

近 45 年来降水变化和人类活动对 潮河流域年径流量的影响

李子君¹, 李秀彬²

(1 山东师范大学 人口·资源与环境学院, 山东 济南 250014 2 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 近 45 a 来, 随着流域降水量减少, 以及修建水利工程、引水、实施水土保持等人类活动的增加, 潮河流域年径流量呈明显减少趋势。利用降水-径流经验统计模型, 定量评估了潮河流域降水变化与人类活动对流域年径流量的影响程度。结果表明: 1981~1990、1991~2000、2001~2005、1981~2005 年, 受人类活动影响所产生的年均减水量分别为 $1.32 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $1.46 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $1.09 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占相应时段总减水量的 95.1%、98.9%、60.7% 和 83.2%; 受降水变化影响所产生的年均减水量分别为 $0.07 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.01 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.95 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占相应时段总减水量的 4.9%、1.1%、39.3% 和 16.8%。人类活动因素的贡献率远大于降水因素。

关键词: 降水变化; 人类活动; 年径流量; 降水-径流经验统计模型; 潮河流域

中图分类号: P426.61+3 文献标识码: A 文章编号: 1000-0690(2008)06-0809-05

随着全球气候变化和人类活动的加剧, 水资源短缺已成为世界性的问题, 是当前人类面临的重要挑战之一^[1-2]。从全球、区域和流域不同尺度和交叉学科途径, 探讨变化环境下的水资源问题, 成为当今国内外资源与环境科学领域的研究热点^[3-12]。

近年来, 北京市人均水资源量不足 300 m^3 , 相当于全国人均水资源占有量的 $1/8$ ^[1], 水资源供需矛盾日益突出。北京市主要供水水源地——密云水库来水量减少的趋势十分明显, 与 1960~1979 年段相比, 1980~1997 年的年均来水量减少了 $4 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[13]。特别是 1999 年以来, 北京遭受连续 7 a (1999~2005 年) 干旱, 年均降水量 400 mm 左右, 密云水库的年均入库水量仅为 $2.51 \times 10^8 \text{ m}^3$, 供水形势非常严峻。山区集雨区是华北地区尤其是北京市等大城市供水的重要水源地, 山区水源地来水量的大幅度减少, 给当地和中下游地区的经济社会发展和生态建设带来很大的影响^[13]。潮河流域是密云水库的重要山区集雨区之一。有些研究认为, 密云水库来水量衰减的原因除与降水减少有关外, 还受潮河流域人类活动的影响^[14-16]。

山区入库径流变化的主要原因究竟是降水变化还是人类活动, 他们究竟在山区来水量减少的过

程中起到多大的作用, 过去对这些问题研究大都为定性分析, 定量评估欠缺, 而对于这一问题的回答关系到流域管理的正确决策。为此, 本文选取潮河流域作为研究区域, 分析影响流域径流量变化的因素, 定量评估流域尺度上的降水变化和人类活动对年径流量的影响程度, 为流域水资源的合理调控和生态建设提供依据。

1 研究区概况

潮河干流发源于河北省丰宁满族自治县黄旗镇北部, 流经丰宁县中部、滦平县西部, 经密云县的古北口镇流入密云水库。本研究中的潮河流域指潮河流域密云水库以上部分, 流域总面积 4875.25 km^2 , 占密云水库以上集水流域面积的 31%, 涉及到河北省的丰宁满族自治县 11 个乡镇、滦平县 11 个乡镇以及北京市密云县的一部分。流域北接内蒙古高原, 南邻华北平原, 燕山山脉横贯流域南部, 山地面积占总面积的 80%。气候类型属于中温带向暖温带过渡、半干旱向半湿润过渡的大陆性季风气候, 多年平均降水量约 494 mm。土壤类型以棕壤和褐土分布最广, 占总面积的 80% 以上。植被类型丰富, 以针阔叶混交林为主, 林草覆盖度达到 40%。

收稿日期: 2008-02-08 修订日期: 2008-06-25
基金项目: 国家林业科技支撑计划专题项目 (2006BAD03A020)、中国科学院知识创新项目 (KZCX2-YW-401-2)、中国科学院知识创新项目 (CXDG-A04-07) 资助。
作者简介: 李子君 (1974-), 女, 山东日照人, 博士, 主要从事土地利用变化方面的研究。E-mail: lz@sdjzu.edu.cn

2 研究数据与方法

2.1 研究数据

潮河流域的 14 个雨量站和 3 个水文站均积累了长系列的观测资料。为了分析流域多年来的径流和降水变化,本文收集了流域出口控制站下会站 1961~2005 年逐年流量数据、流域内 17 个雨量站(包括 3 个水文站) 1961~2005 年逐年降水数据,这些数据来源于河北省水文总站。还收集了流域内丰宁和滦平 2 个气象站点 1961~2005 年逐年降水数据,这些数据分别来源于国家气象局和滦平县气象局。采用泰森多边形方法求得流域平均年降水量^[17]。为了分析流域内的人类活动,收集了流域 1961~2005 年水利工程数据、逐年用水量数据和逐年水土保持措施面积数据,这些数据主要来源于丰宁县水务局和滦平县水务局的《水利综合统计年报》等相关的统计资料。

2.2 研究方法

本文的研究方法主要是经验统计分析方法^[18~21],是评价降水变化与人类活动对河川径流量影响的常用方法。径流的形成受降水及下垫面条件的制约,人类活动可以改变流域下垫面状况,但不可能显著改变流域降水条件。因此,可以认为降水是不受人类活动的影响的。据此,分别对人类活动影响较小时期(基准期)的降水、径流实测资料 and 人类活动影响显著时期(措施期)的降水、径流实测资料进行回归分析,建立两个时期的年径流量与降水量之间的经验统计模型,通过对这两个时期降水-产流关系的分析比较,区别出降水变化和人类活动对流域径流量变化的影响程度。人类活动影响较小时期(基准期)的降水-径流经验统计模型的精度及降水资料的可靠性是该方法计算的关键^[22,23]。

3 结果分析

3.1 流域年降水量和径流量的变化趋势

Mann-Kendall 秩次相关法是检验水文时间序列变化趋势的良好方法^[14,24]。根据潮河流域 1961~2005 年的降水资料和实测径流资料,计算得年降水的肯德尔标准化变量 $M_P = -0.09$ 年径流的肯德尔标准化变量则为 $M_R = -2.34$ 取显著性水平 $\alpha = 0.05$ 则相应的检验临界值为 $M_\alpha = 1.96$ 由于 $M_P < -M_\alpha$, $M_R > M_\alpha$, 所以潮河流域降水量下降

的趋势不明显,但径流量下降的趋势相当明显。1991~2000 年的流域年径流量平均值为 1961~1970 年的 90.9%,减少幅度较大。潮河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,可能对径流变化起很大作用。

3.2 人类活动对流域年径流量的影响

1) 流域蓄水工程的影响。潮河流域蓄水工程主要是小型水库和塘坝,大部分建成于 20 世纪 70 年代末至 80 年代初。流域内现有小型水库 12 座,总库容量为 $1\,015.25 \times 10^4 \text{ m}^3$,总控制流域面积占潮河流域面积的 5.92%。流域内建有塘坝 13 座,总容量为 $25.33 \times 10^4 \text{ m}^3$,由于设计标准不高或配套设施不全,大部分塘坝已经废弃。小型水库的修建使得部分径流被拦蓄于库内,这无疑对潮河流域径流量的减少起到了一定作用。

2) 流域引水的影响。对潮河流域近 20 a (1986~2005 年)的用水量数据进行分析,农业用水量占全部用水量的 91%,工业用水量占 4%,生活用水量占 5%。总用水量中取用地下水量比例为 35%。由此可见,潮河流域所引用水量大部分是地表水,主要是满足农业灌溉的需求。对流域 1961~2005 年的引用地表水量数据进行分析,结果表明该时段流域的引用地表水量呈现出明显增大的趋势。1961~1970 1971~1980 1981~1990 1991~2000 2001~2005 年,各时段平均年用水量分别为 $0.16\ 0.27\ 0.23\ 0.45\ 0.48 \times 10^8 \text{ m}^3$,占相应各时段平均年径流量的 5.4%, 7.1%, 10.9%, 16.1% 和 46%。

图 1 点绘了潮河流域 1961~2005 年实测年径流量与年用水量的关系,两者之间表现出明显的负相关,这说明随着流域用水量的增加,部分径流被引出河道,使潮河的年径流量减少。

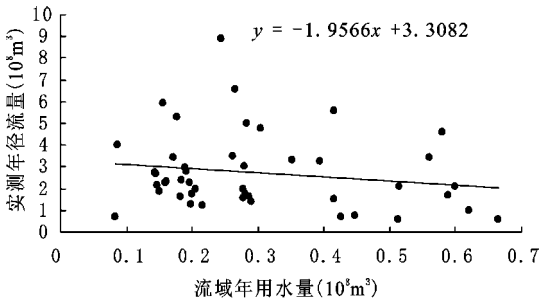


图 1 潮河流域实测年径流量与年用水量的关系
Fig 1 Observed annual runoff versus annual water consumption of the Chao River Basin

3) 流域水土保持的影响。国家和地方政府为防治水土流失、保护密云水库的水质, 20 世纪 80 年代以来, 在潮河流域开展了大规模的水土保持综合治理。1989~ 2000 年期间, 潮河流域被水利部设立为国家级水土保持重点治理区, 流域内实施了大量的水土保持措施; 林业部退耕还林还草政策从 1998 年开始推行; 自 2001 年起, 国家正式启动了“21 世纪初期首都水资源可持续利用规划”项目, 对潮河流域水土流失进行系统监测和重点治理。截至 2005 年底, 流域内累计保存下来的水土保持措施面积为 2 735 69 km²。

图 2 点绘了潮河流域 1961~ 2005 年还原年径流量(实测年径流量与用水量之和)与水土保持措施面积的关系, 两者之间表现出明显的负相关, 这说明随着流域水土保持措施面积的增加, 流域径流量呈减少的趋势。水土保持措施对流域内的降水和径流进行拦蓄, 增加入渗, 截留的降水还部分消耗于蒸散发, 这在一定程度上减少了流域的产水量, 也减少了进入河川的径流量。

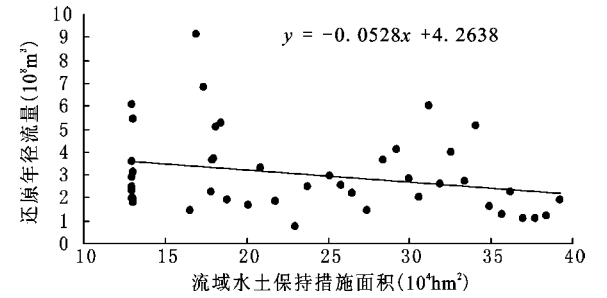


图 2 潮河流域还原年径流量与水土保持措施面积的关系

Fig 2 Restored annual runoff versus areas of soil and water conservation of the Chao River Basin

3 3 降水变化、人类活动与流域年径流量的定量关系

1) 基准期与措施期的划分。为了评价人类活动对流域年径流量的影响, 首先要划分人类活动影响较小的“基准期”和人类活动影响显著的“措施期”, 然后对这两个时期的径流量进行比较。基准期和措施期的划分可通过分析流域径流演变的阶段性而判定。应用 Mann – Kendall 变点检测技术^[14 25]对下会站 45 a(1961~ 2005 年)的实测径流量进行变点分析, 结果发现在 1999 年发生了一次径流突变, 采用该法对 1961~ 1998 年这一时段的资料做进一步的分析, 所得结果表明在 1981 年还

存在一个变点。两变点均通过了置信度 95% 的检验。根据变点分析结果, 潮河流域径流的演化过程可分为三个阶段, 即 1961~ 1980 年、1981~ 1998 年和 1999~ 2005 年。1961~ 1980 年, 流域内水利水保措施较少, 引水影响相对较小。1981~ 1998 年, 流域内实施了大量的水土保持措施, 建成于 20 世纪 70 年代末至 80 年代初的水利工程也开始发挥效益, 流域引水量增加, 这些人类活动因素都会使径流量减少, 造成了流域径流趋势性的改变。1999~ 2005 年, 水利水保措施继续发挥拦蓄径流的作用, 人类大量引水, 加上 1999 年以来连续干旱, 流域内产流量也少, 再次造成流域径流趋势性的改变。

上述分析结果表明, 1981 年以前潮河流域受人类活动的影响相对较小, 故可把 1961~ 1980 年作为基准期, 1981 年以后人类活动的影响显著, 可把 1981~ 2005 年作为措施期。

2) 降水 – 径流经验统计模型的建立及检验。分别对基准期和措施期的年降水量数据、年径流量数据进行曲线拟合分析, 两时期指数函数的复相关系数分别为 0.924 0.803, 显著性水平优于 0.001, 说明两个时期两个变量之间均存在高度显著的指数函数关系。

图 3 点绘了 1961~ 2005 年潮河流域年径流量与年降水量的关系, 并且给出了相应的拟合曲线和回归方程。与 1961~ 1980 年的拟合曲线相比, 1981~ 2005 年的曲线显著下降, 说明在相同的降水条件下, 流域径流量确实减少了。

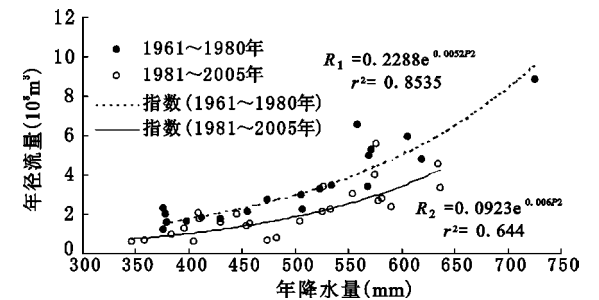


图 3 潮河流域年径流量与年降水量的关系

Fig 3 Annual runoff versus annual precipitation of the Chao River Basin

相应于基准期和措施期的方程分别为:

$$R_1 = 0.2288e^{0.0052P_1} (r^2 = 0.8535) \quad (1)$$

$$R_2 = 0.0923e^{0.006P_2} (r^2 = 0.644) \quad (2)$$

式中, R_1 、 R_2 分别为基准期和措施期的年径流量, 10^8 m^3 ; P_1 、 P_2 分别为基准期和措施期的年降水量, mm 。

3) 不同时段降水变化、人类活动对流域年径流量的影响。基准期的方程相关系数较高, 故可用于估算人类活动对流域年径流量的影响。将措施

期中各年的降水量代入基准期的方程 (1), 可求出假定未受人类活动影响的每一年的径流量, 再减去相应年的实测径流量, 即可得到受人类活动影响的径流减少量 (表 1)。

表 1 人类活动和降水变化对潮河流域年径流量影响的计算结果

Table 1 Calculating results of impacts of human activities and precipitation changes on annual runoff of the Chao River Basin						
时段 (年)	假定只受降水影响	实测年均径流量 (10 ⁸ m ³ /a)	人类活动影响		降水影响	
	时的年均径流量 (10 ⁸ m ³ /a)		减水量	占总减水量	减水量	占总减水量
			(10 ⁸ m ³ /a)	的比例 (%)	(10 ⁸ m ³ /a)	的比例 (%)
1981~ 1990	3. 38	2. 06	1. 32	95. 1	0. 07	4. 9
1991~ 2000	3. 44	2. 77	0. 67	98. 9	0. 01	1. 1
2001~ 2005	2. 50	1. 04	1. 46	60. 7	0. 95	39. 3
1981~ 2005	3. 23	2. 14	1. 09	83. 2	0. 22	16. 8

注: 降水变化导致的减水量系由基准期的流域年平均径流量 $3. 45 \times 10^8 \text{ m}^3$ 减去假定只受降水影响时的径流量而求得。

表 1 可知, 1981~ 1990、1991~ 2000、2001~ 2005 年, 受人类活动影响所产生的年均减水量分别为 1. 32、0. 67、 $1. 46 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占相应时段总减水量的 95. 1%、98. 9% 和 60. 7%; 受降水变化影响所产生的年均减水量分别为 0. 07、0. 01、 $0. 95 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占相应时段总减水量 4. 9%、1. 1% 和 39. 3%。在 1981~ 2005 年整个措施期, 受人类活动的影响和降水变化影响所导致的年均减水量为 1. 09 和 $0. 22 \times 10^8 \text{ m}^3$, 分别占总减水量的 83. 2% 和 16. 8%, 人类活动因素的贡献率远大于降水因素。

4 结论与讨论

潮河流域是北京市的重要水源地。在对将近 45 a 流域降水变化以及修建水利工程、引水、水土保持等人类活动因素进行分析的基础上, 利用降水-径流经验统计模型评估了降水变化和人类活动对流域年径流量的影响程度, 结论如下:

- 1) 利用 Mann- Kendall 秩次相关法对潮河流域 45 a 的降水、径流变化趋势进行检验, 结果表明流域降水量下降的趋势不明显, 但径流量呈显著减少趋势。
- 2) 应用 Mann- Kendall 变点检测技术将潮河流域径流的演化过程分为 1961~ 1980、1981~ 1998 和 1999~ 2005 年 3 个阶段。以 1981 年为转折点, 1961~ 1980 年划为基准期, 1981~ 2005 年划为措施期。
- 3) 1981~ 2005 年, 降水减少和引水、水利水保措施等人类活动使得潮河径流量不断减少, 二者

的贡献率分别为 16. 8% 和 83. 2%。人类活动因素的贡献率远大于降水因素。

参考文献:

[1] 李树德. 再论水资源问题 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2000, 36(6): 799~ 823

[2] 邓伟, 翟金良, 闫敏华. 水空间管理与水资源的可持续性 [J]. 地理科学, 2003, 23(4): 385~ 390

[3] 施雅风. 气候变化对西北华北水资源的影响 [M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1995

[4] World Water Council. World Water Vision 2025 [M]. London: Earthscan Publications Ltd, 2000

[5] 邓慧平, 李秀彬, 张明, 等. 气候与地表覆被变化对梭磨河流域水文影响的分析 [J]. 地理科学, 2001, 21(6): 493~ 497.

[6] 王国庆, 王云璋, 史忠海, 等. 黄河流域水资源未来变化趋势分析 [J]. 地理科学, 2001, 21(5): 396~ 400

[7] 孙力, 安刚, 高枫亭, 等. 中国东北地区地表水资源与气候变化关系的研究 [J]. 地理科学, 2004, 24(1): 42~ 49

[8] Chen Liquan, Liu Changning, Li Yanping, et al. Impacts of climatic factors on runoff coefficients in source regions of the Huanghe River [J]. Chinese Geographical Science, 2007, 17(1): 47~ 55

[9] 何云玲, 张一平, 杨小波. 中国内陆热带地区近 40 年气候变化特征 [J]. 地理科学, 2007, 27(4): 499~ 505

[10] 房巧敏, 龚道溢, 毛睿. 中国近 46 年来冬半年日降水变化特征分析 [J]. 地理科学, 2007, 27(5): 711~ 717

[11] 徐彦伟, 康世昌, 周石砾, 等. 青藏高原纳木错流域夏、秋季大气降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 与水汽来源及温度的关系 [J]. 地理科学, 2007, 27(5): 718~ 723

[12] 李红军, 江志红, 魏文寿. 近 40 年来塔里木河流域旱涝的气候变化 [J]. 地理科学, 2007, 27(6): 801~ 807

[13] 夏军, 刘孟雨, 贾绍凤, 等. 华北地区水资源及水安全问题

的思考与研究 [J]. 自然资源学报, 2004, 19(5): 550~ 560.

[14] 李丽娟, 郑红星. 华北典型河 流年径流演变规律 及其驱动力分析——以潮白河为例 [J]. 地理学报, 2000, 55(3): 309~ 317

[15] 高迎春, 姚治君, 刘宝勤, 等. 密云水库入库径流变化趋势及动因分析 [J]. 地理科学进展, 2002, 21(6): 546~ 553.

[16] 孙 宁, 李秀彬, 冉圣洪, 等. 潮河上游降水 - 径流关系演变及人类活动的影响分析 [J]. 地理科学进展, 2007, 26(5): 41~ 47

[17] 黄锡荃, 李惠明, 金伯欣. 水文学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003 68~ 70.

[18] 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 [J]. 水科学进展, 2003, 15(6): 690~ 695.

[19] 陈江南, 王云璋, 徐建华, 等. 黄土高原水土保持对水资源和泥沙影响评价方法研究 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2004: 211~ 284

[20] 穆兴民, 李 靖, 王 飞, 等. 基于水土保持的流域降水 - 径流统计模型及其应用 [J]. 水利学报, 2004 (5): 122~ 128.

[21] 许炯心. 人类活动和降水变化对嘉陵江流域侵蚀产沙的影响 [J]. 地理科学, 2006, 26(4): 432~ 437

[22] 冉大川, 柳林旺, 赵力仪, 等. 黄河中游河口镇至龙门区间水土保持与水土沙变化 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2000: 130~ 137.

[23] 徐建华, 牛玉国. 水利水保工程对黄河中游多沙粗沙区径流泥沙影响研究 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2000 167~ 233.

[24] 徐海量, 叶 茂, 宋郁东. 塔里木河源流区气候变化和年径流量关系初探 [J]. 地理科学, 2007, 27(2): 119~ 224

[25] 闫敏华, 邓 伟, 陈泮勤. 三江平原气候突变分析 [J]. 地理科学, 2003, 23(6): 661~ 667

Impacts of Precipitation Changes and Human Activities on Annual Runoff of Chao River Basin During Past 45 years

LI Zi-jun¹, LI Xi-bin²

(1 College of Population, Resources and Environment Shandong Normal University, Jinan, Shandong 250014; 2 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Abstract In recent 45 years, the annual runoff of the Chao River Basin has declined significantly with decreasing precipitation and increasing human activities such as hydro projects construction, water diversion and implementation of soil and water conservation. Impacts of precipitation variations and human activities on annual runoff of the Chao River Basin are evaluated quantitatively based on the rainfall-runoff empirical statistical model. The results show: During 1981-1990, 1991-2000, 2001-2005 and 1981-2005, the average annual runoff reduction amounts influenced by human activities are $1.32 \times 10^8 \text{ m}^3$, $0.67 \times 10^8 \text{ m}^3$, $1.46 \times 10^8 \text{ m}^3$ and $1.09 \times 10^8 \text{ m}^3$ respectively, taking up 95.1%, 98.9%, 60.7% and 83.2% of the total runoff reduction amounts of corresponding period; the average annual runoff reduction amounts influenced by precipitation variations are $0.07 \times 10^8 \text{ m}^3$, $0.01 \times 10^8 \text{ m}^3$, $0.95 \times 10^8 \text{ m}^3$ and $0.22 \times 10^8 \text{ m}^3$ respectively, taking up 4.9%, 1.1%, 39.3% and 16.8% of the total runoff reduction amounts of corresponding period accordingly. The contribution rates of human activities to runoff reduction are much higher than that of precipitation variations.

Key words precipitation changes; human activities; annual runoff; rainfall-runoff empirical statistical model; Chao River Basin