

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.04.005

刘晶, 鲍振鑫, 刘翠善, 等. 近20年中国水资源及用水量变化规律与成因分析[J]. 水利水运工程学报, 2019(4): 31-41.
(LIU Jing, BAO Zhenxin, LIU Cuishan, et al. Change law and cause analysis of water resources and water consumption in China in past 20 years[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(4): 31-41. (in Chinese))

近20年中国水资源及用水量变化规律与成因分析

刘 晶^{1,2}, 鲍振鑫^{1,2}, 刘翠善^{1,2}, 王国庆^{1,2}, 刘 悦^{2,3}, 王 婕^{1,2}, 管晓祥^{2,3}

(1. 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; 2. 水利部应对气候变化研究中心, 江苏 南京 210029; 3. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210029)

摘要: 水资源成为制约我国经济社会再发展的主要因素之一。水安全问题已上升到国家安全的战略高度, 特别是近年来水资源短缺等问题加剧了水安全形势。选取我国10个水资源一级区1997—2016年水资源量及用水数据, 借助 Mann-Kendall 法对其进行显著性检验, 采用 Kendall 倾斜度表征各要素时间序列变化特征。从时间和空间尺度上揭示我国水资源及用水量变化特征及规律。分析表明: 近20年我国水资源总量呈不明显减少趋势, 其中北方水资源总量增加不明显, 南方水资源量减少不明显。我国总用水量显著增加, 除农业用水增加不明显外, 其他各行业用水都呈显著增加趋势, 尤其生活用水增加最明显。十大水资源一级区相邻区域水资源总量和总用水量的变化特征表现出相似性, 不同地区变化特征表现出空间异质性。与国际水资源利用领先水平相比, 我国农业节水潜力较大。

关 键 词: 水资源; 用水量; 演变规律; Mann-Kendall 法

中图分类号: TV213.9

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2019)04-0031-11

水资源演变与利用关系人类的生存与发展, 与社会经济发展密切相关。我国水资源总量约为2.8万亿 m^3 , 人均占有量仅为2 300 m^3 , 约为世界平均水平的1/4, 是世界13个人均水资源占有量贫乏国家之一^[1]。年际年内分配不均导致水资源供给可靠性大大降低^[2]; 气候变化和极端气候现象频发使水资源时空分布更加不均^[3], 加之水与人口、土地资源不匹配, 水资源空间分布格局与经济社会发展格局不匹配^[4]等问题, 加剧了我国水安全形势的严峻程度。时空分布不均、水资源利用效率低下、水质污染严重等问题突出^[5], 导致目前我国水资源供需严重不平衡^[6]。在气候变化、产业结构动态调整、最严格水资源管理政策等背景下, 我国水资源状况及用水结构正在发生深刻变化。优化用水结构, 提升用水效率对解决我国水安全问题至关重要。分析近20年我国水资源变化及水资源利用情势, 认识我国水资源及用水变化规律, 检验近20年产业结构调整及水资源管理制度完善的结果, 为预估未来我国水资源演变及利用情势提供有效参考, 对制定我国水资源利用管理政策与保障水安全及可持续发展具有重要意义。

众多学者对水资源演变及用水变化进行了探讨研究。张建云等通过对50年降雨径流资料的分析得出我国北方河川径流呈减少趋势^[7]; 鲍振鑫等在分析海河流域降水历史演变规律基础上, 从大气环流角度揭示降水变化原因, 并根据全球气候模式对未来降水情景进行预测^[8]。李保国等基于“绿水”和“蓝水”概念对中国1998—2007年农业用水进行综合分析, 提出我国粮食作物水分生产力水平已达世界较高水平并建议设立粮食作物用水安全红线^[9]。王玉玉等基于58年的农业用水资料, 研究分析了我国农业用水结构演变历

收稿日期: 2018-09-18

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFA0605002, 2016YFA0601501); 国家自然科学基金资助项目(51779145, 41330854, 41830863)

作者简介: 刘 晶(1997—), 女, 宁夏固原人, 硕士研究生, 主要从事气候变化和水土资源管理相关研究。

E-mail: 1767343058@qq.com 通信作者: 王国庆(E-mail: gqwang@nhri.cn)

程,在预测未来用水结构的基础上提出经济用水量概念^[10]。吴丹对比分析中美水资源利用的演变过程及其对应阶段的经济发展情况,评价了我国水资源与经济发展的“脱钩”态势^[11]。王国庆等通过建立月水文模型,结合气候模型(GCMs),定量提出了气候变化情境下黄河流域水资源未来的演变趋势^[12]。龙秋波等对比分析水资源公报和全国第一次水利普查发布的用水数据,研究了其差异存在的原因,给出了修正后中国 2011 年真实用水情况^[13]。李原园等运用 Manna-Kendall 趋势检验、Morlet 小波分析等方法分析了我国各水资源一级区 1956—2010 年水资源变化趋势和周期等^[14]。杜军凯等通过对 10 年我国各水资源一级区水资源、人口、土地、产值基础资料两两基尼系数的计算和趋势分析得到其时空匹配关系^[15]。潘欢迎等基于 Falkenmark 指数和水压力指数,对 2006—2015 年我国水资源和用水量情况进行基于安全利用角度的分析评价,得出我国存在 50% 的水资源安全压力超载区^[16]。

尽管相关研究丰富且深入,但对水资源一级区及全国尺度年水资源的变化趋势,尤其是用水量变化情势及其规律分析的研究较少。本文基于《中国水资源公报》发布的权威数据,分析了全国及各水资源一级区 1997—2016 年水资源量及用水量的变化过程与趋势。为制定我国水资源管理政策,选择水资源高效利用方案以及为经济社会的可持续发展提供一定的技术参考。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

将全国范围作为研究对象,但未包括港澳台。充分考虑流域分区与行政区域的统分性、组合性和完整性,以指导水资源管理为目标将我国分为十大水资源一级区(图 1),并以此作为研究区域,分析各水资源一级区水资源量以及用水情况近 20 年来的变化规律。

1.2 研究资料

主要数据来源为 1997—2016 年《中国水资源公报》、《中国统计年鉴》和联合国粮农组织 AQUASTAT 数据集。《中国水资源公报》是在省级行政区上报数据基础上,经过检验、合理性分析、修正和汇总后发布的,具有科学性和权威性。使用数据范围包括:1997—2016 年全国和十大水资源一级区水资源量数据和用水量数据(生活、工业、农业、生态)。《中国统计年鉴》收录的上一年全国每年经济和社会各方面的统计数据。联合国粮农组织 AQUASTAT 数据集发布的全球用水数据。

1.3 研究方法

对水资源量及各部门用水序列变化趋势进行特征分析,以及基于该水文要素时空变化规律而制定水资源高效管理政策都具有广泛而深刻的意义。水文序列趋势分析方法包括:线性回归法、Mann-Kendall 法、累积距平法、Spearman 法^[17]和滑动平均法等。由于非参数检验法比参数检验法更适合水文气象时间序列的非正态分布数据的检验,因此采用 Mann-Kendall 趋势检验法对 1997—2016 年 20 年水文数据进行分析。Mann-Kendall 趋势检验法是一种非参数统计方法,因其不受样本值和分布类型及少数异常值等因素的干扰而较为广泛地应用于水文、气象等要素系列呈现的非正态分布领域^[18-21]。该方法可用来判断一个水文序列是否存在显著趋势特征,并分析该水文序列的显著特征是上升还是下降。下面对该方法的原理及计算过程进行简

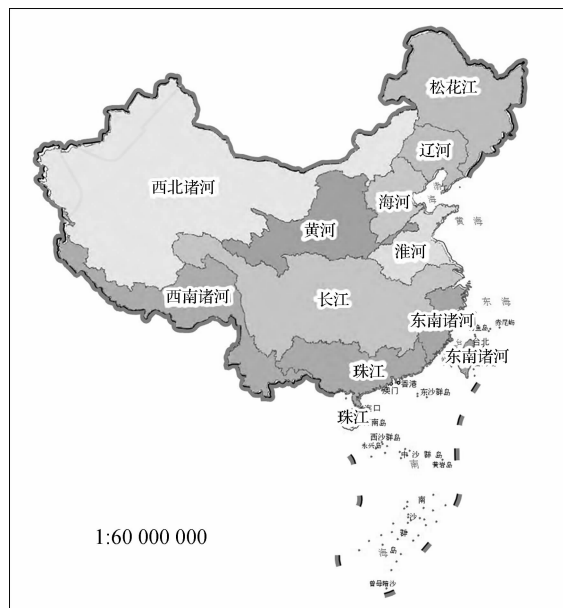


图 1 我国十大水资源一级区分布

Fig. 1 Distribution of ten first-class water resources regions in China

要介绍。

1.3.1 M-K 检验法 Mann-Kendall 假设时间序列为 $X_1, X_2, \dots, X_n$, 其中 n 为时间序列长度, 进行如下统计量的计算:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sng}(x_j - x_i) \quad (1)$$

$$\text{sng}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, & x_j - x_i > 0 \\ 0, & x_j - x_i = 0 \\ -1, & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Mann 等证明, 当 $n \geq 8$ 时, 统计量 S 大致服从正态分布^[22], 其均值为 0, 方差为:

$$\text{var}(S) = [n(n+1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i(i-1)(2i+5)]/18 \quad (3)$$

式中: t_i 是第 i 组数据点的数目。

当 $n > 10$ 时, 标准化统计变量 Z 通过下式计算:

$$Z = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{\text{var}(S)}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ (S+1)/\sqrt{\text{var}(S)}, & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

当 $|Z| \geq Z_{(1-\alpha)/2}$ 时拒绝原假设 H_0 , 即在 α 置信水平上, 时间序列数据存在明显上升或下降趋势, 其中 $Z_{(1-\alpha)/2}$ 为标准正态方差, α 为显著性检验水平。 Z 为正, 序列具有上升或增加趋势, Z 为负, 则序列具有下降或减少趋势^[23]。 根据经验, 取显著性水平 $\alpha = 5\%$, 即当 $|Z| \geq 1.96$ 时, 表明该序列通过了 5% 置信水平的显著性检验, 表示序列在 5% 置信水平上, 呈显著增加或减少趋势, 反之具有不显著增加或下降趋势。 本次分析均采用 $|Z| = 1.96$ 作为序列变化是否显著的阈值, 后文不再赘述。

1.3.2 Theil-Sen 斜率估计 Theil-Sen's 是一种基于中值估计系列趋势的非参数估计法, 被广泛应用在气象水文时间序列的趋势判断中。 该方法通过计算 Kendall 倾斜度 β 值, 得到趋势大小的无偏估计值, 表征一个序列整体的变化程度。 β 值越大说明该序列变化程度越大。 拟采用 β 值表征各时间序列变化程度, 作为 M-K 趋势检验和显著性结果的有效补充。 从一个序列是否有显著变化趋势以及其整体变化程度两个角度反应该序列变化情况。 β 可通过下式计算:

$$\beta = \text{Median} |(x_i - x_j)/(i - j)|, \forall j < i \quad (5)$$

式中: Median 表示中位数函数, x_i 和 x_j 分别表示序列值, i 和 j 分别表示序列所对应的时间, 其中 $1 < j < i < n$ 。 β 是该时间序列中所有组合相邻变化率的中值, 即可消除序列中个别极值对估算结果的影响, 从而得到该序列变化程度大小。 $\beta > 0$ 时, 序列有上升趋势, 反之则有下降^[24], $|\beta|$ 值越大表明序列上升或下降程度越大。

2 结果与讨论

2.1 我国水资源的变化

从时间角度对全国、南北方及十大水资源一级区近 20 年水资源总量的变化过程进行分析(见图 2)。

图 2 表明: ① 从全国尺度看, 我国近 20 年水资源总体呈波动变化, 1998 年和 2012 年全国水资源总量出现陡增, 增幅分别为 22.12% 和 26.96%, 2011 年总量突降 24.75%, 在 2014 年之后持续攀升, 全国水资源总量波动与南方水资源波动表现出高度一致性。 ② 从水资源一级区尺度看, 长江区水资源总量波动最剧烈, 珠江区和松花江区波动幅度也较大, 其中长江区在 1998 年和 2012 年水资源总量的陡增现象与全国变化情况高度一致。 经分析表明, 这两个年份全国水资源总量的异常增长与长江区水资源量的突然增加密切相关。

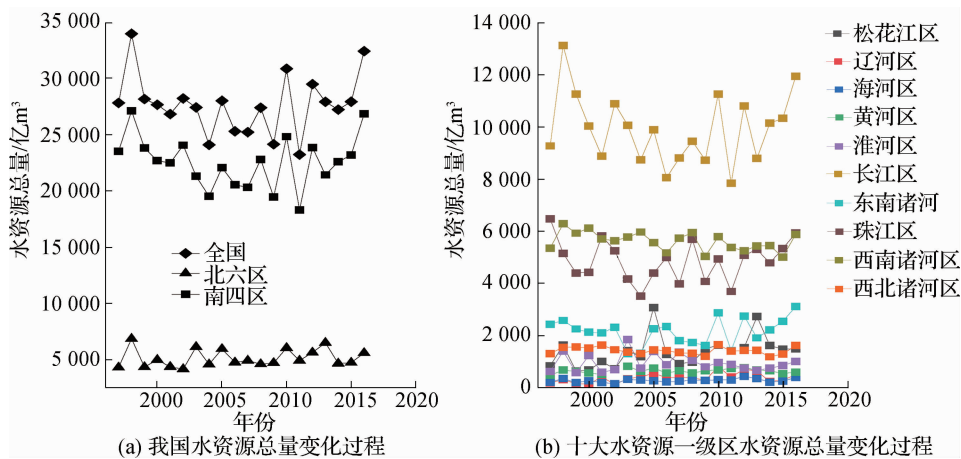


图 2 全国及水资源一级区水资源总量 1997—2016 年变化过程
Fig. 2 Time series of total changes in water resources in China (1997—2016)

空间上,利用非参数检验法(Mann-Kendall)法得到的 Z 值分析各水资源一级区时间序列变化趋势;同时用参数检验法得到的 β 值对其结果进行相互补充,反应各区水资源总量变化情况的时空异质性,如图 3。

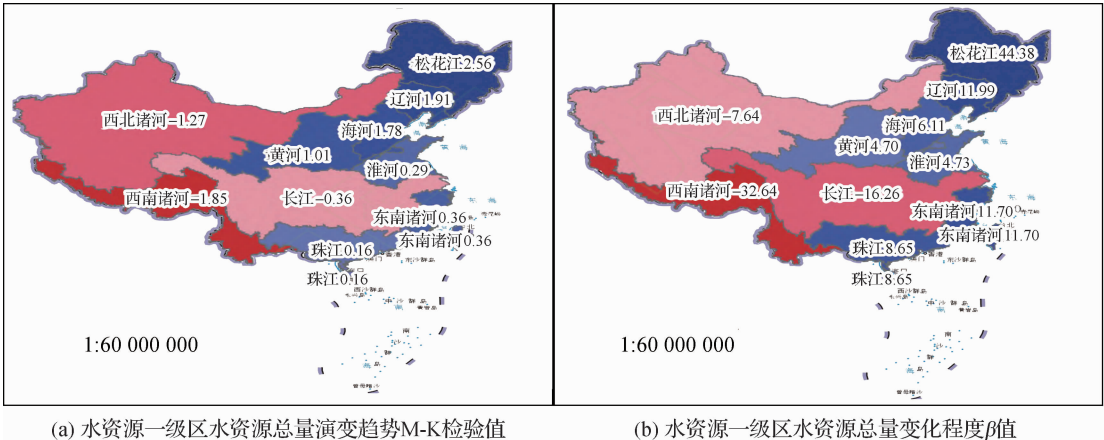


图 3 全国水资源一级区水资源总量演变
Fig. 3 Total change trend of water resources in first-class water resources regions

从两种方法的检验结果看,近 20 年我国水资源总量总体上呈现下降趋势,但未通过 5% 置信水平下的显著性检验。其中,北方地区水资源表现出增加趋势,南方地区表现出减少趋势,南北方水资源序列均未通过 5% 置信水平的显著性检验。由图 3 可见我国各水资源一级区水资源总量的变化情况,其中东北及东南大部分地区近 20 年水资源总量有增加趋势。西南诸河区、长江区和西北诸河区水资源量有减少趋势,西南诸河区减少最明显。M-K 检验值 Z 与 Kendall 倾斜度 β 所表达的信息具有较高一致性。由 M-K 检验得知我国松花江区通过显著性检验,水资源总量呈显著增加趋势,与它临近的辽河区和海河区水资源总量增加趋势也较为显著。黄河区、淮河区、东南诸河区和珠江区 Z 值较小,水资源总量有上升趋势,但未通过 5% 置信水平的显著性检验。东南诸河与珠江区的 Kendall 倾斜度 β 较大,即这两区近 20 年水资源总量变化程度较大。

2.2 我国用水结构的演变

随着社会发展,产业结构调整,1997—2016 年我国包括各行业总用水量和用水结构在内的用水情况发生了深刻变化。其中,用水结构指各用水行业分别占总用水量的比值。从时间上,分析我国各用水行业近 20 年用水量与用水结构变化如图 4。

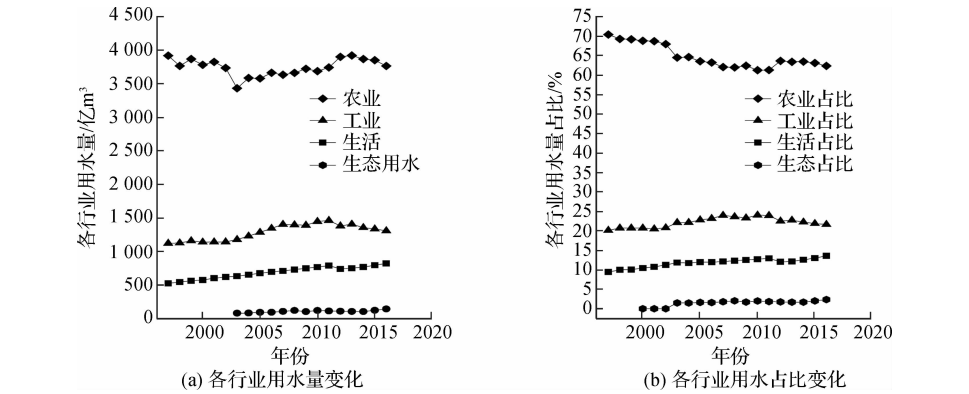


图4 我国1997—2016年用水变化

Fig. 4 Time series of changes in water consumption in China from 1997 to 2017

由图4可见,从用水量变化过程看,我国总用水量在2003年之后总体上缓慢上升,从5 566.03 亿 m³ 上升到6 038.20 亿 m³;农业用水量近20年减少3.92%,其演变过程与水资源总量演变过程具有高度一致性,都在2001—2003年明显下降,此后缓慢上升;工业用水近20年增幅为16.66%,2007年以前平稳增加,此后增幅减缓,2013年之后逐渐下降;生活用水近20年增加56.45%,总体较为平稳地增加,无明显起伏;生态用水从2003年我国将生态用水纳入水资源统计范畴后开始有数据,到2016年增至142.60 亿 m³,相较于其他部门生态用水量非常少,且在低水平保持增长。从用水结构变化过程看,近20年我国农业用水占比从70.42%降到62.37%,工业用水占比增加了1.52%,在2010年之前保持较为平稳的增加趋势,之后开始下降,生活用水占比平稳增加4.18%,生态用水占比从低水平缓慢上升到2.36%。

在分析用水量时间变化规律的基础上,从空间尺度上研究我国各水资源一级区近20年各部门用水量的变化情况,各行业用水量演变趋势及变化程度分别见图5和图6。

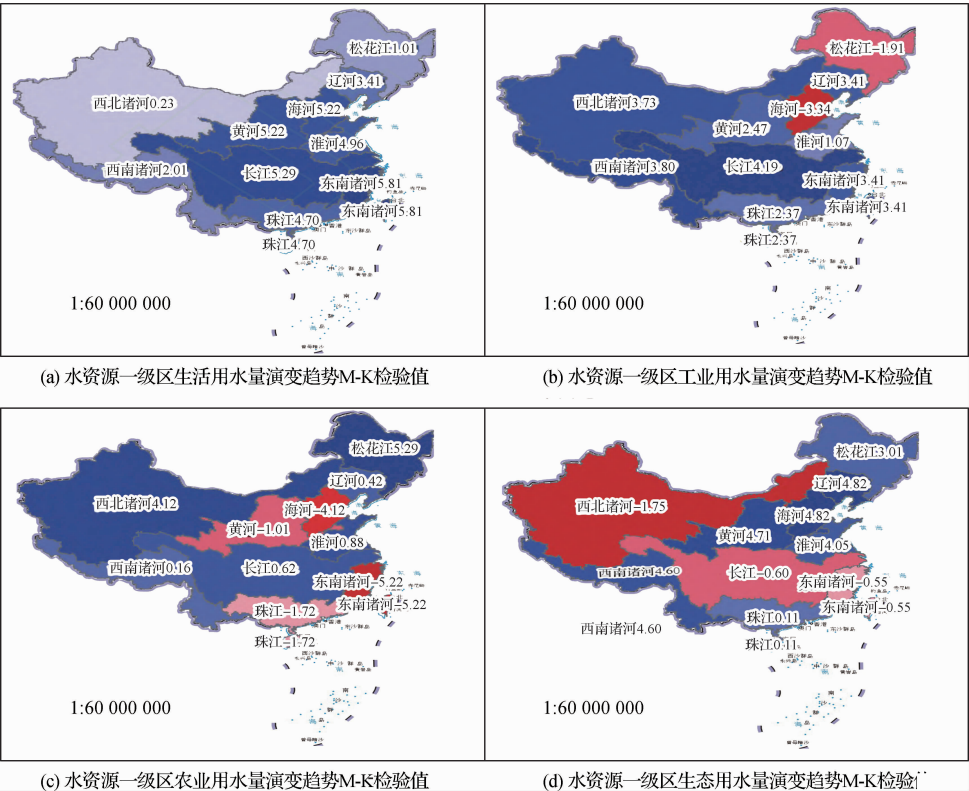


图5 各行业用水量演变趋势 M-K 检验

Fig. 5 Trend of water consumption of various industries and M-K tests

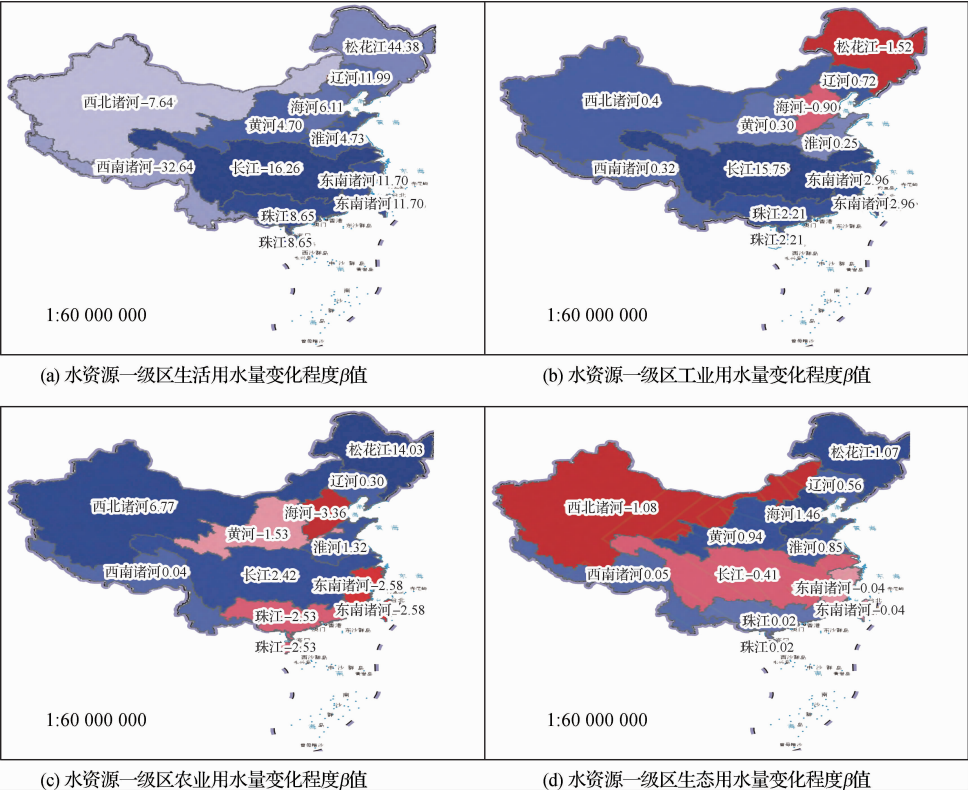


图 6 各行业用水量变化程度 β 值

Fig. 6 Values of β of various industries

总体上,近 20 年我国总用水量显著增加($Z=4.32$),除农业用水增加不明显外($Z=0.49$),其他各行业用水都显著增加,以生活用水增加最为显著($Z=5.74$)。从图 5 可见,生活用水除内陆河片区呈微弱增加趋势外,其他水资源一级区生活用水都显著增加,以东南诸河流域最为显著($Z=5.81$)。包括珠江区、东南诸河区、长江区在内的东南部总体生活用水 Kendall 倾斜度 β 和 M-K 检验值都较大,即这些区的生活用水变化幅度较大并有较明显的增加趋势。长江区和珠江区生活用水 β 值最大,分别为 6.45 亿 m^3/a 和 3.66 亿 m^3/a ,即这两区每年生活用水总体增加 6.45 亿 m^3 和 3.66 亿 m^3 ,这与其经济发展较快,生活用水变化幅度较大有关。西部地区生活用水 β 值都较小,其中内陆河片和西南诸河区 β 值最小,分别约为 0.02 亿 m^3/a 和 0.12 亿 m^3/a 。工业用水方面,除淮河区、海河区和松花江区外,其他水资源一级区都显著增加,其中海河区工业用水显著减少($Z=-3.34$),但序列整体变化幅度不大($\beta=-0.90$ 亿 m^3/a),松花江区减少趋势不明显($Z=-1.91$)。东南部工业用水的 β 值都较大,说明该区工业用水整体变化幅度较大。农业用水方面,我国松花江区和内陆河片区用水显著增加,其 β 值也最大,平均每年分别增加 14.03 亿 m^3 和 6.77 亿 m^3 ,即这两区农业用水有显著增加趋势,且整体变化幅度较大。海河区和东南诸河区农业用水显著减少($Z=-4.12$, $Z=-5.22$),每年分别减少 3.35 亿 m^3 和 2.58 亿 m^3 。黄河区和珠江区的农业用水也呈减少趋势,但未通过置信水平 5% 的显著性检验;辽河区、淮河区、长江区、西南诸河区农业用水都呈微弱增加趋势。生态用水方面,我国北方除内陆河区($Z=-1.75$)减少不明显外,其他各区呈显著增加趋势,以辽河区和海河区增加趋势最为显著,海河区生态用水 Kendall 倾斜度最大($\beta=1.46$)。南方四区中长江区和东南诸河区生态用水减少不明显,珠江区增加不明显,西南诸河区通过 5% 置信水平的显著性检验,呈显著增加趋势($Z=4.60$)。

总体而言,北方用水总量增加不明显($Z=1.46$),南方地区增加明显($Z=4.44$)。十大水资源一级区除海河区($Z=-3.28$)外都有增加趋势,其中除黄河区外其他都显著增加。近 20 年我国北方农业用水量微增,南方农业用水量微减。生态用水方面,除内陆河区、长江区和东南诸河呈减少趋势外,我国大部分地区生态用水量显著增加,以辽河区和海河区增加最为显著。内陆河片区近 20 年农业用水量增加显著,而生态

用水量有所减少,生活用水量增幅也在十大水资源一级区中最小。松花江区农业用水明显增加而工业用水明显减少;海河区生态用水明显增加而农业用水明显减少;东南诸河区生活用水增加趋势非常显著而农业用水减少也非常显著。

2.3 我国用水变化成因分析

分析我国近 20 年用水变化成因,拟采用线性回归法,对生活用水、农业用水和工业用水分别选取 2 个主要影响指标。计算其指标时间变化序列的可决系数 R^2 ,作为反映变量之间相关关系大小的统计量,进而分析我国近 20 年各部门用水变化的主要驱动因子。

选取人均用水量和人口作为生活用水的两个主要指标,分析生活用水变化成因以及生活用水显著增加的主要驱动因子(图 7)。结果显示,1997—2016 年我国人均用水量减少 $20\text{ m}^3/\text{人}$,特别是从 2013 年我国加强节水体系建设以来人均用水量保持逐年下降,而人口总量增长 11.85%。人均用水量与生活用水量的可决系数 $R^2=0.16$,年末人口与生活用水的可决系数 $R^2=0.39$,易得年末人口数与生活用水变化的关系更大,即年末人口的增加是我国近 20 年生活用水显著增加的主要原因。

本文采用的农业用水数据统计口径包括农林牧副渔用水数据。因分析其演变成因所需指标较多,根据数据的可获得性,选取灌区有效灌溉面积和农田亩均灌溉量分析其变化成因(图 8)。灌区有效灌溉面积波动增加 5.15 倍,农田亩均灌溉量波动减少 22.76%。根据线性回归法得到两个指标与我国农业用水量的相关系数都较小,其中,灌区有效灌溉面积可决系数 $R^2=0.03$ 相对较大。表明两个指标与农业用水变化的线性相关性都较弱,灌区有效灌溉面积的相关程度稍高。此处灌溉指标无法综合反映农业用水的变化,需进一步选取相关指标分析,限于篇幅故不做进一步分析。

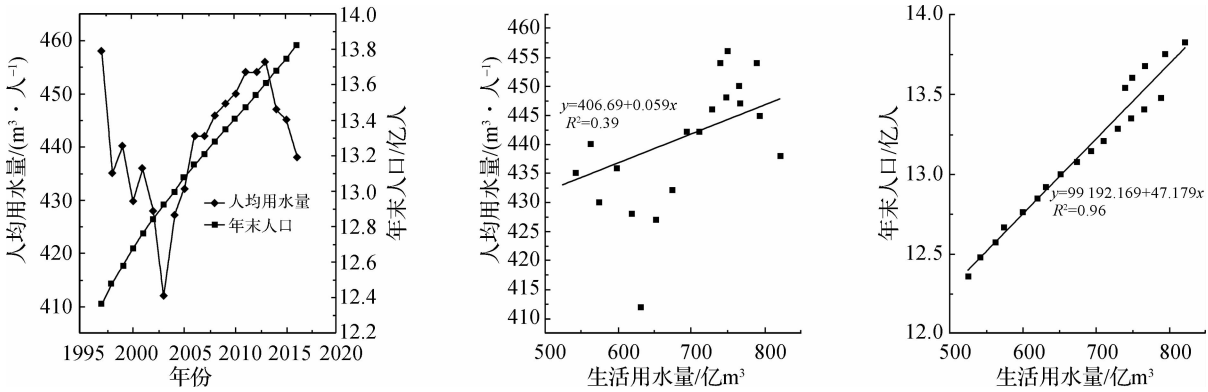


图 7 我国 1997—2016 年生活用水变化成因分析

Fig. 7 Cause analysis of changes in domestic water consumption in China from 1996 to 2017

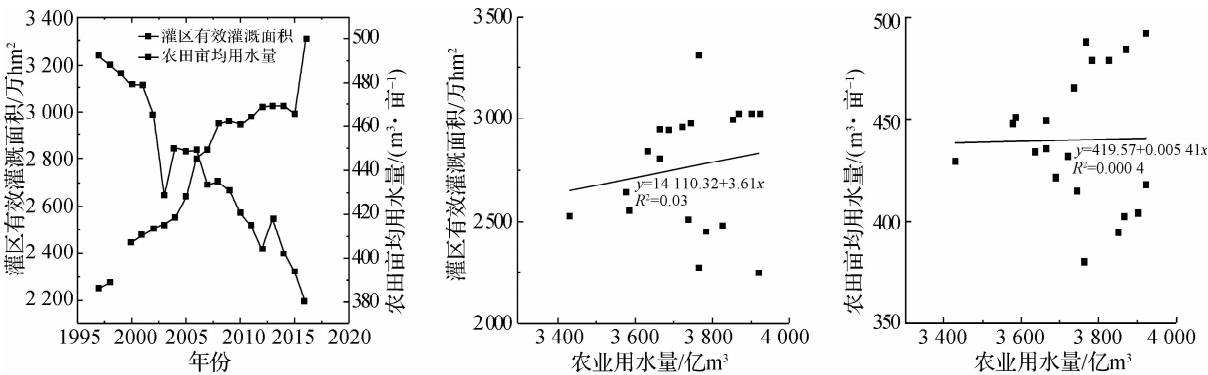


图 8 我国 1997—2016 年农业用水变化成因分析

Fig. 8 Cause analysis of changes in agricultural water consumption in China from 1996 to 2017

工业用水主要选取工业增加值和万元工业增加值两个主要指标来分析我国工业用水显著增加的主要驱动因子。从图 9 可见,万元工业增加值减少 48.54%,工业增加值增长 6.8 倍,工业增加值和万元工业增加值用水量与工业用水量的相关系数分别为 0.59 和 0.81。万元工业增加值用水量的变化与我国近 20 年工业用水量的变化关系更密切,若想减少工业用水,需进一步改进工业节水工艺,提高其节水效率。

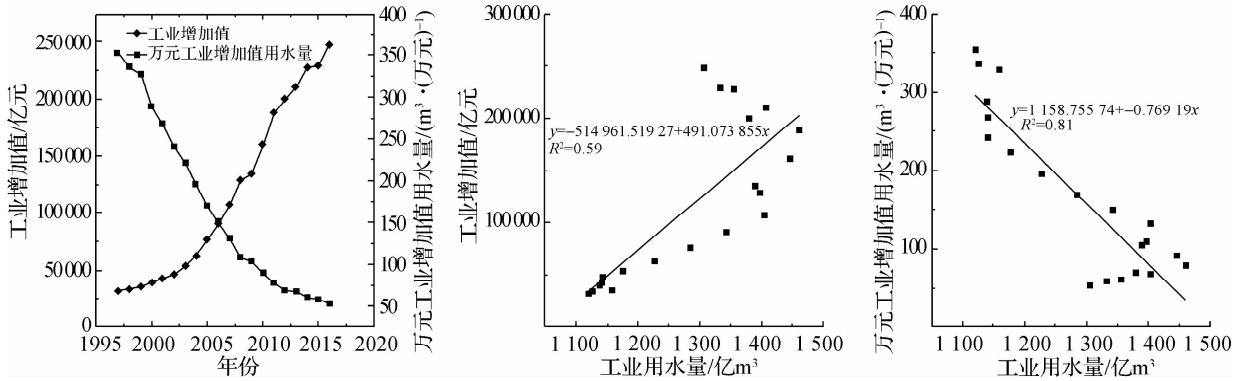


图 9 我国 1997—2016 年工业用水变化成因分析

Fig. 9 Cause analysis of changes in industrial water consumption in China from 1996 to 2017

根据 FAO 发布数据,为保证统计口径一致,选取万美元 GDP 用水量、万美元增加值用水量和灌溉水利用率 3 个指标,将我国与国际先进水平和世界平均水平用水效率对比见图 10。

万美元 GDP 用水量反应总用水效率,从图 10 可知,我国与世界平均水平相差约 487 m³,与用水效率较高的以色列相差 10 倍以上。总体上,我国用水效率与国际先进水平相比还有很大提升空间。工业用水效率略低于世界平均水平,但相差不大,但比工业产值同样较高的美国高。我国灌溉水利用率仅有 46%,而美国已达 54%,以色列更是达到 87%,与国际先进水平相比还有较大差距。而我国农业用水占比超过六成,因此相比于工业用水和生活用水我国农业用水节水空间更大。

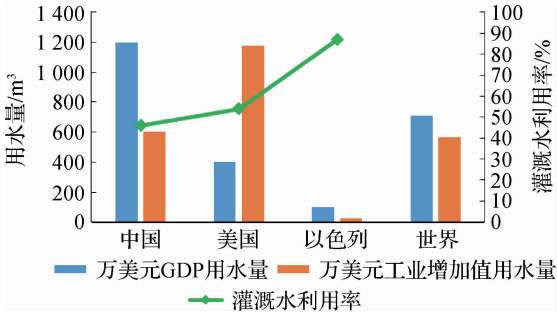


图 10 国际用水效率对比

Fig. 10 International comparison of water efficiency

1997—2016 年我国水资源和用水情况都发生了深刻变化。基于对近 20 年全国及各水资源一级区水资源数据和用水数据的分析,得到以下几点认识与结论:

3 结 语

1997—2016 年我国水资源和用水情况都发生了深刻变化。基于对近 20 年全国及各水资源一级区水资源数据和用水数据的分析,得到以下几点认识与结论:

- (1) 近 20 年,我国水资源总量呈不显著减少趋势,其中北方地区水资源总量增加趋势不明显,而南方地区则减少趋势不明显。
- (2) 通过对用水演变分析得知,近 20 年全国除工业用水增加不明显外,生活用水、工业用水和生态用水都显著增加,其中生活用水增加最为显著。
- (3) 工业用水除海河区显著减少,松花江区微弱减少外,我国大部分地区工业用水均呈显著上升趋势。
- (4) 农业用水占比明显下降,其中北方农业用水微增,南方农业用水微减。
- (5) 生态用水除内陆河区、长江区和东南诸河区呈减少趋势外,其他水资源一级区生态用水都呈增加趋势。

(6) 十大水资源一级区相邻区域水资源总量和总用水量的变化特征表现出相似性。

(7) 基于过去20年我国用水变化成因的分析,结果表明年末人口的增加是我国近20年生活用水显著增加的主要原因,而万元工业增加值用水量变化与我国近20年工业用水量变化的相关关系更大。

(8) 与世界上用水效率较高的国家相比,未来我国农业用水节水空间最大,需通过发展节水灌溉等措施进一步提高用水效率。

参 考 文 献:

- [1] 张利平,夏军,胡志芳. 中国水资源状况与水资源安全问题分析[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(2): 116-120. (ZHANG Liping, XIA Jun, HU Zhifang. Situation and problem analysis of water resource security in China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(2): 116-120. (in Chinese))
- [2] 刘昌明. 二十一世纪中国水资源若干问题的讨论[J]. 水利水电技术, 2002, 33(1): 15-19. (LIU Changming. Discussion on water resources in China in the 21st century[J]. Water Conservancy and Hydropower Technology, 2002, 33(1): 15-19. (in Chinese))
- [3] 任国玉,姜彤,李维京,等. 气候变化对中国水资源情势影响综合分析[J]. 水科学进展, 2008, 19(6): 772-779. (REN Guoyu, JIANG Tong, LI Weijing, et al. An integrated assessment of climate change on China's water resources[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(6): 772-779. (in Chinese))
- [4] 周斌. 国家重点研发计划“水资源高效开发利用”重点专项解析[J]. 水科学进展, 2017, 28(3): 472-478. (ZHOU Bin. Analysis of National Key R&D Program of China “high-efficient development and utilization of water resource”[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(3): 472-478. (in Chinese))
- [5] 钱正英. 中国可持续发展水资源战略研究综合报告[C]//中国水利学会. 中国水利学会2001学术年会论文集, 2001: 16. (QIAN Zhengying. Comprehensive report on China's water resources strategy for sustainable development[C]// Chinese Hydraulic Engineering Society. Chinese Hydraulic Engineering Society Symposium 2001, 2001: 16. (in Chinese))
- [6] 夏军,翟金良,占车生. 我国水资源研究与发展的若干思考[J]. 地球科学进展, 2011, 26(9): 905-915. (XIA Jun, ZHAI Jinliang, ZHAN Chesheng. Some reflections on the research and of development water resources in China[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(9): 905-915. (in Chinese))
- [7] 张建云,贺瑞敏,齐晶,等. 关于中国北方水资源问题的再认识[J]. 水科学进展, 2013, 24(3): 303-310. (ZHANG Jianyun, HE Ruimin, QI Jing, et al. A new perspective on water issues in North China[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(3): 303-310. (in Chinese))
- [8] 鲍振鑫,张建云,严小林,等. 海河流域60年降水量的变化及未来情景分析[J]. 水利水运工程学报, 2014(5): 8-13. (BAO Zhenxin, ZHANG Jianyun, YAN Xiaolin, et al. Analysis of precipitation in the Haihe River basin during the last decades of years and future scenarios[J]. Hydro-Science and Engineering, 2014(5): 8-13. (in Chinese))
- [9] 李保国,黄峰. 1998~2007年中国农业用水分析[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 575-583. (LI Baoguo, HUANG Feng. Trends in China's agricultural water use during recent decade using the green and blue water approach[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(4): 575-583. (in Chinese))
- [10] 王玉宝,吴普特,赵西宁,等. 我国农业用水结构演变态势分析[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(2): 399-404. (WANG Yubao, WU Pute, ZHAO Xining, et al. Development tendency of agricultural water structure in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(2): 399-404. (in Chinese))
- [11] 吴丹. 中国经济发展与水资源利用的演变态势、“脱钩”评价与机理分析——以中美对比分析为例[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2016, 18(1): 47-53, 90-91. (WU Dan. An analysis of evolution trend and decoupling evaluation mechanism of economic development and water resource utilization in China based on comparative analysis of China and America [J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences), 2016, 18(1): 47-53, 90-91. (in Chinese))
- [12] 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]. 地理学报, 2001, 21(5): 396-400. (WANG Guoqing, WANG Yunzhang, SHI Zhonghai, et al. Analysis on water resources variation tendency in the Yellow River[J]. Scientia Geographica Sinica, 2001, 21(5): 396-400. (in Chinese))

- [13] 龙秋波, 贾绍凤, 汪党猷. 中国用水数据统计差异分析[J]. 资源科学, 2016, 38(2): 248-254. (LONG Qiubo, JIA Shaofeng, WANG Dangxian. Disparity in China's water use statistics [J]. Resources Science, 2016, 38(2): 248-254. (in Chinese))
- [14] 李原园, 曹建廷, 沈福新, 等. 1956~2010 年中国可更新水资源量的变化[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(9): 2030-2038. (LI Yuanyuan, CAO Jianting, SHEN Fuxin, et al. Changes in renewable water resources in China, 1956-2010 [J]. Science China: Earth Science, 2014, 44(9): 2030-2038. (in Chinese))
- [15] 杜军凯, 李晓星, 贾仰文, 等. 基于基尼系数法的全国十大水资源一级区水资源与经济社会要素时空匹配分析[J]. 水利科技与经济, 2018, 24(6): 1-8. (DU Junkai, LI Xiaoxing, JIA Yangwen, et al. Temporal and spatial matching analysis of water and socio-economic resources of ten first-class water resources regions in China based on Gini coefficient method [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2018, 24(6): 1-8. (in Chinese))
- [16] 潘欢迎, 付泳琪. 基于水压力指数的水资源利用状况评估[J]. 中国农村水利水电, 2018(4): 53-56. (PAN Huanying, FU Yongqi. An evaluation of the utilization of water resources based on water stress indicator [J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(4): 53-56. (in Chinese))
- [17] 崔翠, 刘勇, 朱晓庆, 等. 深圳市近 57 年来降水时空演变特征分析[J]. 水利水运工程学报, 2018(3): 24-31. (LUO Cui, LIU Yong, ZHU Xiaoqing, et al. Tempo-spatial changes of precipitation of Shenzhen in last 57 years [J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(3): 24-31. (in Chinese))
- [18] 郭志辉. 松辽流域水资源综合评价及水资源演变规律研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2011. (GUO Zhihui. Comprehensive evaluation and evolution trend of water resource in SongLiao basin [J]. Handan: Hebei University of Engineering, 2011. (in Chinese))
- [19] KENDALL M G, STUART A. The advanced theory of statistics. Vol. 2: Inference and relationship[M]. London: Charles Griffin, 1973.
- [20] 于延胜, 陈兴伟. 基于 Mann-Kendall 法的水文序列趋势成分比重研究[J]. 自然资源学报, 2011, 26(9): 1585-1591. (YU Yansheng, CHEN Xingwei. Study on the percentage of trend component in a hydrological time series based on Mann-Kendall method [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(9): 1585-1591. (in Chinese))
- [21] SHENG Y, PILON P, CAVADIAS G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series[J]. Journal of Hydrology, 2002, 259(1): 254-271.
- [22] HAMED K H. Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis[J]. Journal of Hydrology, 2008, 349(3-4): 350-363.
- [23] 曹永强, 李晓瑞. 河北省汛期降水集中度和集中中期时空特征分析[J]. 水利水运工程学报, 2018(4): 96-105. (CAO Yongqiang, LI Xiaorui. Temporal and spatial characteristics of precipitation concentration degree and concentration period in flood season in Hebei province [J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(4): 96-105. (in Chinese))
- [24] LIU X R, SHEN Y J, GUO Y, et al. Modeling demand/supply of water resources in the arid region of northwestern China during the late 1980s to 2010[J]. Journal of Geographical Sciences, 2015, 25(5): 573-591.

Change law and cause analysis of water resources and water consumption in China in past 20 years

LIU Jing^{1,2}, BAO Zhenxin^{1,2}, LIU Cuishan^{1,2}, WANG Guoqing^{1,2}, LIU Yue^{2,3}, WANG Jie^{1,2}, GUAN Xiaoxiang^{2,3}

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

Abstract: The water resources have become one of the main factors restricting the economic and social development of our country. The water safety has become one of the strategic issues of the national security, and especially in recent years, the shortage of the water resources and other related issues have aggravated the situation of the water safety. Based on the data of the water resources and water consumption from the ten first-class water resources regions in China from 1997 to 2016, the Mann-Kendall and Theil-Sen testing methods are used to test the significance of the data. The Kendall-gradient is used to characterize the time series variation characteristics of each factor. The characteristics and regularities of the water resources and water consumption change in China are revealed on the space-time scales. The analysis results indicate that the total amount of the water resources in China has not decreased significantly in the past 20 years. The total amount of the water resources in the northern China has not increased significantly, and the total amount of the water resources in the southern China has not decreased significantly. China's total water consumption has increased significantly. Except the increase of agricultural water consumption is not obvious, the water consumption of other industries has shown a significant growth trend, especially the increase of the domestic water consumption is the most obvious. The change characteristics of the total amount of the water resources in the adjacent regions of the ten first-class water resources regions are similar, and the change characteristics in different regions show special heterogeneity. Compared with the leading level of the water resources utilization in the developed countries, China's agricultural water-saving potential is great.

Key words: water resources; water consumption; trend; Mann-Kendall test method