

姬广兴, 高慧珊, 高红凯, 等. 汉江流域植被变化及对径流的影响[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(3): 512-520. JI G X, GAO H S, GAO H K, et al. Vegetation variation in the Han River and its impact on runoff[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(3): 512-520. (in Chinese)

## 汉江流域植被变化及对径流的影响

姬广兴<sup>1</sup>, 高慧珊<sup>1</sup>, 高红凯<sup>2</sup>, 岳帅均<sup>1</sup>, 张进财<sup>1</sup>,  
李青松<sup>1</sup>, 李根明<sup>1</sup>, 陈伟强<sup>1</sup>, 郭宇龙<sup>1</sup>, 张亚丽<sup>1</sup>

(1. 河南农业大学资源与环境学院, 郑州 450046; 2. 华东师范大学地理科学学院, 上海 200241)

**摘要:** 基于汉江流域的气象水文和归一化植被指数(normalized difference vegetation index,  $I_{NDV}$ )数据, 采用多元线性回归分析方法定量计算不同因素对汉江流域植被变化的影响程度, 然后采用修正后的 Budyko 方程和弹性系数法定量计算植被变化对径流变化的影响程度。结果表明: 1982—2015 年的年均  $I_{NDV}$  呈显著的波动增长趋势 ( $p < 0.01$ ), 且空间异质性较明显, 植被增长明显地区主要分布在中下游区域; 气候条件和人为因素对  $I_{NDV}$  增长具有积极作用, 贡献率分别为 99.56% 和 0.44%, 但其贡献率的时空分布存在显著差异; 下垫面参数( $\omega$ )和  $I_{NDV}$  之间有较强相关性, 表明流域产流能力对植被变化具有高度敏感性; 气候因素引起的植被变化和人为因素引起的植被变化对径流量的贡献率分别为 28.28% 和 0.12%, 表明气候因素导致植被增长是致使汉江流域水资源减少的重要因素之一, 因此, 应高度重视植被生长导致流域水资源减少这一问题。

**关键词:** 植被变化; 人类活动; 气候变化; 径流变化; 汉江流域

**中图分类号:** P333 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbqk.2024.0053

近几十年来, 中国各地开展了大量植被恢复工程, 植被覆盖率快速增长<sup>[1-2]</sup>, 对截留降水、影响径流蒸发和改变土壤等方面产生了重要的影响<sup>[3-4]</sup>。水资源是区域内工业和农业发展的必需条件之一, 也是经济社会发展规模的重要制约因素之一, 对区域经济发展极为重要。而径流是流域最重要的水资源之一, 对自然生态环境至关重要<sup>[5-6]</sup>。受人类活动和全球变化的影响, 我国植被覆盖空间格局发生转变, 而植被作为影响径流的主要因素之一, 其变化必然对径流产生影响。汉江流域作为长江流域最大的支流, 上游是中国南水北调中线工程的水源地, 中下游是中国主要的工业和农业生产集中地区。因此, 分析汉江流域植被变化的时空格局, 量化不同驱动力对植被变化的贡献, 并进一步量化植被变化对径流的影响, 有利于评估生态修复措施的水文效果, 为生态环境保护提供科学指导。

诸多学者研究了汉江流域植被和径流量变化特

征和影响因素<sup>[7-12]</sup>。例如, 徐静文等<sup>[13]</sup>检测到在人类活动的影响下, 低海拔地区归一化植被指数(normalized difference vegetation index,  $I_{NDV}$ )的增长率大于高海拔地区。可见, 人类活动对汉江中游平原地区的植被变化的影响较为显著。Zhan 等<sup>[14]</sup>和 Chen 等<sup>[15]</sup>利用不同分析方法分析了汉江流域中下游植被变化的特征和驱动力, 发现其  $I_{NDV}$  呈增长趋势。班璇等<sup>[16]</sup>探讨了 1965—2016 年汉江流域的径流变化趋势, 并表明汉江流域径流在 1990 年开始下降。Li 等<sup>[17]</sup>定量评价了不同因素对汉江流域季节流量变化的贡献, 认为气候因素是影响径流变化的主导驱动力。Li 等<sup>[18]</sup>发现气候因素是汉江流域上游径流减少的主要因素, 而人为因素对汉江中游径流变化的影响超过了气候因素。然而, 很少有研究定量计算气候条件和人为因素对汉江流域植被变化影响程度的空间分布, 并计算其植被变化对流量变化的影响程度。

收稿日期: 2023-11-10 修回日期: 2024-04-18 网络出版时间: 2024-05-27

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240523.1356.004>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1700900); 国家自然科学基金项目(42122002; 42071081); 河南省科技攻关项目(222102320041); 河南省高校人文社会科学研究一般项目(2023-ZZJH-189); 河南农业大学拔尖人才项目(30501031)

作者简介: 姬广兴(1990—), 男, 河南商丘人, 博士, 讲师, 主要从事变化环境下生态水文响应研究。E-mail: [guangxingji@henau.edu.cn](mailto:guangxingji@henau.edu.cn)

通信作者: 高红凯(1984—), 男, 河南濮阳人, 教授, 博士, 主要从事流域水文模型、寒区水文、生态水文研究。E-mail: [hkgao@geo.cnu.edu.cn](mailto:hkgao@geo.cnu.edu.cn)

因此,通过以下4个步骤分析汉江流域植被的时空变化及其对径流变化的影响:(1)探讨汉江流域  $I_{NDV}$  的时空变化特征;(2)采用多元线性回归方法量化气候条件和人为因素对汉江流域植被变化贡献的空间分布;(3)构造修正的 Budyko 方程;(4)使用修正的 Budyko 方程和弹性分析方法量化植被变化对汉江流域流量变化的影响。研究有助于阐明汉江流域的植被时空特征及其对径流变化的影响,为汉江流域经济可持续发展和生态环境的保护提供参考依据。

## 1 研究区概况

汉江流域全长约 1 570 km,位于东经  $106^{\circ}15' \sim 114^{\circ}20'$ ,北纬  $30^{\circ}10' \sim 34^{\circ}20'$ 。全区汇水面积约为  $15.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,主要流经陕西、湖北两省。丹江口以上流域为上游,多为山地;丹江口至钟祥为中游地区,以丘陵为主;钟祥至汉口为下游,流经江汉平原<sup>[19]</sup>,该流域上游以林地为主,耕地主要分布在中下游地区。平均气温和降水量分别在  $14 \sim 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $700 \sim 1\ 800 \text{ mm}$ ,大部分降水集中在夏季和秋季,占年降水量的  $3/4$ <sup>[20]</sup>。

## 2 数据来源与方法

### 2.1 数据来源

皇庄监测站 1982—2015 年的径流量数据来自《中华人民共和国水文年鉴》;汉江流域 1982—2015 年气象站点数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),站点的参考蒸发量采用 Penman-Monteith 公式计算得出; $I_{NDV}$  数据来自 GIMMSNDVI3gV1.0 数据集(<https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/>),时间范围为 1982—2015 年,空间分辨率为  $8 \text{ km} \times 8 \text{ km}$ ,时间分辨率为 15 d。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 相关性分析

通过这种方法定量表示地理要素间相互关系紧密程度,两要素间相互关系可由简单的相关系数描述,由三要素组成的地理系统,另一要素被认为是常数(不变),而分别研究两要素间相互关系紧密程度则采用偏相关分析<sup>[21]</sup>。偏相关分析具体计算公式为

$$R_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})(Y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

$$R_{XYZ} = \frac{R_{XY} - R_{XZ}R_{YZ}}{\sqrt{1 - R_{XZ}^2} \sqrt{1 - R_{YZ}^2}} \quad (2)$$

$$t = \frac{R_{XYZ} \sqrt{n - m - 1}}{\sqrt{1 - R_{XYZ}^2}} \quad (3)$$

式(1)至(3)中: $R_{XY}$ 表示变量  $X$ 与变量  $Y$ 的相关系数; $X_i$ 与  $Y_i$ 表示在  $i$ 年 2 个变量的数值; $\bar{x}$ 和  $\bar{y}$ 分别表示变量  $X$ 和变量  $Y$ 的  $n$ 年平均值; $R_{XYZ}$ 表示在  $Z$ 保持不变的情况下变量  $X$ 和变量  $Y$ 的偏相关系数; $t$ 表示偏相关分析的显著性检验值。

#### 2.2.2 多元回归残差分析

使用残差分析来量化人类活动对植被生长的影响。研究中通过建立  $I_{NDV}$ 与降水、气温之间的回归模型来获得  $I_{NDV}$ 的预测值( $I_{NDV,p}$ ),即为气候变化的影响量,从遥感影像中提取的  $I_{NDV}$ 为实际观测值( $I_{NDV,r}$ ),实际观测值与预测值之间的差可以反映出人类活动对植被生长的影响<sup>[22]</sup>,表达式为

$$I_{NDV,p} = c + a \times P + b \times ET_0 \quad (4)$$

$$\varepsilon = I_{NDV,r} - I_{NDV,p} \quad (5)$$

式(4)和(5)中: $a$ 、 $b$ 为二元一次线性回归系数; $c$ 为常数; $P$ 表示降雨量; $ET_0$ 表示参考蒸发量; $\varepsilon$ 表示残差。残差值大于 0 时,说明人类活动对植被生长产生正面影响;残差小于 0 时,则相反;残差值等于 0 时,说明人类活动对植被生长基本无影响。

通过残差分析可进一步得到气候因素和人类活动对  $I_{NDV}$ 的贡献率,表达式为

$$H = \frac{\varepsilon}{I_{NDV,r}} \times 100\% \quad (6)$$

$$C = \frac{I_{NDV,p}}{I_{NDV,r}} \times 100\% \quad (7)$$

式(6)和(7)中: $C$ 表示气候因素对  $I_{NDV}$ 变化的贡献率; $H$ 表示人类活动对  $I_{NDV}$ 变化的贡献率,其中,将气候因素之外的所有因素都归为人类活动。

#### 2.2.3 校正的 Budyko 方程

对于一个闭合流域而言,水量平衡表达为

$$R = P - ET_a \pm \Delta S \quad (8)$$

式中: $ET_a$ 为实际蒸散量,  $\text{mm/a}$ ;  $\Delta S$ 为土壤水储量变化量,长时间尺度的  $\Delta S$ 可认为不变。即公式(8)变化为

$$R = P - ET_a \quad (9)$$

根据 Budyko 假设理论, 特定流域多年尺度实际蒸散发是干燥指数的函数, 表达式为

$$ET_a = Pf(I_A) \quad (10)$$

式中:  $I_A$  为干燥指数, 是参考蒸发量( $ET_0$ )与降水量( $P$ )的比值, 表达式为

$$I_A = \frac{ET_0}{P} \quad (11)$$

式(9)和式(10)结合得

$$R = P - Pf(I_A) = P[1 - f(I_A)] \quad (12)$$

$f(I_A)$ 参考 Budyko 框架的傅抱璞<sup>[23]</sup>模型, 表达式为

$$f(I_A) = 1 + I_A - (1 + I_A^\omega)^{1/\omega} \quad (13)$$

式中:  $\omega$ 表征流域属性信息的变量, 也是植被水分利用效率的指标, 数值越高表示植被蒸散发越多, 形成地表径流就越少。

式(13)代入式(12), 可得

$$R = P[(1 + I_A^\omega)^{1/\omega} - I_A] \quad (14)$$

根据 Li 等<sup>[24]</sup>的研究结果, 可知 Budyko 假设中的参数 $\omega$ 与  $I_{NDV}$  存在线性关系, 表达式为

$$\omega = gI_{NDV} + k \quad (15)$$

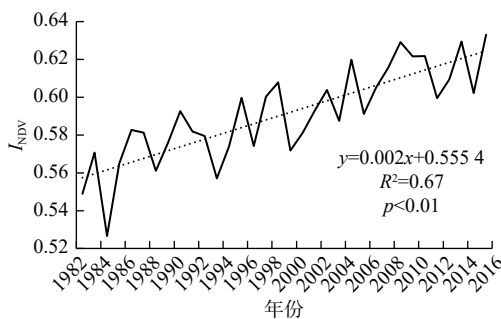
式中:  $g$ 、 $k$  对于特定流域是常数, 需要进行拟合求算,  $g$  值的大小决定了参数 $\omega$ 与植被信息变化的相关强度。

结合式(13)、式(14)和式(15), 得到径流与气候和植被指数的关系式, 进一步估算汉江流域径流对植被的响应, 表达式为

$$R = P \left[ \left( 1 + I_A^{gI_{NDV} + k} \right)^{1/(gI_{NDV} + k)} - I_A \right] \quad (16)$$

通过因变量  $y$  变化率与自变量  $x$  变化率的比得到弹性系数, 表达式为

$$\varepsilon = \lim_{\Delta x/x \rightarrow 0} \frac{\Delta y/y}{\Delta x/x} = \frac{\Delta y}{\Delta x} \frac{x}{y} \quad (17)$$



(a)  $I_{NDV}$  时间变化特征

同理, 径流深( $R$ )对  $\omega$ ,  $ET_0$ ,  $P$  和  $I_{NDV}$  的弹性系数可以计算得到。

$$\varepsilon_\omega = \frac{\Delta R}{\Delta \omega} \frac{\omega}{R} \quad (18)$$

$$\varepsilon_{ET_0} = \frac{\Delta R}{\Delta ET_0} \frac{ET_0}{R} \quad (19)$$

$$\varepsilon_P = \frac{\Delta R}{\Delta P} \frac{P}{R} \quad (20)$$

$$\varepsilon_{I_{NDV}} = \frac{\Delta R}{\Delta I_{NDV}} \frac{I_{NDV}}{R} \quad (21)$$

式中:  $\varepsilon_{ET_0}$ 、 $\varepsilon_P$ 、 $\varepsilon_{I_{NDV}}$  和  $\varepsilon_\omega$  分别为径流对参考蒸发量、降水、归一化植被指数和下垫面的弹性系数。

$$\Delta R_{ET_0} = \varepsilon_{ET_0} \frac{R}{ET_0} \Delta ET_0 \quad (22)$$

$$\Delta R_P = \varepsilon_P \frac{R}{P} \Delta P \quad (23)$$

$$\Delta R_{I_{NDV}} = \varepsilon_{I_{NDV}} \frac{R}{I_{NDV}} \Delta I_{NDV} \quad (24)$$

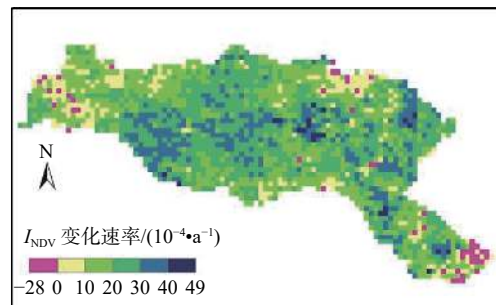
$$\Delta R_{hum} = \varepsilon_\omega \frac{R}{\omega} \Delta \omega - \Delta R_{I_{NDV}} \quad (25)$$

式中:  $\Delta R_{ET_0}$ 、 $\Delta R_P$ 、 $\Delta R_{I_{NDV}}$  和  $\Delta R_{hum}$  分别为由  $ET_0$ 、 $P$ 、 $I_{NDV}$  和人类因素变化引起的径流深变化量, 除参考蒸发量、降水、归一化植被指数之外的因素都归为人类活动。

### 3 结果与分析

#### 3.1 $I_{NDV}$ 时空变化特征分析

图 1 为汉江流域 1982—2015 年  $I_{NDV}$  时空变化特征, 从图 1(a)可知, 年均  $I_{NDV}$  呈波动增加趋势。在研究时段内, 汉江流域  $I_{NDV}$  最小值和最大值分别出现在 1984 年和 2015 年, 年均波动范围在 0.526 6~0.633 0, 且  $I_{NDV}$  以平均 0.002/a( $p < 0.01$ )的趋势增加, 这表明汉江流域植被具有较为明显的恢复。



(b)  $I_{NDV}$  空间变化特征

图 1 汉江流域 1982—2015 年  $I_{NDV}$  的时空变化特征

Fig. 1 Spatio-temporal variation characteristics of  $I_{NDV}$  in the Han River from 1982 to 2015



1982—2015年汉江流域  $I_{NDV}$  变化趋势在空间上存在差异性 [图 1(b)],  $I_{NDV}$  呈增加趋势的区域面积占总面积的 97.68%,  $I_{NDV}$  呈减少趋势的区域面积占总面积的 2.32%。其中, 年均  $I_{NDV}$  增长较快(变化速率  $\geq 2.0 \times 10^{-3}/a$ ) 的区域主要分布在汉江流域中游和下游, 约占研究区域总面积的 54.16%; 年均  $I_{NDV}$  呈降低趋势的区域分布西北、东南和北部地区, 分布相对比较零散, 下降速率较小, 多在  $-2.8 \times 10^{-3}/a$  以内。

### 3.2 $I_{NDV}$ 与气候因素相关性分析

通过对 1982—2015 年的  $I_{NDV}$  值以及降水量( $P$ )

和参考蒸发量( $ET_0$ )进行相关性分析, 发现  $I_{NDV}$  与降水量和参考蒸发量之间存在空间相关性, 偏相关系数见图 2。其中:  $I_{NDV}$  和参考蒸发量的偏相关系数为  $-0.197 0 \sim 0.735 4$ , 偏相关系数大于零的面积占 98.38%; 而  $I_{NDV}$  与降水量的偏相关系数为  $-0.530 4 \sim 0.320 0$ , 偏相关系数大于零的面积占 10.8%, 绝大多数地区呈现低度负相关关系。从整体上看, 汉江流域  $I_{NDV}$  值与参考蒸发量的偏相关系数要比降水的高, 说明汉江流域  $I_{NDV}$  值与参考蒸发量相关性要比降水大。

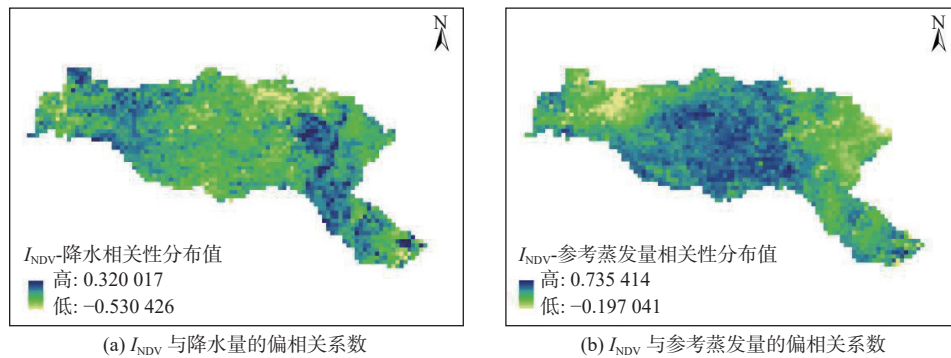


图 2 汉江流域  $I_{NDV}$  与降水量和参考蒸发量的偏相关系数

Fig. 2 Partial correlation coefficient between  $I_{NDV}$  and precipitation and reference evaporation in Han River basin

### 3.3 气候因素和人类活动对 $I_{NDV}$ 变化的贡献率

根据 SPSS 软件的分析结果, 汉江流域  $I_{NDV}$  与降水量、参考蒸发量之间存在显著的多元线性回归关系(表 1)。调整后  $R^2$  为 0.823, 说明自变量可以解释因变量 82.3% 的变化。同时,  $F$  检验和  $t$  检验的结果表明, 多年月降水和参考蒸发量对  $I_{NDV}$  具有显著的影响。利用残差法计算得到  $\varepsilon$  为 0.003, 说明人类活动对植被生长具有积极作用, 主要表现在汉江流域实施生态保护建设工程方面。利用残差法计算得到气候因素和人为因素对区域植被覆盖贡献率, 分别为 99.56% 和 0.44%, 说明气候因素是植被增长的主要驱动因素。气候因素对植被覆盖变化的贡献率较大, 主要表现为降水量和温度对植被生长的影响。人类活动造成植被覆盖变化也不容忽视, 退耕还林还草工程虽然取得初步成效, 但仍需要更多的措施来保护汉江流域生态环境, 促进植被恢复。因此, 在今后的环境保护工作中, 应继续加强气候监测和预测能力, 同时探索合理土地利用方式和农业生产方式, 以促进汉江流域植被覆盖持续增长。

表 1 汉江流域植被变化归因分析

Tab. 1 Attribution analysis of vegetation changes in the Han River basin

回归方程	$\varepsilon$	$I_{NDV,t}$	$I_{NDV,p}$	$H/\%$	$C/\%$
$I_{NDV,p} = 0.325 + 0.001P + 0.003ET_0$ ( $R^2 = 0.823$ )	0.003	0.591	0.588	0.44	99.56

图 3(a)表明气候变化对汉江流域植被变化的贡献率全部为正贡献率。其中: 气候变化的贡献率在 85.29% ~ 96.05% 的面积较大, 占据了汉江流域总面积的 30% 以上, 分布在该地区中部、北部、和西南部; 而贡献率在 135.36% 以上的地区仅占 2.4%, 主要分散在汉江流域西部和南部。此外, 气候变化对汉江流域植被变化的贡献率呈现自北向南、自西向东逐渐增加的现象, 这也与当地的气候和地理环境密切相关。由图 3(b)可知: 人类活动对汉江流域植被变化的贡献率小于 3.92% 的地区占 52.14%; 贡献率在 3.92% 以上的地区占 47.82%, 主要分布在汉江流域中部、西部、北部和西北部。其中, 人类活动贡献率在 3.92% ~ 14.70% 的面积较大, 占据了汉江流域总面积的 39.04%。图 3(c)为汉江流域的人口分布。通过比较图 3(b)与图 3(c)可以看出, 人类因素贡献率与人口空间分布基本趋于一致, 表明本研

究计算得到人类活动对植被变化的贡献分布图较为可信。与气候变化不同,人类活动对汉江流域植被变化既存在正贡献率也存在负贡献率,两者的贡

献率面积相近。因此,在大部分汉江流域,相对于人类活动的贡献率,气候变化对植被覆盖度增加的贡献率更高。

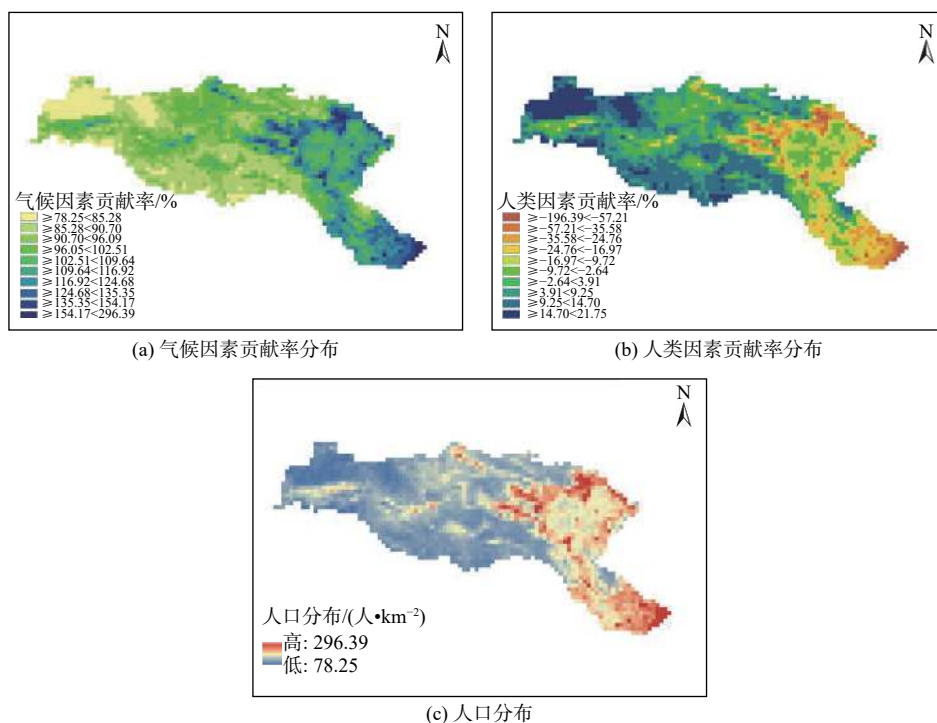


图 3 气候变化和人类活动对汉江流域植被变化的贡献率及人口分布

Fig. 3 The contribution rate of climate change and human activities to vegetation change and population distribution in the Han River

### 3.4 植被对径流变化的影响

利用一元线性回归方法分析 1982—2015 年汉江流域径流深的变化情况(图 4),可以直观发现,1982—2015 年汉江流域径流深整体呈下降的趋势,平均每年下降 3.98 mm。采用 Pettitt 突变检验方法来识别皇庄水文站径流深的突变年份(图 4),发现

皇庄水文站径流深在 1991 年之前处于波动上升趋势,在 1991 年后呈波动下降趋势,并通过了  $\alpha=0.05$  置信检验,由此可见,皇庄水文站径流深的突变年份出现在 1991 年,这与邹磊等<sup>[25]</sup>和班璇等<sup>[16]</sup>结论基本一致。

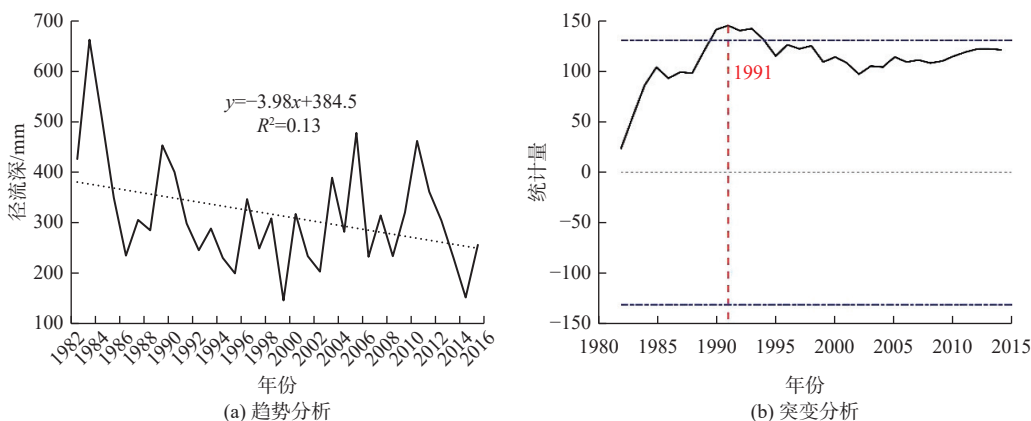


图 4 1982—2015 年汉江流域径流深趋势分析和突变分析结果

Fig. 4 Trend analysis and mutation analysis of runoff depth in the Han River from 1982 to 2015

已有研究<sup>[24]</sup>表明  $I_{NDV}$  与 Budyko 参数( $\omega$ )存在线性关系。为得到  $I_{NDV}$  与 Budyko 参数( $\omega$ )之间的线性关系,计算  $\omega$  与  $I_{NDV}$  的 9 年滑动平均值,采用最

小二乘法拟合得到  $I_{NDV}$  与 Budyko 参数( $\omega$ )之间的一元线性回归方程,回归方程拟合的  $R^2$  值达到 0.584,并且拟合结果显著( $p < 0.01$ )表明效果较好

(图5)。其中,斜率和截距的取值分别为5.042 4和-0.896 9。汉江流域的下垫面参数 $\omega$ 和年均 $I_{NDV}$ 呈增加趋势,与径流的变化趋势相反,下垫面参数 $\omega$ 和 $I_{NDV}$ 增长情况表现出高度一致性,表明流域产流性能对植被变化的高度敏感性。

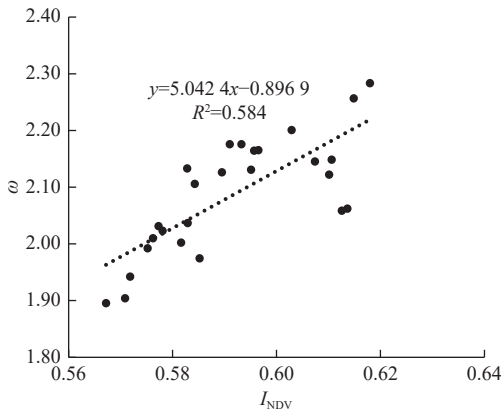


图5  $I_{NDV}$ 的9年滑动平均值与 $\omega$ 的9年滑动平均值的关系  
Fig. 5 The relationship between 9-year moving average  $I_{NDV}$  and 9-year moving average  $\omega$

基准期( $T_1$ )和突变期( $T_2$ )的 $P$ 、 $ET_0$ 、 $R$ 、 $I_{NDV}$ 和 $\omega$ 的统计值见表2,发现相较于基准期,突变期年参考蒸发量上升53.59 mm,径流深减少119.80 mm,降水量下降76.31 mm,下垫面参数上升为0.27,  $I_{NDV}$ 上升0.03,说明汉江流域下垫面受人类活动的影响并发生了显著的变化。

表3 汉江流域径流变化归因分析  
Tab. 3 Attribution analysis of runoff changes in the Han River

$\epsilon_P$	$\epsilon_{ET_0}$	$\epsilon_\omega$	$\epsilon_{I_{NDV}}$	$\Delta R_P/mm$	$\Delta R_{ET_0}/mm$	$\Delta R_{I_{NDV}}/mm$	$\Delta R_{hum}/mm$	对径流变化的贡献率/%				
								$R_P$	$R_{ET_0}$	$R_{I_{NDV-C}}$	$R_{I_{NDV-H}}$	$R_{hum}$
1.75	-0.75	-1.36	-1.94	-50.75	-13.55	-33.48	-20.10	43.05	11.49	28.28	0.12	17.06

一系列水土保持措施的实施<sup>[26-29]</sup>改变汉江流域的降雨径流关系。Budyko参数反映了流域气候、植被、土壤、地形等因素的综合影响。从图5中可以发现,汉江流域的Budyko参数( $\omega$ )与 $I_{NDV}$ 呈显著的正线性关系,表明汉江流域植被恢复对 $\omega$ 有显著影响。此外,敏感性分析结果显示,径流深( $R$ )对 $I_{NDV}$ 的弹性系数为负,表明 $R$ 随 $I_{NDV}$ 的增加而减少,植被覆盖度增加是导致汉江流域流量减少的重要因素之一,这与彭涛等<sup>[11]</sup>研究结果一致。因此,应高度重视植被生长对流量衰减的影响,合理规划植被恢复,减少因植被恢复不合理造成的水资源减少。

本研究仍存在不确定性。原因:一是一些气象站缺乏个别日期的气象资料<sup>[30]</sup>,导致插值结果存在些许误差;二是气候条件与人为因素影响的交互效

计算得到径流深对降水量、参考蒸发量、下垫面参数和 $I_{NDV}$ 的弹性系数(表3),分别为1.75、-0.75、-1.36和-1.94。最后,计算得到降水、参考蒸发量、下垫面和 $I_{NDV}$ 变化导致的皇庄水文站径流深变化量。结果表明,从基准期到突变期,降水量减少76.31 mm引起50.75 mm径流深的减少,参考蒸发量增加53.59 mm引起13.55 mm径流深的减少,下垫面参数增长0.27致使径流深减少53.58 mm;  $I_{NDV}$ 增长0.03导致径流深减少33.48 mm。降水量、参考蒸发量和人类活动对汉江流域径流变化的贡献率分别为43.05%、11.49%和17.06%,植被变化的贡献率为28.40%。其中,气候变化导致植被变化对径流的贡献率为28.28%,人类活动导致植被变化对径流的贡献率为0.12%。因此,气候因素导致植被增长是致使汉江流域水资源减少的重要因素之一,政府应高度重视植被生长导致流域水资源减少这一问题。

表2 汉江流域气象水文变量和 $I_{NDV}$ 的统计值  
Tab. 2 Characteristic values of climate, hydrology, and  $I_{NDV}$  variables in the Han River

时期	$ET_0/mm$	$P/mm$	$R/mm$	$\omega$	$I_{NDV}$
$T_1$ (1982—1990年)	889.19	882.37	402.93	1.90	0.57
$T_2$ (1991—2015年)	942.78	806.06	283.13	2.17	0.60
变化量	53.59	-76.31	-119.80	0.27	0.03

应问题。在本研究中,气候因素和人类活动被认为是相互独立的,而在现实中,两者在生态水文系统中存在较强的相互作用<sup>[31-32]</sup>,因此未来的研究应系统量化气候条件和人为因子相互作用对生态水文系统的影响<sup>[33]</sup>。另外,没有定量分析各种水土保持工程措施(梯田、沙坝等)对径流变化的影响,这些水土保持工程措施也会引起下垫面特征参数的变化<sup>[34-36]</sup>。

#### 4 结论

本研究探讨植被变化的时空分布特征和驱动力,并定量评价植被变化对汉江流域流量变化的影响。结果表明:汉江流域植被在1982—2015年显著增加( $p < 0.01$ ),斜率为0.002/(10 a),但存在空间差异。



其中,  $I_{NDV}$  快速增长( $>2.0 \times 10^{-3}/a$ )的面积约占研究面积的 54.16%; 气候因素是导致植被快速生长的主要驱动力。气候条件和人为因素对植被变化的贡献率分别为 99.56% 和 0.44%, 表明气候变化对植被增长具有积极作用, 使生态环境质量得到了改善; 下垫面参数  $\omega$  和  $I_{NDV}$  拟合较好, 具有较强相关性, 表明流域产流性能对植被变化有高度敏感性; 降水、参考蒸发量、人类活动、气候因素引起的植被变化和人为因素引起的植被变化对汉江流域径流深的贡献率分别为 43.05%、11.49%、17.06%、28.28% 和 0.12%。

#### 参考文献:

- [1] WEI X H, SUN G, LIU S R, et al. The forest-stream-flow relationship in China: A 40-year retrospect[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2008, 44(5): 1076-1085. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2008.00237.x.
- [2] LÜ Y H, ZHANG L W, FENG X M, et al. Recent ecological transitions in China: Greening, browning, and influential factors[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5 (8732): 1-8. DOI: 10.1038/SREP08732.
- [3] PIAO S L, WANG X H, CIAIS P, et al. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(10): 3228-3239. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2011.02419.x.
- [4] JI G X, SONG H Y, WEI H J, et al. Attribution analysis of climate and anthropic factors on runoff and vegetation changes in the source area of the Yangtze River from 1982 to 2016[J]. *Land*, 2021, 10(6): 612. DOI: 10.3390/land10060612.
- [5] JI G X, LAI Z Z, XIA H B, et al. Future runoff variation and flood disaster prediction of the Yellow River basin based on CA-Markov and SWAT[J]. *Land*, 2021, 10(4): 421. DOI: 10.3390/land10040421.
- [6] JI G X, WU L Y, WANG L D, et al. Attribution analysis of seasonal runoff in the source region of the Yellow River using seasonal Budyko hypothesis[J]. *Land*, 2021, 10(5): 542. DOI: 10.3390/land10050542.
- [7] SUN Y, TIAN F Q, YANG L, et al. Exploring the spatial variability of contributions from climate variation and change in catchment properties to streamflow decrease in a mesoscale basin by three different methods[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 508: 170-180. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.11.004.
- [8] YU K X, GOTTSCHALK L, XIONG L H, et al. Estimation of the annual runoff distribution from moments of climatic variables[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 531:1081-1094. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.11.012.
- [9] LIU H, ZHENG L, YIN S J. Multi-perspective analysis of vegetation cover changes and driving factors of long time series based on climate and terrain data in Hanjiang River basin, China[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2018, 11(17): 509. DOI: 10.1007/s12517-018-3756-3.
- [10] 夏军, 马协一, 邹磊, 等. 气候变化和人类活动对汉江上游径流变化影响的定量研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(1): 1-6. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.01.001.
- [11] 彭涛, 梅子祎, 董晓华, 等. 基于Budyko假设的汉江流域径流变化归因[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(6): 1114-1124. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0114.
- [12] 杨倩, 刘登峰, 孟宪萌, 等. 汉江上游植被指数变化及其归因分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(4): 138-148. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2019.0094.
- [13] 徐静文, 肖飞, 廖炜, 等. 基于MODIS NDVI汉江中游植被时空变化及其地貌分异分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(11): 1895-1901. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201711018.
- [14] ZHAN Y J, FAN J M, MENG T T, et al. Analysis on vegetation cover changes and the driving factors in the mid-lower reaches of Han River basin between 2001 and 2015[J]. *Open Geosciences*, 2021, 13(1): 675-689. DOI: 10.1515/geo-2020-0259.
- [15] CHEN T, XIA J, ZOU L, et al. Quantifying the influences of natural factors and human activities on NDVI changes in the Hanjiang River basin, China[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(22): 3780. DOI: 10.3390/rs12223780.
- [16] 班璇, 朱碧莹, 舒鹏, 等. 汉江流域气象水文变化趋势及驱动力分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(12): 2817-2829. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201812018.
- [17] LI Z Y, HUANG S Z, LIU D F, et al. Assessing the effects of climate change and human activities on runoff variations from a seasonal perspective[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2020, 34(3): 575-592. DOI: 10.1007/s00477-020-01785-1.
- [18] LI S S, ZHANG L, DU Y, et al. Anthropogenic impacts on streamflow-compensated climate change effect in the Hanjiang River basin, China[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2020, 25(1): 04019058. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001876.

- [19] 高艳丽,李红波,侯蕊. 汉江流域生态系统服务权衡与协同关系演变[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(7): 1619-1630. DOI: [10.11870/cjlyzyyhj202007015](https://doi.org/10.11870/cjlyzyyhj202007015).
- [20] 潘雅婧,王仰麟,彭建,等. 基于小波与R/S方法的汉江中下游流域降水量时间序列分析[J]. *地理研究*, 2012, 31(5): 811-820. DOI: [10.11821/yj2012050005](https://doi.org/10.11821/yj2012050005).
- [21] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002. ISBN: 9787040466324.
- [22] LI A, WU J F, HUANG J H. Distinguishing between human-induced and climate-driven vegetation changes: A critical application of restrend in Inner Mongolia[J]. *Landscape Ecology*, 2012, 27(7): 969-982. DOI: [10.1007/s10980-012-9751-2](https://doi.org/10.1007/s10980-012-9751-2).
- [23] 傅抱璞. 论陆面蒸发的计算[J]. *大气科学*, 1981, 5(1): 23-31. DOI: [10.3878/j.issn.1006-9895.1981.01.03](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1981.01.03).
- [24] 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. DOI: [10.1002/wrcr.20107](https://doi.org/10.1002/wrcr.20107).
- [25] 邹磊,张彦,陈婷,等. 汉江流域降水与径流演变特征研究[J]. *水文*, 2023, 43(2): 103-109. DOI: [10.19797/j.cnki.1000-0852.20210351](https://doi.org/10.19797/j.cnki.1000-0852.20210351).
- [26] 杜耘,王学雷,蔡述明. 南水北调中线工程对汉江中下游生态环境的影响与对策[J]. *中国科学院院刊*, 2005(6): 43-48. DOI: [10.3969/j.issn.1000-3045.2005.06.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-3045.2005.06.009).
- [27] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 189-196. DOI: [10.3321/j.issn:1000-3037.2003.02.010](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-3037.2003.02.010).
- [28] 赵杨,危锋. 陕南秦巴山区退耕还林与可持续发展研究: 以汉中市为例[J]. *水土保持研究*, 2006, 13(3): 200-203. DOI: [10.3969/j.issn.1005-3409.2006.03.067](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-3409.2006.03.067).
- [29] 吕晓璐,何家理. 退耕还林后续产业形成条件对乡村振兴的借鉴意义: 以陕西省安康市为例[J]. *湖北农业科学*, 2019, 58(4): 120-123. DOI: [10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2019.04.026](https://doi.org/10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2019.04.026).
- [30] 叶柏生,杨大庆,丁永建,等. 中国降水观测误差分析及其修正[J]. *地理学报*, 2007, 62(1): 3-13. DOI: [10.3321/j.issn:0375-5444.2007.01.001](https://doi.org/10.3321/j.issn:0375-5444.2007.01.001).
- [31] 宋晓猛,张建云,占车生,等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J]. *水利学报*, 2013, 44(7): 779-790. DOI: [10.13243/j.cnki.slxb.2013.07.001](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.2013.07.001).
- [32] 焦阳,雷慧闽,杨大文,等. 基于生态水文模型的无定河流域径流变化归因[J]. *水力发电学报*, 2017, 36(7): 34-44. DOI: [10.11660/slfdx.20170704](https://doi.org/10.11660/slfdx.20170704).
- [33] WANG Y X, LIU Z P, QIAN B W, et al. Quantitatively computing the influence of vegetation changes on surface discharge in the middle-upper reaches of the huaihe river, China[J]. *Forests*, 2022, 13(12): 2000. DOI: [10.3390/f13122000](https://doi.org/10.3390/f13122000).
- [34] 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. DOI: [10.14042/j.cnki.32.1309.2015.05.001](https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2015.05.001).
- [35] 张守红,刘苏峡,莫兴国,等. 降雨和水保措施对无定河流域径流和产沙量影响[J]. *北京林业大学学报*, 2010, 32(4): 161-168. DOI: [10.13332/j.1000-1522.2010.04.011](https://doi.org/10.13332/j.1000-1522.2010.04.011).
- [36] 刘昌明,李艳忠,刘小莽,等. 黄河中游植被变化对水量转化的影响分析[J]. *人民黄河*, 2016, 38(10): 7-12. DOI: [10.3969/j.issn.1000-1379.2016.10.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1379.2016.10.002).

## Vegetation variation in the Han River and its impact on runoff

JI Guangxing<sup>1</sup>, GAO Huishan<sup>1</sup>, GAO Hongkai<sup>2</sup>, YUE Shuaijun<sup>1</sup>, ZHANG Jincai<sup>1</sup>, LI Qingsong<sup>1</sup>,  
LI Genming<sup>1</sup>, CHEN Weiqiang<sup>1</sup>, GUO Yulong<sup>1</sup>, ZHANG Yali<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Henan Agricultural University, Zhengzhou, 450046, China; 2. College of Geographical Sciences, Journal of East China Normal University, Shanghai 200241, China)

**Abstract:** Runoff is one of the most important water resources in the watershed and is critical to the natural ecosystem. The Han River basin, as an important representative basin of the national "Yangtze River Economic Belt", is one of the water sources of China's South-to-North Water Transfers Project in the upper reaches, and the middle and lower reaches of the Han River are also the main industrial and agricultural production concentration areas in China. Water resources, which constitute one of the demand conditions for industry and agriculture in the region and one of the major constraints on the scale of socio-economic development, are extremely important for regional economic development. Therefore, the impact of vegetation changes on runoff changes under the influence of human activities is conducive to the sustainable development of the Yangtze River basin economy and the protection of the ecological environment to provide a scientific reference basis for research.



Based on the meteorological and hydrological data and normalized difference vegetation index ( $I_{NDV}$ ) data of the Han River basin, the impact degree of different factors on the vegetation change of the Han River basin were quantitatively computed using multiple linear regression analysis method, then the impact degree of vegetation variation on discharge change was quantitatively calculated by an adjusted Budyko equation and elastic coefficient method.

The Pettitt mutation test identified the mutation year for runoff in the Han River basin in 1991. The amount of runoff change due to each type of driver was calculated separately by the values of annual mean  $P$ ,  $ET_0$ ,  $I_{NDV}$  and coefficient  $\omega$  in the base and change periods, using the elasticity coefficients obtained. Comparing the baseline and mutation periods, it was found that the mean annual reference evapotranspiration in the mutation period increased by 53.59 mm, runoff depth decreased by 119.80 mm, precipitation decreased by 76.31 mm, the subsurface parameter increased by 0.27, and the  $I_{NDV}$  increased by 0.03 compared to the baseline period. It shows that the subsurface of the Han River basin has been affected by human activities and has undergone significant changes.

The annual mean  $I_{NDV}$  in the Han River basin showed a significant fluctuating growth trend from 1982 to 2015 ( $p < 0.01$ ). The spatial heterogeneity was relatively obvious, and the areas with significant vegetation growth were mainly dominated by the middle and lower reaches. Among them, climatic conditions and anthropogenic factors contributed positively to the increase of  $I_{NDV}$ , with contribution rates of 99.56% and 0.44%, respectively, but the spatial and temporal distributions of the contribution rates of the two influencing factors were significantly different. In contrast, there is a strong correlation between the subsurface parameter  $\omega$  and  $I_{NDV}$  in the Han River basin, indicating that the flow production performance of the basin is highly sensitive to vegetation changes.

The contribution rates of vegetation changes caused by climate factors and vegetation changes caused by human factors to runoff were 62.44% and 0.28%, respectively, indicating that vegetation growth caused by climate factors was one of the important factors leading to the reduction of water resources in the Han River. Therefore, great importance should be attached to the problem of vegetation growth leading to the reduction of water resources in Han River basin.

**Key words:** vegetation change; human activity; climate variation; streamflow variation; Han River