Slope 趋势分析法^[26]基于回归方程, 利用长时间序列数据进行回归分析, 能够更好地研究不同要素的变化。将 Slope 趋势分析法应用于黄淮海流域, 研究流域植被指数 NDVI 的变化特征, 定量地分析其变化趋势。

Mann-Kendall (M-K) 检验作为一种非参数检验方法, 被广泛应用于降水、径流等水文气象要素的分析^[27], 可以较好地分析流域 NDVI 变化, 并对其进行显著性检验, 定量反映流域植被指数 NDVI 变化趋势的显著性。

2.2 植被-参数-径流分析框架

水文模型具有一定的物理基础, 能够较好地模拟径流的变化, 不少学者^[28-29]基于水文模型研究植被变化与径流间的关系。其中, 植被变化通过改变模型参数, 进而影响径流。因此, 通过植被-参数-径流框架研究植被变化对径流的影响, 具有较强的物理基础。在植被-参数-径流分析框架下, 基于弹性系数法的定义, 能够计算径流对不同影响因子的弹性系数, 表达式如下:

$$\varepsilon_{\chi_i, R} = \frac{\partial R}{\partial \chi_i} \frac{\chi_i}{R} \quad (1)$$

式中: $\varepsilon_{\chi_i, R}$ 为径流对各影响因子的弹性系数; R 为径流量, mm; χ_i 为不同的影响因子(下垫面参数、归一化植被指数)。

弹性系数为正值时表明该影响因子增加对径流有促进作用, 为负值时表明该影响因子增加对径流有削减作用, 弹性系数绝对值越大表明该影响因子对径流作用越显著。

利用 Budyko-Fu 模型和拟合的半经验公式, 计算径流对模型参数的弹性系数与模型参数对 NDVI 的弹性系数, 进一步得到径流对 NDVI 变化的弹性系数($\varepsilon_{\text{NDVI}, R}$), 定量识别植被覆盖变化对径流的影响, 表达式如下:

$$\varepsilon_{\text{NDVI}, R} = \frac{\partial R/R}{\partial I_{\text{NDV}}/I_{\text{NDV}}} = \frac{\partial R/R}{\partial \omega/\omega} \frac{\partial \omega/\omega}{\partial I_{\text{NDV}}/I_{\text{NDV}}} = \varepsilon_{\omega, R} \varepsilon_{\text{NDVI}, \omega} \quad (2)$$

式中: $\varepsilon_{\text{NDVI}, R}$ 为径流对 NDVI 的弹性系数; I_{NDV} 为归一化植被指数; ω 为量纲一常数, 与下垫面条件有关, 反映流域土壤、地形、植被等情况, 默认初值为 2.6, 取值范围为 $(1, +\infty)$; $\varepsilon_{\omega, R}$ 为径流对模型参数 ω 的弹性系数; $\varepsilon_{\text{NDVI}, \omega}$ 为模型参数 ω 对 NDVI 的弹性系数。

2.3 Budyko-Fu 模型

Budyko-Fu^[30]模型被广泛用以描述流域长期水文尺度下降水量、实际蒸散发与潜在蒸散发间的关系，表达式如下：

$$\frac{E}{P} = 1 + \frac{E_0}{P} - [1 + (E_0/P)^\omega]^{1/\omega} \quad (3)$$

式中： E 为实际蒸散发，mm； P 为流域降水量，mm； E_0 为潜在蒸散发，又称蒸发能力，mm。

结合多年平均尺度上的流域水量平衡方程 $R = P - E$ ，则径流 $R = f(P, E_0, \omega)$ 。基于弹性系数法的定义，将径流变化用全微分形式表示，计算径流对模型参数 ω 的弹性系数，表达式如下：

$$\varepsilon_{\omega,R} = (P^\omega + E_0^\omega)^{\frac{1}{\omega}} \left[\frac{P^\omega \ln P + E_0^\omega \ln E_0}{R P^\omega + E_0^\omega} - \frac{\ln P^\omega + E_0^\omega}{\omega R} \right] \quad (4)$$

2.4 ω 的半经验公式

已有研究表明^[31-33]，植被改变与气候变化对模型参数 ω 具有显著影响。为揭示植被与模型参数间的定量关系，识别植被变化对径流的影响，尝试在黄淮海流域建立气候季节性指标 S 、 I_{NDV} 和模型参数 ω 三者的半经验公式。因此，参考 Ning 等^[18] 在年际尺度上建立的基于黄土高原下垫面参数 ω 的半经验公式，构建基于 I_{NDV} 与 S 的模型参数 ω 半经验方程表达式如下：

$$\omega = a + b I_{NDV}^c \exp(dS) \quad (5)$$

式中： a 、 b 、 c 、 d 为半经验公式的回归参数。

在式(5)中输入研究流域模型参数 ω 、 I_{NDV} 和 S ，便可根据最小二乘法拟合半经验公式。由于地球黄赤交角的存在，太阳直射点在南回归线与北回归线之间的反复移动使得气候呈现季节性变化特征，气候季节性变化的主要影响因素就是太阳辐射。赤道以外地区大多数气候因子季节性变化均与太阳辐射变化保持一致的规律性，表现为正弦变化规律。Milly^[34] 假定年内的水分和能量供应服从正弦分布规律，表达式如下：

$$P(t) = \bar{P} \left[1 + \delta_p \sin \frac{2\pi}{\tau} \frac{t}{12} \right] \quad (6)$$

$$E_0(t) = \bar{E}_0 \left[1 + \delta_{E_0} \sin \frac{2\pi}{\tau} \frac{t}{12} \right] \quad (7)$$

式中： \bar{P} 为月平均降水量，mm； δ_p 为月降水相对月平均降水的振幅，量纲一常数； τ 为变化周期，在赤道取 0.5，在赤道以外取 1； t 为时间，以月为单位，4 月至次年 3 月取值依次为 0 到 11； \bar{E}_0 为月平均潜在蒸散发量，mm； δ_{E_0} 为月潜在蒸散发相对月平均潜在蒸散发的振幅，量纲一常数。

Woods^[35] 将 P 和 E_0 的差值进行量纲一化，并定义气候季节性指标 S ，表达式如下：

$$S = \frac{|\delta_p - \delta_{E_0}|}{\bar{P}} \quad (8)$$

式中： Φ 为干旱指数， $\Phi = \bar{E}_0 / \bar{P}$ 。 S 取较小值时，表明降雨和潜在蒸发之间的平衡变化不大。

3 结果分析

3.1 NDVI 时空变化特征

基于黄淮海流域 1982—2016 年的逐年 NDVI 数据，计算发现研究区 59 个三级流域的 NDVI 年均值为 0.14~0.49(图 2(a))，其空间分布整体呈现“东高西低、南高北低”特征。采用 Slope 趋势分析法计算黄淮海 59 个三级流域 1982—2016 年的 NDVI 演变趋势，并对其进行显著性检验。结果表明：研究流域 NDVI 空间分布具有明显的地理差异性，黄河中下游与淮河流域的 NDVI 均值较高(见图 2(a))；研究流域植被指数总体均呈现增加趋势(见图 2(b))，增长趋势十分显著(M-K 检验值均大于 1.96，见图 2(c))，说明黄淮海

流域的植被生长状况明显得到改善。

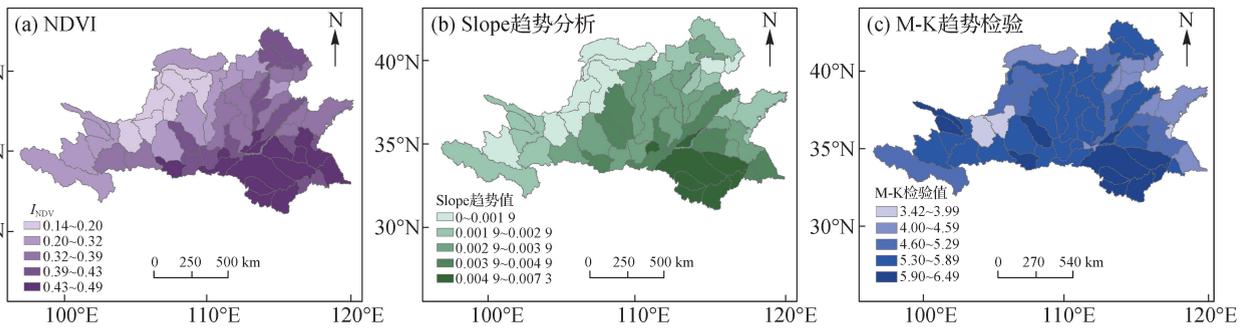


图 2 黄淮海流域 1982—2016 年 NDVI 变化趋势及其空间分布

Fig. 2 NDVI change trend and spatial distributions of the Huang-Huai-Hai River basin from 1982 to 2016

3.2 Budyko-Fu 模型构建及径流对模型参数的弹性系数

输入 Budyko-Fu 模型的实际蒸散发数据来源于 GLEAM-V3.3 地表蒸散发产品, 需要验证模型的模拟效果。用式(3)计算黄淮海流域 59 个三级区的模型参数 ω , 再根据公式 $R = f(P, E_0, \omega)$ 得到三级区的多年平均径流量。对比黄淮海流域 59 个三级区 1982—2016 年多年平均模拟和实测径流量, 如图 3 所示, 模拟径流量与实测径流量的相关关系较好, 决定性系数为 0.99。这表明, Budyko-Fu 模型具有较好的径流预测能力, 在黄淮海流域具有一定的适应性。

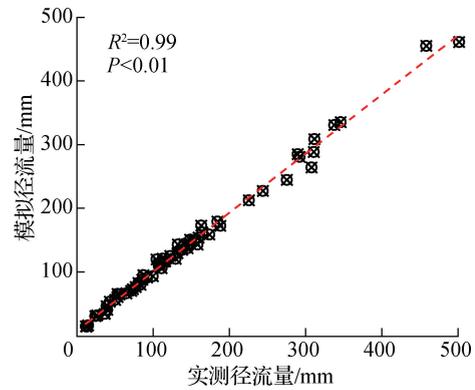


图 3 实测和模拟径流量的比较

Fig. 3 Comparison of observed runoff and simulated runoff

基于 Budyko-Fu 模型与弹性系数法, 可以计算得到黄淮海 59 个三级流域径流对模型参数 ω 的弹性系数, 结果如图 4 所示。研究发现: ① 黄淮海流域 $\varepsilon_{\omega,R}$ 为负值, 表示下垫面参数 ω 增加会导致径流量减少, 且 $\varepsilon_{\omega,R}$ 值越小, 参数 ω 增加会导致径流量减少的程度越大; ② 黄淮海流域 $\varepsilon_{\omega,R}$ 值的空间分布为“西低东高、北低南高”, 最小值为 -4.77, 最大值为 -0.87; ③ 淮河流域 $\varepsilon_{\omega,R}$ 较大, 说明参数 ω 增加导致径流量减少的程度较小, 兰州到头道拐地区 $\varepsilon_{\omega,R}$ 较小, 说明参数 ω 增加导致径流量减少的程度较大; ④ 流域 $\varepsilon_{\omega,R}$ 均值为 -2.45, 表明参数 ω 每增加 10%, 流域径流平均减少 24.5%。

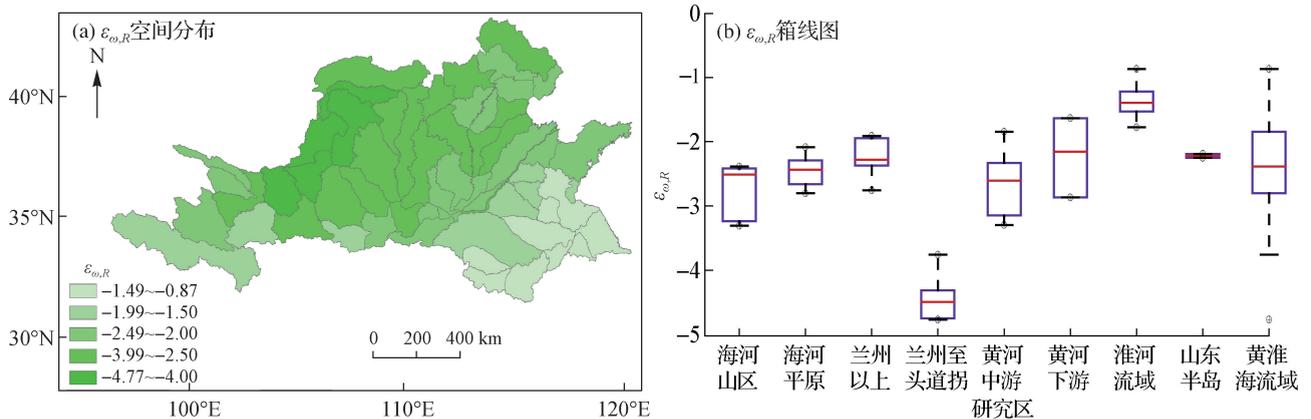


图 4 $\varepsilon_{\omega,R}$ 空间分布及不同研究区 $\varepsilon_{\omega,R}$ 箱线图

Fig. 4 Spatial distributions of $\varepsilon_{\omega,R}$ and boxplot of $\varepsilon_{\omega,R}$ in different study regions

3.3 模型参数经验公式构建及其对 NDVI 的弹性系数

利用 59 个三级区 1982—2016 年月平均降水和潜在蒸散发数据，分别绘制年内变化曲线(图 5(a)，图 5(c))，与正弦曲线做线性拟合(图 5(b)，图 5(d))。结果显示：虽然潜在蒸散发年内变化曲线的峰值提前了 1 个月，但从整体来看，流域降水及潜在蒸散发的季节性变化符合正弦变化规律。

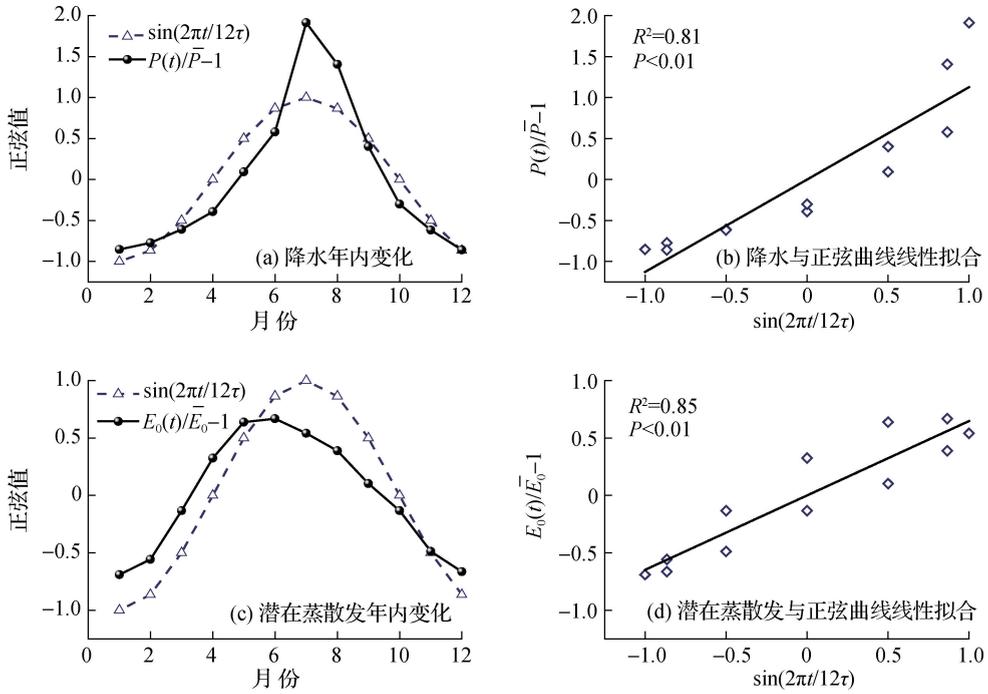


图 5 降水和潜在蒸散发的季节变化规律

Fig. 5 Seasonal variation of precipitation and potential evapotranspiration

依据公式(8)，可以计算 59 个三级区 1982—2016 年的气候季节性指标 S 。进一步观察模型参数 ω 与 NDVI(图 6(a))和 S 的相关性(图 6(b))。结果显示，模型参数 ω 随 NDVI 的增加而增加，随 S 的增加而减小。 R^2 分别为 0.69 和 0.89，均在 0.01 水平上显著相关。表明参数 ω 对植被指数和气候季节性指标变化的响应较为明显。

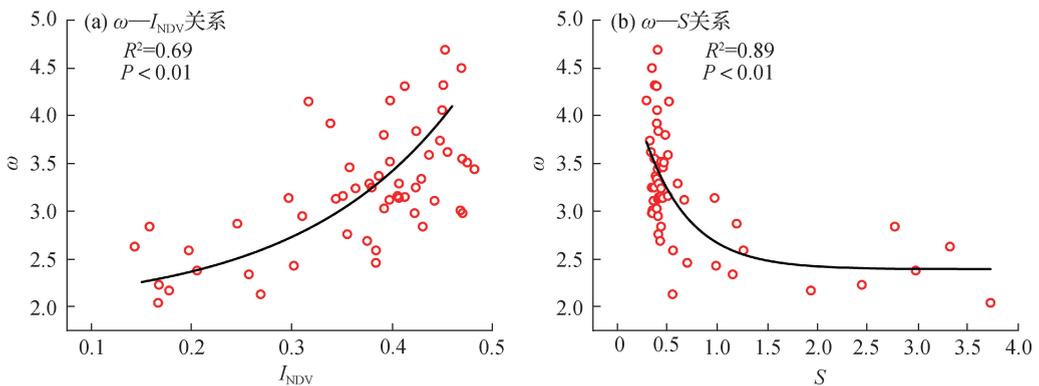


图 6 模型参数 ω 与 NDVI 及 S 的关系

Fig. 6 Relationship between the parameter ω with NDVI and S

将黄淮海流域 59 个三级区的模型参数、植被指数和气候季节性指标输入公式(5)，采用最小二乘法拟

合得到适用于研究流域的半经验公式, 表达式如下:

$$\omega = 1.39 + 5.60 I_{NDV}^{1.15} \exp(-0.64S) \tag{9}$$

该半经验公式决定系数为 0.72, 显著性水平经检验达到极显著 ($P < 0.01$), 因此, 该公式可以用于分析黄淮海流域下垫面参数 ω 变化与 NDVI 变化的关系。

根据公式(9), 利用弹性系数法计算下垫面参数 ω 对 NDVI 的弹性系数, 分析 $\epsilon_{NDVI,\omega}$ 空间分布情况(图 7(a))及 8 个研究区的值(图 7(b))。研究结果表明: ① 黄淮海流域 $\epsilon_{NDVI,\omega}$ 为正值, 表明 NDVI 增加会导致参数 ω 增加, 且 $\epsilon_{NDVI,\omega}$ 值越大, 表示 NDVI 变化对参数 ω 的影响越显著; ② $\epsilon_{NDVI,\omega}$ 空间分布整体呈现为“西高东低”, 比较图 2(a) 发现, $\epsilon_{NDVI,\omega}$ 的空间分布与 NDVI 空间分布特征相反, 意味着地区植被条件越差, 参数 ω 对 NDVI 的变化越敏感; ③ 在黄河下游及淮河流域, 参数 ω 对 NDVI 变化不敏感, 在兰州至头道拐地区, 参数 ω 对 NDVI 变化比较敏感; ④ 流域 $\epsilon_{NDVI,\omega}$ 的数值范围均值为 0.31, 表明流域 NDVI 每增加 10%, 表征流域下垫面特征的模型参数 ω 平均增加 3.1%。

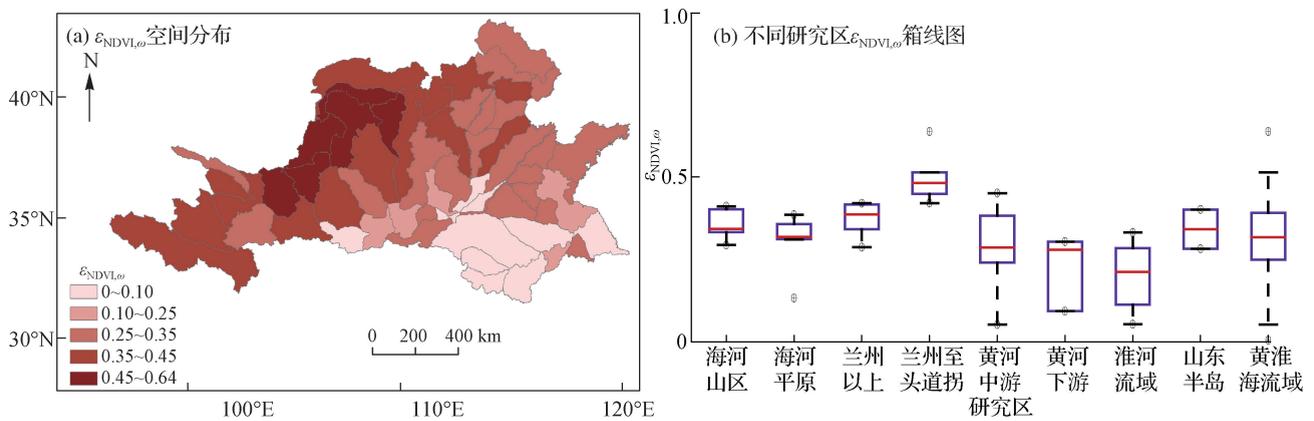


图 7 $\epsilon_{NDVI,\omega}$ 空间分布及不同研究区 $\epsilon_{NDVI,\omega}$ 箱线图

Fig. 7 Spatial distributions of $\epsilon_{NDVI,\omega}$ and boxplot of $\epsilon_{NDVI,\omega}$ in different study regions

3.4 径流对 NDVI 的弹性系数

基于参数 ω 与 NDVI 的半经验公式及 Budyko-Fu 方程, 根据公式(2)可以计算 59 个三级流域的 $\epsilon_{NDVI,R}$, 即径流对 NDVI 变化的弹性系数(图 8(a)), 并分析 8 个不同研究区的 $\epsilon_{NDVI,R}$ (图 8(b))。研究结果表明: ① 黄淮海流域 $\epsilon_{NDVI,R}$ 为负值, 表明黄淮海流域 NDVI 变化对径流有削弱作用, 且 $\epsilon_{NDVI,R}$ 值越小, NDVI 增加对径流的削弱作用越强; ② 在黄河中下游及淮河流域, 径流对 NDVI 变化不敏感, 而在兰州至头道拐区域,

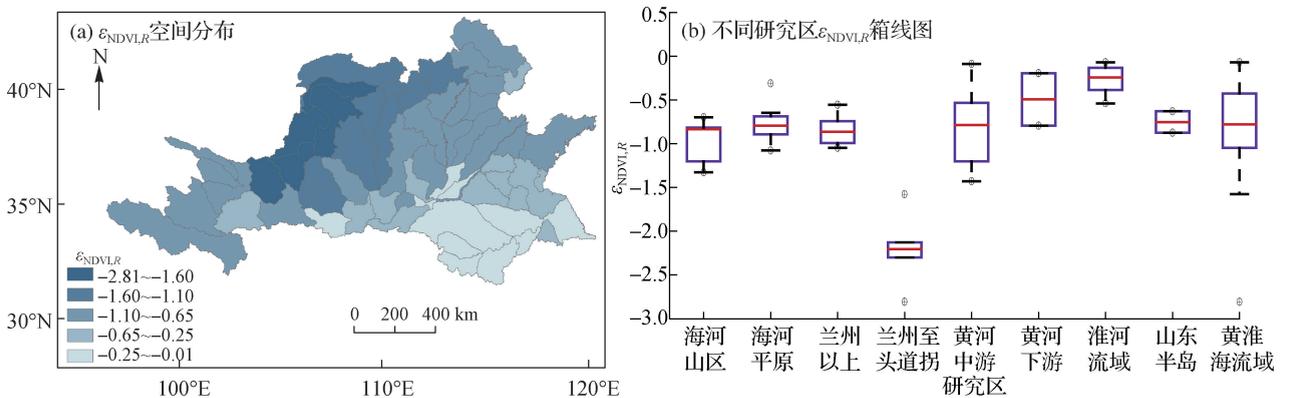


图 8 $\epsilon_{NDVI,R}$ 空间分布及不同研究区 $\epsilon_{NDVI,R}$ 箱线图

Fig. 8 Spatial distributions of $\epsilon_{NDVI,R}$ and boxplot of $\epsilon_{NDVI,R}$ in different study regions

径流对 NDVI 变化比较敏感；③ 黄淮海流域 $\varepsilon_{\text{NDVI},R}$ 均值为 -0.83 ，意味着流域平均 NDVI 增加 10%，径流平均减少 8.3%。

由于 $\varepsilon_{\text{NDVI},R}$ 为负值，则值越小，表明径流对 NDVI 的变化越敏感。进一步分析径流对 NDVI 的弹性系数与干旱指数 (Φ) 和 NDVI 的关系，分别作 $\varepsilon_{\text{NDVI},R}$ 与 Φ 、NDVI 的相关图，如图 9 所示。结果表明：① $\varepsilon_{\text{NDVI},R}$ 随 Φ 的增加而减少(图 9(a))，随 NDVI 的增加而增加(图 9(b))；② 决定系数分别为 0.81、0.85，均在 0.001 水平上显著相关；③ 越干旱、植被条件越差的地区，径流对 NDVI 的变化越敏感，NDVI 变化对径流影响越显著。这是由于在干旱地区，植被生长主要受到水资源的限制，而在湿润地区，水资源丰富，植被生长更依赖温度、养分等其他环境条件^[36-37]。这种紧密的植被-参数-径流关系，导致干旱地区水文过程变化对植被变化的敏感性高于湿润地区。Bao 等^[38]使用机器学习算法评估黄淮海流域 NDVI 对温度及降水变化的敏感性，发现流域 NDVI 对温度和降水变化有正向响应。这表明，气候变化不仅对径流有直接影响(即降水增加会使径流增加，潜在蒸散发增加导致径流减少)，还可以通过改变植被条件间接影响径流，相比湿润地区，这种影响在干旱地区更加明显。鉴于此，定量分析植被变化对径流的影响，并研究其与流域干旱程度间的关系，有利于从水资源角度指导干旱地区植被恢复活动，应对未来极端气候变化。由于植树造林、退耕还林(草)等植被恢复工程的实施，中国植被覆盖情况得到明显改善^[2-4,22]。关于植被变化对流域径流影响的研究方法虽然不同，但基本取得一致结论：植被覆盖率增加是导致地表径流减少的重要因素^[5,15-16]。本研究认为植被覆盖率增加对径流有削减作用，这与前人的研究结论基本一致。分析了径流对 NDVI 弹性系数与干旱指数间的关系，发现流域越干旱，植被变化对径流的影响越明显，为干旱地区在未来变化环境下的水资源管理提供了支撑。

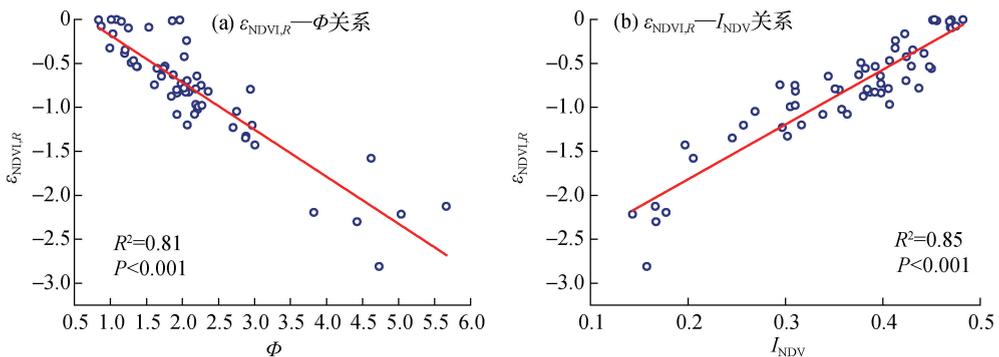


图 9 $\varepsilon_{\text{NDVI},R}$ 与干旱指数 Φ 和 NDVI 的关系

Fig. 9 Relationship between $\varepsilon_{\text{NDVI},R}$ with the aridity index Φ and NDVI

4 结 论

本文利用黄淮海流域 NDVI 数据，研究了流域植被覆盖的时空变化特征，建立了模型参数 ω 半经验方程，基于 Budyko-Fu 方程与弹性系数法，分析了不同研究区植被变化对径流的影响，主要结论如下：

(1) 黄淮海流域 59 个三级流域 1982—2016 年的植被指数呈显著增加趋势，表明黄淮海流域植被覆盖条件正在改善。

(2) 基于 Budyko-Fu 方程的弹性系数法评估径流对参数 ω 变化的响应情况，流域径流对参数 ω 的弹性系数最小值为 -4.77 ，最大值为 -0.87 ，全流域平均值为 -2.45 ，说明模型参数 ω 与径流呈现负相关关系，且参数 ω 平均增加 10%，会导致流域径流平均减少 24.5%。

(3) 黄淮海流域模型参数 ω 对 NDVI 的弹性系数最小值为 0.05，最大值为 0.64，流域平均值为 0.31，说明植被覆盖条件与模型参数 ω 呈现正相关关系，NDVI 平均增加 10%，会导致参数 ω 平均增加 3.1%。

(4) 黄淮海流域植被覆盖条件改善对径流有削弱作用,流域 NDVI 平均增加 10%,会导致径流平均减少 8.3%,且植被变化对径流的影响空间分布明显,流域气候越干旱、植被条件越差,植被变化对径流影响越显著。

参考文献:

- [1] WEI X H, LI Q, ZHANG M F, et al. Vegetation cover—another dominant factor in determining global water resources in forested regions[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(2): 786-795.
- [2] DETSCH F, OTTE I, APPELHANS T, et al. Seasonal and long-term vegetation dynamics from 1-km GIMMS-based NDVI time series at Mt. Kilimanjaro, Tanzania[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 178: 70-83.
- [3] EVARISTO J, MCDONNELL J J. Global analysis of streamflow response to forest management[J]. *Nature*, 2019, 570(7762): 455-461.
- [4] CHEN C, PARK T, WANG X H, et al. China and India lead in greening of the world through land-use management[J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2(2): 122-129.
- [5] 张树磊, 杨大文, 杨汉波, 等. 1960—2010 年中国主要流域径流量减小原因探讨分析[J]. *水科学进展*, 2015, 26(5): 605-613. (ZHANG S L, YANG D W, YANG H B, et al. Analysis of the dominant causes for runoff reduction in five major basins over China during 1960—2010[J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(5): 605-613. (in Chinese))
- [6] FU B J, WANG S, LIU Y, et al. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017, 45(1): 223-243.
- [7] MONTANARI A, YOUNG G, SAVENIJE H H G, et al. “Panta rhei—everything flows”: change in hydrology and society: the IAHS scientific decade 2013—2022[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2013, 58(6): 1256-1275.
- [8] ZHANG L, 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.
- [9] 张晨成, 邵明安, 王云强, 等. 黄土区切沟对不同植被下土壤水分时空变异的影响[J]. *水科学进展*, 2016, 27(5): 679-686. (ZHANG C C, SHAO M A, WANG Y Q, et al. Effects of gullies on the spatiotemporal variability of soil-water under different vegetation types on the Loess Plateau[J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(5): 679-686. (in Chinese))
- [10] 李妍敏, 安翼, 刘青泉. 植被分布对小流域产流影响的数值实验[J]. *水科学进展*, 2015, 26(2): 187-195. (LI Y M, AN Y, LIU Q Q. Effects of the distribution of vegetation on small catchment runoff during rainstorm events[J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(2): 187-195. (in Chinese))
- [11] BAO Z X, ZHANG J Y, WANG G Q, et al. The impact of climate variability and land use/cover change on the water balance in the Middle Yellow River basin, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 577: 123942.
- [12] 鲍振鑫, 张建新, 严小林, 等. 基于四元驱动的海河流域河川径流变化归因定量识别[J]. *水科学进展*, 2021, 32(2): 171-181. (BAO Z X, ZHANG J Y, YAN X L, et al. Quantitative assessment of the attribution of runoff change caused by four factors in the Haihe River basin[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(2): 171-181. (in Chinese))
- [13] 熊立华, 刘烁楠, 熊斌, 等. 考虑植被和人类活动影响的水文模型参数时变特征分析[J]. *水科学进展*, 2018, 29(5): 625-635. (XIONG L H, LIU S N, XIONG B, et al. Impacts of vegetation and human activities on temporal variation of the parameters in a monthly water balance model[J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(5): 625-635. (in Chinese))
- [14] DENG C, LIU P, WANG D B, et al. Temporal variation and scaling of parameters for a monthly hydrologic model[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 558: 290-300.
- [15] XU X Y, YANG D W, YANG H B, 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.
- [16] LI D, PAN M, CONG Z T, et al. Vegetation control on water and energy balance within the Budyko framework[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(2): 969-976.
- [17] LIU J Y, ZHANG Q, ZHANG Y Q, et al. Deducing climatic elasticity to assess projected climate change impacts on streamflow change across China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(19): 10228-10245.
- [18] NING T T, LI Z, LIU W Z. Vegetation dynamics and climate seasonality jointly control the interannual catchment water balance in the Loess Plateau under the Budyko framework[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(3): 1515-1526.

- [19] LI Y Z, MAO D H, FENG A Q, et al. Will human-induced vegetation greening continually decrease runoff in the loess plateau of China? [J]. *Forests*, 2019, 10(10): 906.
- [20] 张建云, 王国庆, 金君良, 等. 1956—2018 年中国江河径流演变及其变化特征[J]. *水科学进展*, 2020, 31(2): 153-161. (ZHANG J Y, WANG G Q, JIN J L, et al. Evolution and variation characteristics of the recorded runoff for the major rivers in China during 1956—2018[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(2): 153-161. (in Chinese))
- [21] 王国庆, 张建云, 管晓祥, 等. 中国主要江河径流变化成因定量分析[J]. *水科学进展*, 2020, 31(3): 313-323. (WANG G Q, ZHANG J Y, GUAN X X, et al. Quantifying attribution of runoff change for major rivers in China[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(3): 313-323. (in Chinese))
- [22] ZHAO A Z, ZHANG A B, LU C Y, et al. Spatiotemporal variation of vegetation coverage before and after implementation of Grain for Green Program in Loess Plateau, China[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 104: 13-22.
- [23] GUAN X X, ZHANG J Y, YANG Q L, et al. Changing characteristics and attribution analysis of potential evapotranspiration in the Huang-Huai-Hai River basin, China[J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2021, 133(1): 97-108.
- [24] MIRALLES D G, HOLMES T R H, de JEU R A M, et al. Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(2): 453-469.
- [25] MARTENS B, MIRALLES D G, LIEVENS H, et al. GLEAM v3: satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture [J]. *Geoscientific Model Development*, 2017, 10(5): 1903-1925.
- [26] PIAO S L, CIAIS P, HUANG Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. *Nature*, 2010, 467(7311): 43-51.
- [27] CHEBANA F, OUARDA T B M J, DUONG T C. Testing for multivariate trends in hydrologic frequency analysis[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 486: 519-530.
- [28] LIU M X, XU X L, XU C H, et al. A new drought index that considers the joint effects of climate and land surface change[J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(4): 3262-3278.
- [29] ZHANG D, LIU X M, BAI P. Different influences of vegetation greening on regional water-energy balance under different climatic conditions[J]. *Forests*, 2018, 9(7): 412.
- [30] 傅抱璞. 论陆面蒸发的计算[J]. *大气科学*, 1981, 5(1): 23-31. (FUH B P. On the calculation of the evaporation from land surface[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1981, 5(1): 23-31. (in Chinese))
- [31] ZENG R J, CAI X M. Climatic and terrestrial storage control on evapotranspiration temporal variability: analysis of river basins around the world[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(1): 185-195.
- [32] ZHANG D, LIU X M, ZHANG Q, et al. Investigation of factors affecting intra-annual variability of evapotranspiration and streamflow under different climate conditions[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 543: 759-769.
- [33] ABATZOGLOU J T, FICKLIN D L. Climatic and physiographic controls of spatial variability in surface water balance over the contiguous United States using the Budyko relationship[J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(9): 7630-7643.
- [34] MILLY P C D. Climate, interseasonal storage of soil water, and the annual water balance[J]. *Advances in Water Resources*, 1994, 17(1/2): 19-24.
- [35] WOODS R. The relative roles of climate, soil, vegetation and topography in determining seasonal and long-term catchment dynamics[J]. *Advances in Water Resources*, 2003, 26(3): 295-309.
- [36] ZHANG S L, YANG Y T, MCVICAR T R, et al. An analytical solution for the impact of vegetation changes on hydrological partitioning within the budyko framework[J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(1): 519-537.
- [37] YANG Y T, DONOHUE R J, MCVICAR T R, et al. An analytical model for relating global terrestrial carbon assimilation with climate and surface conditions using a rate limitation framework[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(22): 9825-9835.
- [38] BAO Z X, ZHANG J Y, WANG G Q, et al. The sensitivity of vegetation cover to climate change in multiple climatic zones using machine learning algorithms[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 124: 107443.

Analysis of the effects of vegetation changes on runoff in the Huang-Huai-Hai River basin under global change*

ZHANG Jianyun^{1,2}, ZHANG Chengfeng^{1,2}, BAO Zhenxin^{2,3}, LI Miao⁴, WANG Guoqing^{2,3},
GUAN Xiaoxiang^{1,2}, LIU Cuishan^{2,3}

(1. *College of Hydrology and Water Resource, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *Research Center for Climate Change, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China*; 3. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 4. *Water Conservancy Bureau of Yongzhou, Yongzhou 425000, China*)

Abstract: Vegetation is one of the critical environmental factors driving the hydrologic cycle. The impact of vegetation change on runoff is a hot issue. As a pronounced greening region, the Huang-Huai-Hai River basin (HHHRB) was selected as the studying area. Based on long-term (1982—2016) hydro-meteorological and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) datasets, the spatial and temporal change in NDVI was detected using Mann-Kendall's test methodology. The relationship between NDVI and the parameter ω of Budyko-Fu's model was analyzed using an empirical formula and an elasticity method. Taking the parameter ω as a link, the impact of NDVI change on runoff in HHHRB was investigated with the chain rule for derivatives of complex functions. Several new findings were investigated: ① There was a statistically significant increasing trend in NDVI during the last 35 years over HHHRB. ② An increase in NDVI would increase the model parameter ω , thereby leading to a decrease in the runoff. ③ There might be an average reduction of 8.3% in runoff as a 10% increase in NDVI in the HHHRB. ④ The runoff was more sensitive to NDVI change under drier climate and sparser vegetation conditions. The results could improve the understanding of the mechanism of the water cycle in a changing environment and might provide scientific and technological support for water resources planning and vegetation management.

Key words: vegetation change; runoff response; Budyko hypothesis; elasticity coefficients; Huang-Huai-Hai River basin

* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No. 2017YFA0605002) and the National Natural Science Foundation of China (No. 41961124007).