中国科学: 地球科学 2013 年 第 43 卷 第 7 期: 1207 ~ 1219
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

黄河与长江流域水资源变化原因

王雁[①*], 丁永建[①], 叶柏生[①], FengJing LIU[②], 王杰[①], 王杰[①③]

① 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000;
② Department of Agriculture and Environmental Science and Cooperative Research programs, Lincoln University of Missouri, Jefferson 65010, USA;
③ 云南省水利水电科学研究院, 昆明 650228
* E-mail: yanwang0112@gmail.com

收稿日期: 2012-03-01; 接受日期: 2012-11-18; 网络版发表日期: 2013-06-28
国家自然科学基金(批准号: 41030527, 41130368, 41271079, 41271035)和中国科学院冰冻圈科学国家重点实验室(编号: SKLS-ZZ-2012-01-02)资助

摘要 利用 1951~2008 年黄河与长江流域逐月降水和径流资料, 对流域年径流变化进行趋势性检验, 分析年降水量和径流量的相关关系变化, 比较不同时段流域降水和径流的变化趋势和双累积曲线, 以及径流对降水的敏感性变化. 结果表明, 黄河干流上游年降水量微弱下降, 中下游降水减少趋势显著, 为 8.8 ~9.8 mm/10 a; 而全流域径流量均呈现显著递减的趋势, 为 7.8~10.8 mm/10 a(通过 95%置值度检验); 径流系数也明显下降, 下降范围为 0.013~0.019/10 a, 流域产流能力下降, 径流减少趋势在 20 世纪 80 年代末至 90 年代初发生突变. 长江流域大部降水减少趋势显著, 为 18.2~24.7 mm/10 a; 上游(寸滩站, 宜昌站)径流减少趋势显著, 为 9.9~7.2 mm/10 a, 中游(汉口站)和下游(大通站)径流呈微弱下降趋势, 为 2.9~2.1 mm/10 a; 长江流域上游径流系数增加不显著, 中下游径流系数呈显著增加趋势, 速率分别 0.005/10 a 和 0.005/10 a, 表明中下游产流能力增强. 根据水文参数公式计算, 与 1951~1969 年相比, 1970~2008 年, 降水减少和人类活动引起的下垫面变化对黄河流域径流减少量的贡献率分别为 11%和 83%; 在长江流域, 降水减少对径流量变化的贡献占 29%, 人类活动引起的径流量增加占 71%. 1980 ~2008 年, 黄河流域由于下垫面变化造成径流量减少的比例在兰州、三门峡、花园口、利津分别为 97%, 83%, 83%和 91%, 降水引起的径流量减少比例分别为 3%, 17%, 17%和 9%. 长江流域降水减少对寸滩、宜昌、汉口、大通径流量减少的贡献分别为 89%, 74%, 43%和 35%, 下垫面变化对径流增量的贡献分别为 11%, 26%, 57%和 65%. 人类活动的作用强度逐年增大, 2000 年之后, 下垫面变化对黄河、长江流域径流变化量的贡献率上升到 84%和 73%. 下垫面变化引起了黄河下游径流减少和长江下游径流增加, 在干旱区和湿润区对径流变化的作用相反. 造成这一现象的原因是: 黄河流域人类的活动用水量的增加直接造成径流减少; 长江流域因太阳辐射下降引起实际蒸发量下降, 同时湖泊面积减少, 下垫面硬化也在一定程度上造成产流能力增加.

关键词
黄河
长江
径流变化
径流系数
人类活动

中文引用格式: 王雁, 丁永建, 叶柏生, 等. 黄河与长江流域水资源变化原因. 中国科学: 地球科学, 2013, 43: 1207–1219
英文引用格式: Wang Y, Ding Y J, Ye B S, et al. Contributions of climate and human activities to changes in runoff of the Yellow and Yangtze rivers from 1950 to 2008. Science China: Earth Sciences, 2013, 56: 1398–1412, doi: 10.1007/s11430-012-4505-1

径流变化是气候变化与人类活动多因素综合作用的结果, 迄今有关气候变化对径流影响的研究, 不仅强调气候变化本身对径流量的影响, 也考虑人类活动对径流影响[1~4]. 在长期径流观测资料的基础上, 已有众多有关黄河与长江流域径流变化及人类活动的研究成果, 诸多研究表明: 近几十年, 黄河流域径流下降显著, 同期数据显示取水引水量也在增加, 人类活动对径流减少有明显影响, 降水和蒸发变化也可能减缓或加剧这一过程[5~9]. 长江流域下游径流呈微弱下降趋势, 但是同期降水数据显著减少, 这可能与暴雨增多导致夏季径流增加[10,11], 以及人类活动引起下垫面变化有关[12].

以往对黄河、长江流域水资源近几十年的变化特点、影响因素、利用现状、未来旱涝格局演变[13~15]以及水资源变化引起的生态环境效应等方面进行了大量研究, 在定量界定气候变化和人类活动对径流影响方面, 常用方法有用水文模型模拟和统计分析水文要素变化, 水文模型具有明确的物理机理和较高的模拟精度, 但所需参数较多, 实践应用受到一定局限[16,17]. 目前通过表征水文效应的特征参数分析气候和人类活动对水文过程影响仍是采用最多的研究手段[1,2], 但研究中还存在缺少流域之间的对比研究, 存在还原天然径流可置值度不足的问题, 人类活动主要分析了灌溉和耗水的作用, 而较少从流域水文参数变化研究人类活动对径流的影响.

本文选择中国的两条主要河流长江和黄河进行对比研究, 黄河流域地处干旱、半干旱、半湿润区, 而长江流域处于湿润区, 根据黄河与长江流域实测径流和降水资料, 在黄河、长江流域气候变化、径流变化事实的基础上, 通过分析流域径流系数的变化, 定量评估流域内降水和人类活动对径流变化的影响.

1 研究区概况

长江和黄河均发源于青藏高原, 长江经由青藏高原、四川盆地和长江中下游平原注入东海, 全长6397 km, 流域面积 1.80×10^6 km^2(图 1). 长江流域水量丰沛, 流域内年降水量在 400~1500 mm 之间[10],

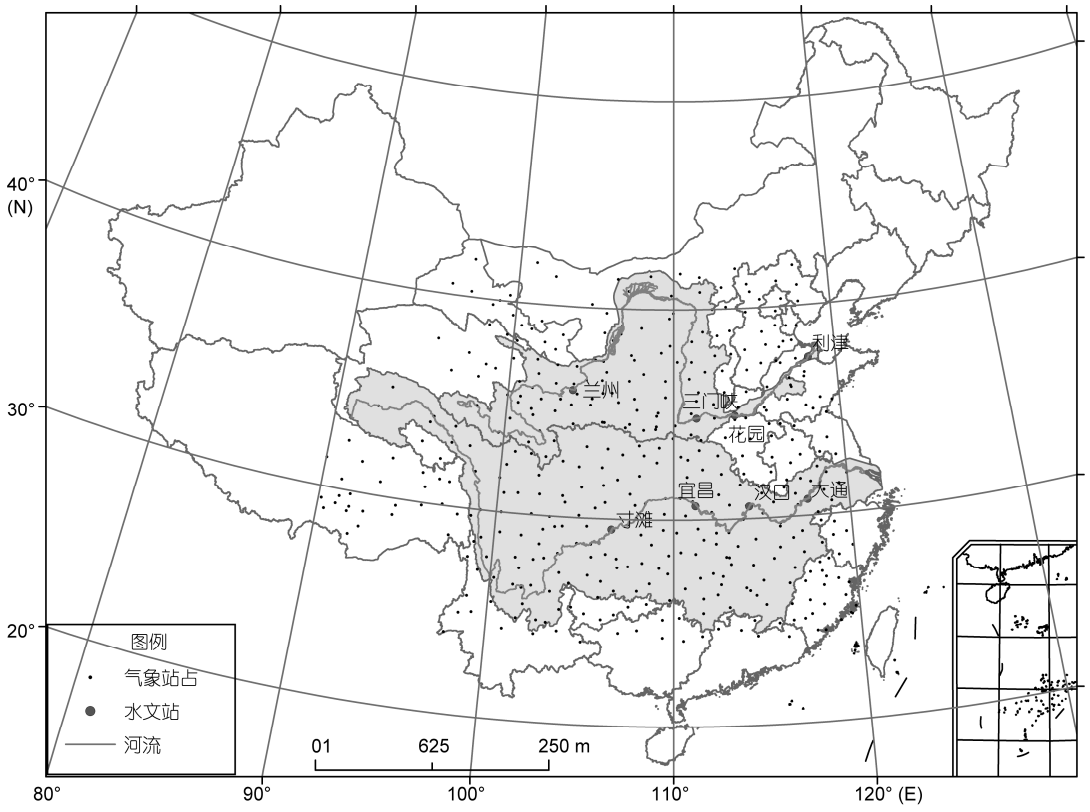

图 1　黄河和长江流域以及周围气象站和干流水文站分布图

近 50 年来长江年径流量微弱增加[18]. 选取宜昌、汉口、大通水文站的径流资料分别代表长江上、中、下游的径流状况[19].

黄河自西向东流经青藏高原、黄土高原和华北平原, 汇入渤海, 全长 5464 km, 流域面积 7.52×10^5 km^2, 其中花园口以上面积约 7.30×10^5 km^2, 约占流域总面积的 97%. 黄河流域处于大陆性季风气候区, 多年平均降水量为 460 mm, 受地形等因素的影响, 降水分布由东南向西北递减[15]. 近 50 年来黄河年径流量表现为减少趋势[20], 进入 20 世纪 90 年代, 黄河源区的径流量大幅度减少[21], 1970 年后下游出现断流, 目前黄河正面临着水资源短缺和生态环境被破坏的状况[22]. 黄河上、中、下游的径流状况分别由兰州、三门峡、利津水文站的径流资料代表.

2 资料和方法

2.1 资料

气象资料: 本文主要用 1951~2007 年长江、黄河流域及周边的 324 和 205 个国家气象台站(图 1)资料, 通过反距离权重插值法, 将台站气温和校正后的降水资料插值到流域[23], 从而得到流域平均降水量和气温系列资料.

水文资料: 主要是 1951~2008 年间长江和黄河干流上控制站实测径流资料, 黄河主要有唐乃亥、兰州、三门峡、花园口、利津水文站, 长江流域主要有寸滩、宜昌、汉口、大通各水文站(表 1, 图 1). 依据流域年径流和年降水量计算出流域年径流系数.

社会经济资料: 主要是通过统计年鉴和文献收集了流域人口、耕地面积、城市化资料和长江下游湖泊变化资料.

2.2 研究方法

采用线性回归法和 Mann-Kendall(MK)秩次相关检验法进行气温、降水、径流变化趋势的判别及显著性检验. 线性回归法可以给出时间序列是否具有递增或递减的趋势, 线性方程的斜率还表征了时间序列的平均趋势. MK 趋势检验法是一种非参数统计检验方法, 与参数统计检验法相比, 该方法不需要样本遵从一定的分布, 也不受少数异常值的干扰, 而且计算也比较简单, 是目前比较常用的趋势诊断方法[24~27].

在 MK 检验中, 原假设 H_0 为时间序列数据 $(x_1, \cdots, x_n)$, 是 n 个独立的、随机变量同分布的样本; 检验统计量通过下式计算:

$$\beta = \text{median}\left[\frac{x_j - x_i}{j-i}\right] \quad i<j, \tag{1}$$

对于统计变量β, 大于 0 时, 是上升趋势; 小于 0 时, 则是下降趋势.

MK 趋势检验方法基于序列独立性假设, 序列的相关性会对方差有明显影响, 若采用原始的 MK 法对水文序列进行检验, 增大了趋势显著的可能性. 针对这种情况, 根据 Hamed[28]和 Lettenmaier 等[29]改进的 MK 检验修正方差的计算公式对存在相关性的序列进行趋势检验分析, 对 MK 法进行修正.

为区分气候变化和人类活动对径流的影响, 从水文角度研究, 通过分析水文参数变化, 研究径流变化的原因. 主要分析径流系数的变化, 径流系数指任意时段内的径流深度与同时段内的降水深度的比值, 能综合反映流域内自然地理要素对径流的影响, 人类活动主要是改变流域下垫面状况, 进而对径流产生影响.

表 1 黄河、长江干流主要水文站相关信息

流域	站名	时间	缺失年	控制面积(km^2)	多年平均降水量(10^8, m^3/a)	多年平均径流量(10^8, m^3/a)
黄河	兰州	1951~2005	2001	222551	1262.9	308.9
	三门峡	1953~2004	1998~2001	688421	3582.4	359.7
	花园口	1951~2008		730036	3841.4	379.8
	利津	1951~2008		751869	3995.2	311.23
长江	寸滩	1951~1998		866559	7747.8	3464.1
	宜昌	1951~2008		1010000	9840.0	4285.6
	汉口	1951~2008		1488036	16352.1	7054.5
	大通	1951~2008		1705383	20361.9	8904.5

$$\alpha = R/P, \quad (2)$$

径流系数表明了在降水中有多少变成了径流, 它反映的主要是流域内下垫面因素对降水-径流关系的影响. 径流量可用径流系数和降水量的乘积表示, 同理, 可用径流系数和降水量乘积的变量表示径流量的变化.

$$\begin{aligned} R &= \alpha \times P, \\ \Delta R &= \Delta(\alpha \times P) = \alpha_n P_n - \alpha_0 P_0 \\ &= (\alpha_0 + \Delta\alpha)(P_0 + \Delta P) - \alpha_0 P_0 \\ &= \alpha_0 \Delta P + \Delta\alpha P_0 + \Delta\alpha\Delta P, \end{aligned} \quad (3)$$

式中ΔR 为径流变化量, α_0 为多年平均径流系数, ΔP 为降水变化量, $\Delta\alpha$为径流系数变化量, P_0 为多年平均降水量.

依据径流系数公式(3), 将径流量的变化 ΔR 分解为$\alpha_0\Delta P$, $\Delta\alpha P_0$, $\Delta\alpha\Delta P$ 之和, 从数学角度舍去高阶项 $\Delta\alpha\Delta P$, 从水文角度看, 因径流系数α通常在 0.5 以下, $\Delta\alpha\Delta P$ 的乘积对径流变化量 ΔR 的影响较小, 在计算径流量变化中可忽略, 径流变化量公式可简化为

$$\Delta P = \alpha_0 \Delta P + \Delta\alpha P_0, \quad (4)$$

$\alpha_0\Delta P$ 表示降水变化对径流变化的影响, 即气候变化引起的径流量变化; $\Delta\alpha$ 主要是由下垫面变化造成的, 也包括因蒸发量变化对产流的影响, 蒸发对径流系数有影响, 但在黄河流域和长江流域, 降水是影响径流系数的主要因素, 相对于降水变化, 蒸发变化对径流系数的影响可忽略. 蒸散发变化可区分为气候变化引起的蒸散发变化和下垫面改变所引起的蒸散发变化两个方面. 气候变化主要针对辐射数据, 日照时长, 积温等气候因子的变化分析影响蒸发的因素, 下垫面变化主要分析水域面积, 植被变化等土地利用类型变化导致的实际可蒸发量变化.

用$\Delta\alpha P_0$ 表示人类活动对径流变化的影响. 以此分析径流变化的归因. 由式(4)通过分析降水和径流系数的变化, 可以得到气候变化和人类活动对径流变化的影响.

3 结果分析

3.1 气温、降水和径流变化

1951~2007 年, 黄河流域气温呈显著上升趋势, 气温上升速率最大的是兰州(0.32℃/10 a), 最小的是花园口和利津(0.19℃/10 a), 皆通过 99%置值度检验(表 2).

黄河上游(兰州站)流域的降水变化趋势不明显, 变化趋势为 0, 三门峡站、花园口站、利津站控制流域降水下降趋势显著, 分别为 8.8, 9.2, 9.8 mm/10 a(表 3).

同一时段黄河实测径流量均表现出显著下降趋势(表 3), 兰州站、三门峡站、花园口站和利津站径流下降趋势分别为 7.8, 7.5, 7.6 和 10.8 mm/10 a. 径流下降趋势经 MK 分析, 兰州站通过 95%置值度检验, 三门峡站、花园口站、利津站通过 99%置值度检验. 黄河上游降水量变化不显著, 但径流量显著下降. 下游利津站径流量下降的幅度最大, 1994~2004 年的流域年径流量平均值仅为 1960~1969 年的 22.4%.

长江流域气温也呈显著上升趋势, 寸滩、宜昌、汉口、大通站流域气温上升速率分别为 0.11, 0.13, 0.13, 0.14℃/10 a.

流域降水量则显著下降, 寸滩、宜昌、汉口、大通站以上流域, 降水量下降速率分别为 24.7, 20.2, 18.8, 18.2 mm/10 a.

尽管降水呈显著下降趋势, 但径流量变化不明显, 寸滩和宜昌水文站径流呈显著下降趋势, 分别通过 90%和 95%置值度检验, 下降速率为 9.9 和 7.2 mm/10 a; 而汉口和大通站径流表现出不显著的下降趋势, 下降速率为 2.9 和 2.1 mm/10 a.

利用 MK 非参数检验对降水和径流序列进行突变检验, 结果显示, 黄河流域各站降水没有明显突变点, 径流在 20 世纪 80 年代末 90 年代初发生显著突变, 而长江流域降水和径流均无明显突变点(表 4). 黄河流域径流突变发生时间与中国经济发展进程(改革开放时间)相一致, 推测这一突变主要是由人类活动作用引起.

上述分析结果表明, 黄河流域降水的显著减少对应着径流的显著减少, 而长江流域降水的显著减少对应上游流域(寸滩和宜昌站)径流的显著减少, 而中下游流域(汉口和大通站)径流不显著的减少, 长江流域中下游地区径流变化很难用降水变化或人类活动导致径流减少的结果解释. 黄河、长江流域降水和径流变化趋势的非一致性, 说明人类活动造成流域下垫面改变, 对径流的影响在不同地区有较大差异. 为找出变化差异性的原因, 本文对反映流域下垫面状况的径流系数进行了分析.

表 2　黄河、长江流域年平均气温变化趋势

流域	站名	年份	气温	
			趋势(℃/a)	置值度(%)
黄河	兰州(LZ)	1953~2007	0.032	95
	三门峡(SMX)	1951~2007	0.023	99
	花园口(HYK)	1953~2007	0.019	99
	利津(LJ)	1953~2007	0.019	99
长江	寸滩(CT)	1957~2007	0.011	99
	宜昌(YC)	1957~2007	0.0125	99
	汉口(HK)	1957~2007	0.013	99
	大通(DT)	1957~2007	0.0135	99

表 3　流域降水与径流变化趋势

流域	站名	时间(a)	降水		径流	
			趋势 (mm/a)	置值度 (%)	趋势 (mm/a)	置值度(%)
黄河	兰州	54	0.00	NS	–0.78	95
	三门峡	48	–0.88	95	–0.75	99
	花园口	57	–0.92	90	–0.76	99
	利津	57	–0.98	90	–1.08	99
长江	寸滩	48	–2.47	99	–0.99	95
	宜昌	57	–2.02	99	–0.72	90
	汉口	57	–1.88	99	–0.29	NS
	大通	57	–1.81	99	–0.21	NS

表 4　黄河径流突变检验

黄河流域	径流(mm/a)			
	年份	突变前	突变后	变化(%)
兰州	1992	146.3	111.8	－23.58
三门峡	1987	58.2	36.3	－37.71
花园口	1990	60.3	32.5	－46.03
利津	1982	54.8	24.0	－56.18

3.2　径流系数变化

对径流系数时间序列的分析表明, 黄河流域径流系数变化幅度较大, 呈显著递减趋势, 黄河干流各水文站径流系数减少速率分别为兰州站 0.014/10 a, 三门峡站 0.013/10 a, 花园口站 0.013/10 a, 利津站 0.019/10 a, 皆通过 99%显著性检验(图 2(a)). 下游利津站减少速率最大, 由于花园口以下黄河基本呈“地

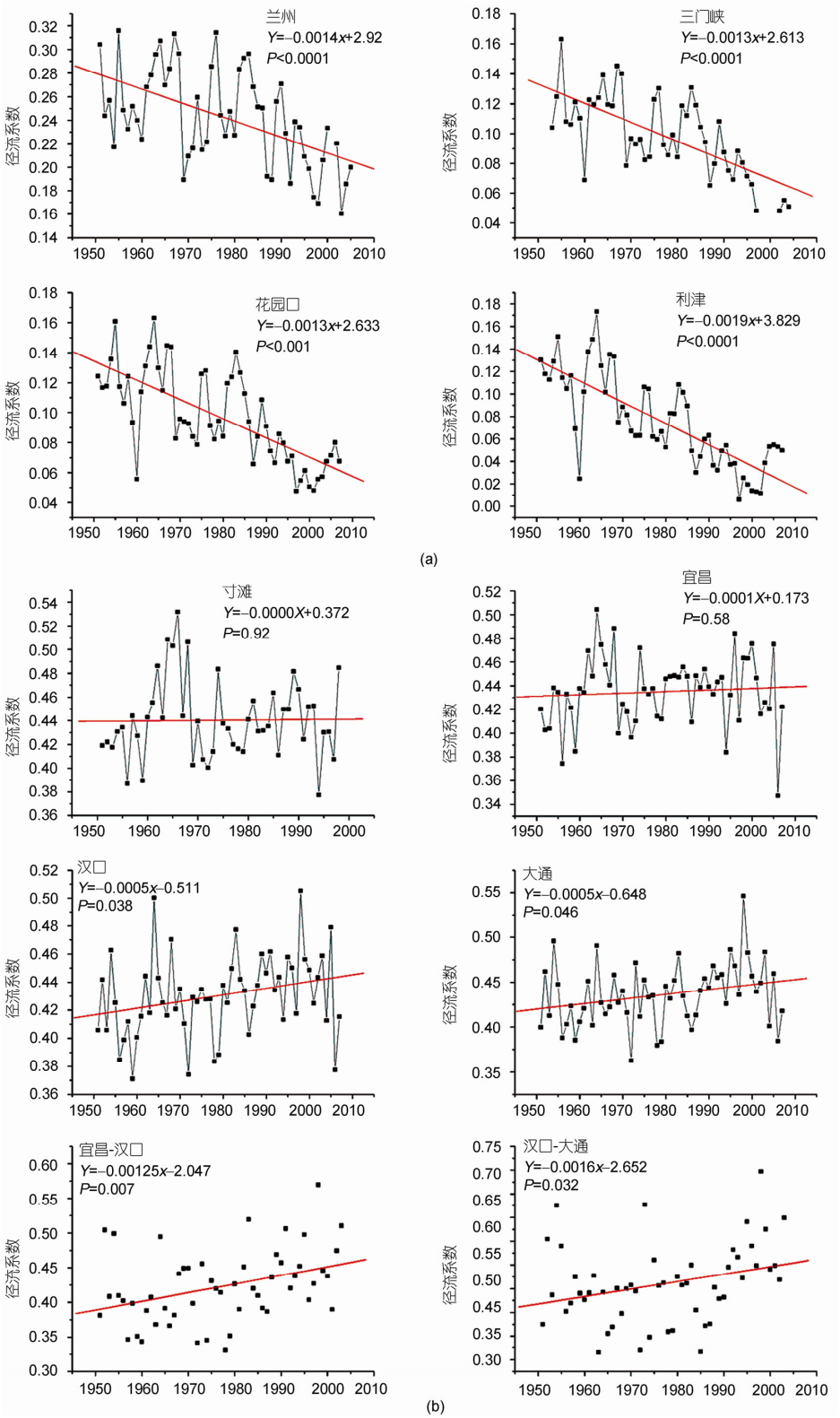

图 2　黄河流域和长江流域径流系数变化趋势

(a) 黄河流域; (b) 长江流域

上河”状态, 因此该段以下的降水补给不再是影响径流的主要因素, 上游来水以及人类活动起主要作用, 花园口的径流系数减少速率明显小于利津, 这一关系可能是由于流域灌溉用水和城市工业生活引水导致近 50 年黄河下游流域产流能力显著下降.

长江流域径流系数变化相对平稳, 寸滩、宜昌径流系数呈不显著的增加趋势, 分别为 0.001/10 a 和 0, 汉口和大通的径流系数表现为显著增加趋势, 速率皆为 0.005/10 a, 通过 95%显著性检验(图 2(b)). 长江上游径流系数无显著变化, 下游径流系数显著增大. 为了进一步探讨这一变化, 分析了宜昌-汉口和汉口-大通站区间的径流系数变化, 在这两个区间内, 径流系数的增加速率更大, 分别为 0.013 和 0.016/10 a(如图 2(b)). 长江流域径流系数变化可能也与人类活动有关.

3.3 降水-径流双累积曲线

将降水与径流的连续累积量绘制在同一坐标系, 对比径流量与降雨量的双累积曲线, 观察直线斜率的变化过程, 通常情况下, 降水-径流双累积曲线为一直线; 如果流域下垫面发生改变, 则降水-径流双累积曲线会发生偏移. 因此, 可根据双累积曲线发生偏移的年代确定下垫面受人类活动影响发生显著改变的时间点. 若曲线向上偏离, 说明同降水量下河川径流量增大; 若向下偏离, 说明同降水量下径流量减小. 偏离越大, 很可能表明非降水因素, 即人类活动的作用强度愈大[30~32].

从图 3 中可见, 黄河流域三门峡、花园口、利津站的降水-径流累积曲线从 20 世纪 80 年代末开始发生向下偏移, 利津站偏移幅度最大. 长江流域寸滩、宜昌、汉口降水-径流累积曲线没有发生明显偏移, 大通站 90 年代末期开始发生向上的偏移, 但偏移程度不明显, 说明长江和黄河流域人类活动的影响都在中下游地区表现的更为显著.

3.4 降水量和径流量关系变化

已有研究表明, 黄河流域大量水土保持工作是从 20 世纪 70 年代开始[33,34], 兰州以下流域径流系数的持续递减表明流域陆面降水产流能力下降, 降水直接形成径流的部分减小. 从图 3 的降水-径流累积曲线偏移发生的时间看, 黄河流域降水和径流关系在 20 世纪 70 年代后期发生变化. 降水-径流关系(图 4)显示, 以黄河上游兰州站为例, 1970 年以前, 流域内降水-径流关系较为密切, 相关系数在 0.82 以上; 1970 年以后, 降水-径流关系的相关程度显著减弱, 相关系数为 0.65. 在流域降水量没有明显增减变化的情况下, 降水-径流关系变化表明人类活动对原有产流过程产生了较大影响(图 4(a)). 两个时期的统计曲线均向下平移, 这表明了流域产流能力的下降, 这也是流域用水量的增加的结果.

长江流域各站 1970 年后降水-径流关系增强, 表明径流变化对降水变化敏感性增强(图 4(b)). 长江中游自 20 世纪 50~60 年代起曾经开展大规模的围湖造田[35], 湖泊湿地对年降雨量的调节作用减弱使丰水年径流增加, 枯水年径流量减少.

3.5 气候变化和人类活动的水文响应

表 5 是依据式(4)计算的黄河及长江流域全流域降水变化和下垫面变化对径流变化的贡献, 包括正负两方面的作用. 通过对不同年代黄河、长江全流域降水变化和下垫面变化对径流的影响程度的比较(表 5), 可以看出人类活动的影响在随时间加强, 且在 20 世纪 80 年代有明显增强. 70 年代, 下垫面因素对黄河流域径流变化的影响占 75%, 长江流域占 62%; 到 21 世纪初, 下垫面因素对黄河流域径流变化的影响占 84%, 长江流域占 73%; 1970~2008 年, 降水变化和人类活动引起的下垫面变化都引起了黄河流域径流量的减少, 其中降水减少的贡献率为 11%, 人类活动的贡献率为 83%, 同一时段, 长江流域降水减少引起的径流减少占径流量变化的 29%, 径流量增加的结果 71%是由人类活动造成的.

图 5 比较了 1980~2008 年黄河、长江流域各水文站径流量变化的降水因素和下垫面因素作用, 可见在这一时段黄河流域径流量减少, 长江中下游流域径流量略有增加, 造成径流量变化的原因不同. 在黄河流域, 人类活动是径流减少的主要原因, 由下垫面变化造成径流减少的比例在兰州、三门峡、花园口、利津分别为 97%, 83%, 83%和 91%, 降水引起的径流量减少比例分别为 3%, 17%, 17%和 9%. 降水和人类活动对径流的影响是同方向的.

降水减少也引起了长江流域的径流减少, 但长江流域人类活动引起的下垫面变化引起径流增加, 一定程度上抵消了降水减少引起的径流减少, 因降水减少引起的寸滩、宜昌、汉口、大通的径流量减少

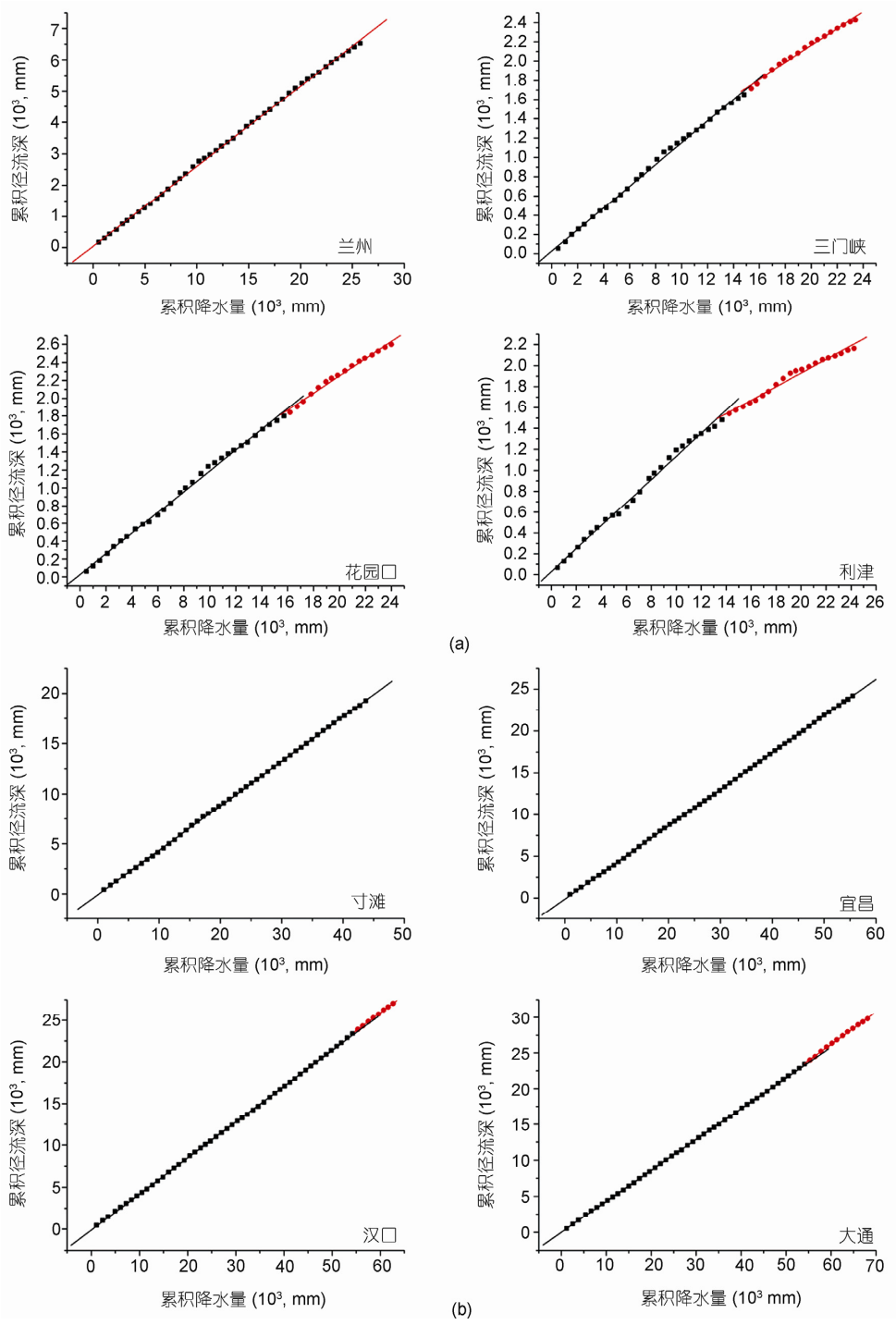

图 3　黄河流域(a)和长江流域(b)降水-径流累积曲线

分别占 89%, 74%, 43%和 35%. 由下垫面变化引起的径流增量在上游寸滩占 11%, 宜昌占 26%, 中下游的汉口和大通, 分别占 57%和 65%. 降水和人类活动对径流的影响是反向的(图 5).

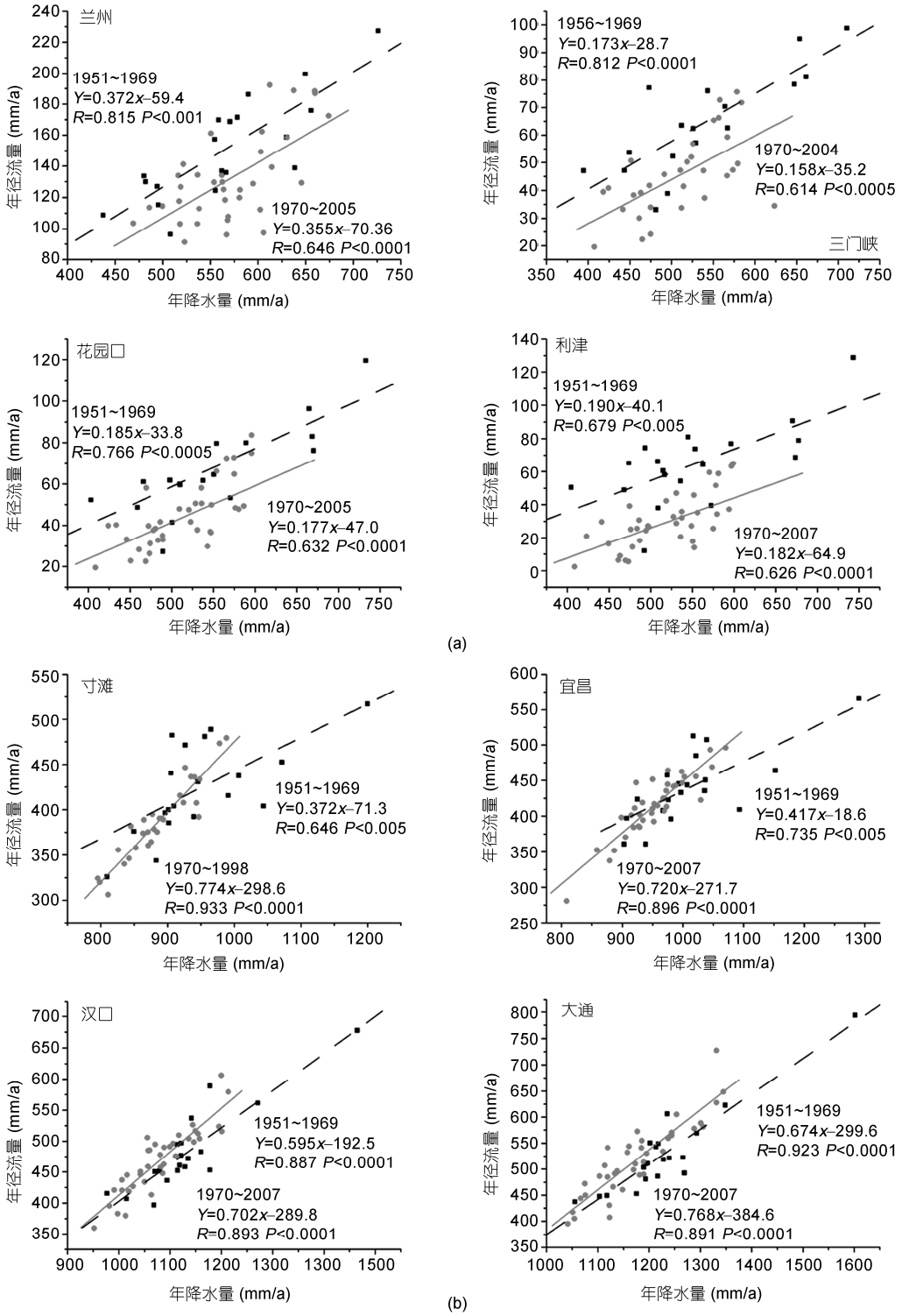

图 4　黄河流域(a)与长江流域(b)降水-径流关系变化

虚线和方块表示 1951~1969 年, 实线和圆点表示 1951~1969 年

表 5　黄河、长江全流域不同年代径流变化影响因子分析

流域	时段	变化(mm)	下垫面因素(%)	降水因素 (%)	流域	时段	变化(mm)	下垫面因素(%)	降水因素(%)
黄河流域	1970~1979	–505	75	18	长江流域	1970	126	62	36
	1980~1989	–618	86	9		1980	147	70	30
	1990~1989	–670	85	7		1990	251	77	24
	2000~1989	–656	84	8		2000	167	73	26
	平均	–612	83	11		平均	173	71	29

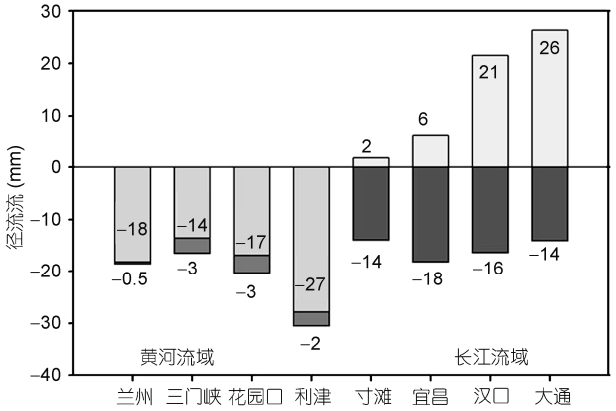

图 5　1980~2008 年流域各水文站径流变化影响因子分析

与 1951~1979 年比较, 图中深色表示降水变化对径流影响, 浅色表示下垫面变化对径流影响

4　讨论

近 50 年, 人类活动成为影响整个黄河和长江流域中下游径流变化的主要因素, 且影响程度随时间而增强. 表 6 中的人口、灌溉面积、GDP 均为反映流域内人类活动影响程度的指标, 1950~2008 年黄河流域和长江流域的城镇人口分别增长了 15251 和 17274.8 万人, 建筑业产值分别增长 2447 倍和 634 倍. 同时期长江流域中游湖泊面积减少 50%以上, 有效灌溉面积增幅分别为 637.26%和 206%, 用于灌溉的河道取水量急剧增加. 黄河流域灌溉用水面积和用水量增加, 降水减少, 导致流域缺水状况加剧. 长江流域人口数量大, 经济增长快, 人类活动程度高, 但径流对人类活动响应程度却比黄河流域小.

人类活动对黄河流域和长江流域的径流作用呈现相反的结果, 在黄河流域引起径流减少, 在长江流域引起径流增加, 与通常认为的人类活动引起径流减少不同, 造成这一现象的原因需要进一步探讨.

蒸发量下降可能是导致长江径流增加的原因之一. 通常认为径流系数α的变化是由下垫面变化引起的, 但蒸发量大小也会引起径流系数变化. 有研究认为, 过去 50 年, 黄河、长江流域的实际蒸发量均表现出显著的下降趋势[36~38]. 蒸发量下降的主要原因是由于云量和人类活动所引起的气溶胶及其他污染物的增加, 导致到达地面的太阳辐射强度减弱, 引起气温日较差的减小, 其次是全球变暖背景下亚洲冬季风和夏季风减弱导致的平均风速减小[39~43]. 蒸发量的减少也呈现出区域差异, 湿润区蒸发量减少速率最大, 干旱区最小[36,39]. 水分条件是干旱区蒸发的主要影响因素, 湿润区蒸发则主要取决于热量条件. 黄河流域地处干旱区, 水资源匮乏, 多数农田需要灌溉, 流域耕地增加必然导致灌溉用水的增加; 人口、耕地、GDP 的快速增长促使工农业用水量激增, 这是导致黄河中下游地区径流减少的主要原因, 径流减少程度远远超过了蒸发量变化对径流的影响. 长江流域地处湿润区, 降水充沛, 多有湖泊湿地分布, 农田多为稻田, 农田的增加并未导致流域蒸发量的增大, 因而, 灌溉面积和用水量的增加, 并不像黄河流域那样会导致径流的减少.

除了因辐射和风速下降引起的蒸发量减少, 水域尤其是湖泊面积减小也是长江流域蒸发量减少的重要原因. 由于水面蒸发量大于陆面蒸发量, 湖泊面积减少导致蒸发受抑制的程度更明显. 20 世纪 30 年代长江中游湖泊面积为 11711 km^2, 到 2000 年, 减少到 4910 km^2. 减少最剧烈的时段发生在 20 世纪 50~70 年代, 湖泊面积减少了 5153 km^2, 江汉平原湖泊面积减少速率在 207.5 km^2/a, 湖泊数量减少了 116 个, 到 20 世纪 70 年代长江中游湖泊面积仅为 5950 km^2[35]. 1930 年到 20 世纪末, 洞庭湖面积从 4955 km^2 减小到 2518 km^2, 减少了 49.2%[44].

20 世纪 50 年代末之后的近 50 年, 洞庭湖内湖 1 km^2 以上内湖数量减少 52%, 湖泊面积缩小 58%[45]. 与 20 世纪 50 年代相比, 2005 年湖北省湖泊面积减少了 64.4%[46]. 20 世纪 60 年代对长江中游荆江段裁弯

表 6 近 50 年黄河、长江流域人口、农用地、GDP 变化

	黄河流域			长江流域		
	人口(10^8, 人)	灌溉面积(10^6, 公顷)	GDP(亿元)	人口(10^8, 人)	灌溉面积(10^6, 公顷)	GDP(亿元)
1950	1.79	2.62	122.12	2.27	6.34	296.39
1960	2.13	7.33	333.45	2.60	10.85	731.13
1970	2.67	9.12	506.29	3.26	10.17	931.79
1980	3.16	14.8	1130.22	3.88	17.05	2013.58
1990	3.66	15.18	4867.24	4.43	17.93	7176.96
2000	3.98	18.40	24159.08	4.79	18.86	34206.18
2008	4.09	19.30	88891.13	4.95	19.39	107776.4

取直后, 流程缩短, 比降增大, 流速加快, 河道水面面积减少[47], 也相当于减少了中游湖泊面积.

下垫面条件改变不仅包括湖泊面积减少, 也包括大规模的城市化引起下垫面条件改变. 由于土地利用的变化促使土壤压实和结皮, 使入渗速率和土壤蓄水含量有所降低, 入渗和地下水补给降低以及径流增加[48]. 地面硬化后大量天然可渗水地面成为不透水的硬质地表面, 城区不透水面积大量增加, 造成地表径流量增加, 径流系数变大[49]. 这也就解释了长江流域 1970 年后降水—径流关系较之前好的原因, 同时也可以解释在长江流域人类活动导致流域产流能力加强, 径流增加.

对径流产生影响的人类活动也包括了修建大型水库等工程措施, 黄河与长江流域有龙羊峡和三峡等大型水库, 对多年径流变化起调蓄作用. 黄河流域由于植被稀疏, 水库对径流的影响更多体现在水面积的加大使得蒸发面积加大, 从而减少径流. 而三峡库区原先多为林地, 水库的作用更多体现在林地面积减少, 林冠截水作用被减弱从而导致区间产流能力增加, 虽然蒸发面积也加大, 但是由于地处湿润区且库区坡降较大, 蒸发面积增加带来的产流减少不如林冠截留能力减弱带来的产流增加作用显著. 总的来说, 水库可调节年内径流量, 对径流的长期影响还需进一步探讨.

有关长江上游径流变化的研究表明, 在长江上游流域地形复杂的主要控制站中, 表示源区的屏山站平均流量增加, 四川盆地的北碚站(嘉陵江)的径流显著减少, 寸滩站径流减少主要受岷江和嘉陵江流域降水量减少和人类活动的影响[50]. 本文主要研究长江干流主要控制站, 未细化到支流的具体变化状况, 四川盆地与长江源头干流径流变化差异的成因需进一步讨论.

5 结论

通过对黄河和长江流域气温、降水和径流变化的对比分析表明, 1951~2008 年间年均气温升高约 0.20~0.35℃/10 a, 黄河流域年降水除上游兰州站以上流域变化微弱, 兰州站以下流域年降水呈显著减少趋势(9~25 mm/10 a), 而同期黄河流域径流呈明显的下降趋势, 中上游兰州、三门峡和花园口站径流减少量约 7.5 mm/10 a, 而利津站减少趋势为 10.8 mm/10 a; 长江流域径流变化趋势不明显, 上游寸滩、宜昌呈显著减少趋势, 分别减少 9.9 和 7.2 mm/10 a, 中游汉口站和下游大通站呈不显著的减少趋势(2.9 和 2.1 mm/10 a); 通过 MK 检验, 黄河流域径流变化趋势在 20 世纪 80 年代末至 90 年代初发生突变, 长江流域径流无明显突变点; 黄河流域径流的突变时间与我国改革开放时间一致, 这表明径流的变化很可能是人类活动加剧的结果. 通过表征流域产汇流能力的径流系数分析表明, 黄河流域产流能力显著下降, 而长江流域中下游略有上升. 这表明了不同干湿区河流径流对人类活动的响应存在较大差别. 与 1951~1969 年相比, 1970~2008 年, 降水量下降和人类活动对黄河流域的径流减少贡献量分别为 12%和 83%, 对长江流域径流变化的贡献分别为 31%和 69%. 并且人类活动的作用随时间增强, 2000 年之后, 人类活动对黄河、长江流域径流变化的贡献分别为增加到 84%和 73%. 1980~2008 年, 由降水引起的黄河流域径流量减少比例在兰州、三门峡、花园口、利津分别为 3%, 17%, 17%和 9%, 而同期由下垫面变化造成的径流减少的比例分别为 97%, 83%, 83%和 91%. 因降水减少引起的长江流域径流量减少比例在寸滩、宜昌、汉口、大通的分别占 89%, 74%, 43%和 35%, 而同期由下垫面变化引起的径流增量在上游寸滩占

11%, 宜昌占 26%, 汉口和大通, 分别占 57%和 65%.

造成径流变化的人类活动包括灌溉面积增加、用水量增加、湖泊面积减小、下垫面硬化等. 流域土地利用变化对下垫面条件的改变使蒸发量发生变化, 随着湖泊面积减少, 蒸发量也趋于减少. 干旱区与湿润区由于蒸发条件不同, 人类活动对径流作用结果也有很大差异. 黄河流域主要位于干旱区、半干旱区和半湿润区, 人口增长和灌溉面积增加引起用水量增加, 造成径流减少; 在长江中下游的湿润区, 围湖造田和大规模城市化抑制了蒸发和下渗过程, 导致径流增加. 一般认为, 人类活动对径流的作用是造成径流减少, 径流变化对降水敏感性减弱. 本文研究结果显示, 在湿润区的长江流域, 由于人类活动导致的湖泊减少、城市化引起的地面硬化等, 造成流域产流能力加强, 径流变化对降水敏感性增加. 此外, 由于风速和辐射下降, 过去 30 年长江流域蒸发下降, 长江中下游地区蒸发量减少, 也是导致下游产流能力加强的原因之一.

致谢 感谢崔雪峰教授提供社会经济资料并对文章修改提出宝贵意见.

参考文献

1 Zhang Y K, Schilling K E. Increasing streamflow and baseflow in Mississippi River since the 1940s: Effect of land use change. J Hydrol, 2006, 324: 412–422

2 Piao S, Friedlingstein P, Ciais P, et al. Changes in climate and land use have a larger direct impact than rising CO_2 on global river runoff trends. Proc Natl Acad Sci USA, 2007, 104: 15242–15247

3 Kundzewicz Z W, Nohara D, Jiang T, et al. Discharge of large Asian rivers—Observations and projections. Quat Int, 2009, 208: 4–10

4 Jiang T, Fischer T, Lu X X, et al. Larger Asian Rivers: Climate change, river flow and watershed management. Quat Int, 2010, 226: 1–3

5 Liu C, Zheng H. Changes in components of the hydrological cycle in the Yellow River basin during the second half of the 20th century. Hydrol Process, 2004, 18: 2337–2345

6 Yang D, Li C, Hu H, et al. Analysis of water resources variability in the Yellow River of China during the last half century using historical data. Water Resour Res, 2004, 40: doi: 10.1029/2003WR002763

7 Xu J X. The water fluxes of the Yellow River to the sea in the past 50 years, in response to climate change and human activities. Environ Manage, 2005, 35: 620–631

8 Tang Q H, Oki T, Kanae S, et al. A spatial analysis of hydro-climatic and vegetation condition trends in the Yellow River basin. Hydrol Process, 2008, 22: 451–458

9 Miao C Y, Ni J R, Alistair G L, et al. A preliminary estimate of human and natural contributions to the changes in water discharge and sediment load in the Yellow River. Glob Planet Change, 2011, 76: 196–205

10 Jiang T, Kundzewicz Z W, Su B D. Changes in monthly precipitation and flood hazard in the Yangtze River Basin, China. Int J Climatol, 2008, 28: 1471–1481

11 Jiang T, Su B, Hartmann H. Temporal and spatial trends of precipitation and river flow in the Yangtze River Basin, 1961–2000. Geomorphology, 2007, 85: 143–154

12 Xu K , Milliman J D, Xu H. Temporal trend of precipitation and runoff in major Chinese Rivers since 1951. Glob Planet Change, 2010, 73: 219–232

13 Zhai J Q, Liu B, Hartmann H, et al. Dryness/wetness variations in ten large river basins of China during the first 50 years of the 21st Century. Quat Int, 2010, 226: 101–111

14 Zhai J Q, Su B D, Krysanova V, et al. Spatial variation and trends in PDSI and SPI indices and their relation to streamflow in ten large regions of China. J Clim, 2010, 23: 649–663

15 Liu L L, Liu Z F, Ren X Y, et al. Hydrological impacts of climate change in the Yellow River basin for the 21st Century using hydrological model and statistical downscaling model. Quat Int, 2011, 244: 211–220

16 Zhang H, Wu J W, Zheng Q H, et al. A preliminary study of oasis evolution in the Tarim Basin, Xinjiang, China. J Arid Environ, 2003, 55: 545–553

17 Lioubimtseva E, Cole R, Adams J M, et al. Impacts of climate and land-cover changes in arid lands of Central Asia. J Arid Environ, 2005, 62: 285–308

18 Zhang Q, Xu C Y, Becker S, et al. Sediment and runoff changes in the Yangtze River basin during past 50 years. J Hydrol, 2006, 331:

511–523
19 秦年秀, 姜彤, 许崇育. 长江流域径流趋势变化及突变分析. 长江流域资源与环境, 2005, 14: 589–594
20 叶柏生, 陈鹏, 丁永建, 等. 100 多年来东亚地区主要河流径流变化. 冰川冻土, 2008, 30: 556–561
21 张士锋, 贾绍凤, 刘昌明, 等. 黄河源区水循环变化规律及其影响. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2004, 34(增刊Ⅰ): 117–125
22 Xu C Y, Gong L, Jiang T , et al. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment. J Hydrol, 2006, 327: 81–93
23 Ding Y, Yang D Q, Ye B S, et al. Effects of bias correction on precipitation trend over China. J Geophys Res, 2007, 112:13－16 D13116, doi: 10.1029/2006JD007938
24 徐宗学, 张楠. 黄河流域近 50 年降水变化趋势分析. 地理研究, 2006, 25: 27–34
25 徐宗学, 和宛琳. 黄河流域近 40 年蒸发皿蒸发量变化趋势分析. 水文, 2005, 25: 6–11
26 徐宗学, 隋彩虹. 黄河流域平均气温变化趋势分析. 气象, 2005, 31: 7–10
27 徐宗学, 赵芳芳. 黄河流域日照时数变化趋势分析. 资源科学, 2005, 27: 153–159
28 Hamed K H. Enhancing the effectiveness of prewhitening in trend analysis of hydrologic data. J Hydrol, 2009, 368: 143–155
29 Lettenmaier D P, Wood E F, Wallis J R, et al. Hydroclimatological trends in the continental United States, 1948–88. Climate, 1994, 7: 586–607
30 Du J, He F, Zhang Z, et al. Precipitation change and human impacts on hydrologic variables in Zhengshui River basin, China. Stoch Environ Res Risk Assess, 2011, 25: 1013–1025
31 许炯心, 孙季. 近 50 年来降水变化和人类活动对黄河入海径流通量的影响. 水科学进展, 2003, 14: 690–695
32 穆兴民, 张秀勤, 高鹏, 等. 双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题. 水文, 2010, 30: 47–51
33 Wang H J, Yang Z S, Saito Y, et al. Interannual and seasonal variation of the Huanghe (Yellow River) water discharge over the past 50 years: Connections to impacts from ENSO events and dams. Global Planet Change, 2006, 50: 212–225
34 Miao C Y, Ni J R, Borthwick A G. Recent changes of water discharge and sediment load in the Yellow River basin, China. Prog Phys Geog, 2010, 34: 541–561
35 Du Y, Xue H P, Wu S J, et al. Lake area changes in the middle Yangtze region of China over the 20th Century. J Environ Manage, 2011, 92: 1248–1255
36 丛振涛, 倪广恒, 杨大文, 等. “蒸发悖论”在中国的规律分析. 水科学进展, 2008, 19: 147–152
37 Gao G, Chen D L, Xu C Y. et al. Trend of estimated actual evapotranpiration over China during 1960–2002. J Geophys Res, 2007, 112, doi: 10.1029/2006JD008010
38 王艳君, 姜彤, 刘波. 长江流域实际蒸发量的变化趋势. 地理学报, 2010, 65: 1079–1088
39 刘敏, 沈彦俊, 曾燕, 等. 近 50 年中国蒸发皿蒸发量变化趋势及原因. 地理学报, 2009, 64: 259–269
40 刘健, 张奇, 许崇育, 等. 近 50 年鄱阳湖流域实际蒸发量的变化及影响因素. 长江流域资源与环境, 2010, 19: 139–145
41 Yang K, Ye B S, Zhou D G, et al. Response of hydrological cycle to recent climate changes in the Tibetan Plateau. Clim Change, 2011, 109: 517–534
42 Shi G Y, Hayasaka H, Ohmura A, et al. Data quality assessment and the long-term trend of ground solar radiation in China. J App Met Climat, 2008, 47: 1006–1016
43 王艳君, 姜彤, 许崇育. 长江流域蒸发皿蒸发量及影响因素变化趋势. 自然资源学报, 2005, 11: 864–870
44 Zhao S, Fang J, Miao S, et al. The 7-decadedegradation of a large freshwater lake in central Yangtze River, China. Environ Sci Technol, 2005, 39: 431–436
45 黄群, 姜彤. 近 50 年来洞庭湖区的内湖变化. 湖泊科学, 2005, 17: 202–206
46 张毅, 孔祥德, 邓宏兵, 等. 近百年湖北省湖泊演变特征研究. 湿地科学, 2010, 8: 15–20
47 殷鸿福, 陈国金, 李长安, 等. 长江中游的泥沙淤积问题. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34: 195–209
48 李丽娟, 姜德娟, 李九一, 等. 土地利用覆被变化的水文效应研究进展. 自然资源学报, 2007, 22: 211–224
49 徐振辞, 郭永辰. 城市不同下垫面条件的降雨径流模拟试验研究. 南水北调与水利科技, 2007, 5: 64–66
50 王渺林. 长江上游流域径流变化. 水土保持研究, 2007, 145: 110–115