

1961-2010年中国十大流域水分盈亏量时空变化特征

高 歌^{1,2}, 许崇育³

- (1. 中国气象局气候研究开放实验室 国家气候中心, 北京 100081;
2. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044;
3. 武汉大学水资源与水电工程国家重点实验室, 武汉 430072)

摘要: 采用线性回归方法和Mann-Kendall方法对1961-2010年中国和十大流域水分盈亏量的气候及变化趋势特征进行分析,并对各流域年水分盈亏量变化成因进行探讨。结果表明:①中国多年平均年水分盈亏量(1961-2010年平均)为负值,水分条件表现为亏缺。空间分布总体呈现南方盈余,向北向西水分亏缺态势。②中国水分盈亏量月变化特征表现为夏季6-8月有盈余,7月盈余量最大;其余各月为亏缺,4月亏缺量最大,十大流域月变化特征各有不同。③1961-2010年,中国年水分亏缺量呈现多一少一多变化态势,1990s亏缺量为近50年来最少。2000s中国水分亏缺量较常年偏多,主要是由于大多数流域水分亏缺量偏多或盈余量偏少造成的。④近50年来,全国平均年和春夏冬三季水分盈亏量呈现增加趋势,秋季减少趋势显著。⑤松花江、辽河、海河、黄河流域及西南诸河年水分盈亏量呈现减少趋势,除西南诸河是由于年降水量增加速率小于蒸散量增加速率导致其减少趋势外,其它四个流域则是由于年降水量减少速率大于潜在蒸散量减少速率,年降水量减少变化趋势起主要作用;其余流域年水分盈亏量呈现增加趋势,淮河和长江流域主要是因为潜在蒸散量减少速率大于降水的减少速率,潜在蒸散量的减少变化趋势起主要作用,东南诸河、西北诸河、珠江流域由于年降水量增加、潜在蒸散量减少,二者均对水分盈亏量增加有利。

关键词: 水分盈亏;十大流域;变化趋势;中国

DOI: 10.11821/dlxb201503003

1 引言

干与湿是气候区划的重要依据,气候干湿状况及其变化对粮食生产、作物布局规划、排灌措施制定、水利工程建设、水资源开发利用、生态环境保护等方面来讲具有广泛的应用价值和重要意义。表示干湿状况的气候指标有降水、湿润度或干燥度、水分盈亏量等^[1-4],水分盈亏量综合考虑了降水和蒸发的共同作用,且能够反映一地水量收支大小,进而了解气候干湿状况。基于此量值提出的标准化降水蒸散指数(SPEI)^[5],也在近些年干旱监测评估、干旱变化趋势分析^[6]中得到了广泛的应用。

对中国近几十年来的降水、蒸发力或潜在蒸发量的变化已有了较多研究^[7-11],但水分盈亏时空变化特征仅在部分流域和地区开展过,如:孙力^[4]、张淑杰^[12]、曾丽红^[13]等分别对过去几十年东北地区生长季干湿状况变化及趋势、年和四季水分盈亏量空间格局及变化趋势进行探讨,东北大部分地区水分盈亏量呈现下降趋势;曾燕等^[14]、姚晓军等^[15]对

收稿日期: 2014-09-16; 修订日期: 2015-01-04

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2012CB955903); 公益性行业(气象)专项(GYHY201106018) [Foundation: National Basic Research Program of China, No.2012CB955903; Special Fund for Meteorological Scientific Research in the Public Interest, No.GYHY201106018]

作者简介: 高歌(1972-), 女, 正研级高工, 主要从事气象灾害评估及气候影响评价工作。E-mail: gaoge@cma.gov.cn

西北地区、邵晓梅等^[16]、史建国等^[17]对黄河流域水分盈亏进行分析;李鹏飞等^[18]对中国近50年干旱半干旱地区生长季水分亏缺量进行分析,西北地区降水量增加,潜在蒸散量减少,干旱化程度在减轻,且变化十分显著,而东部干旱半干旱区降水量减少,潜在蒸散量增加,干旱化严重。总体来讲,目前,全国性的水分盈亏时空变化特征和规律还不是很清楚,尤其是气候变暖背景下,各流域水分盈亏量的变化趋势及成因,需要进一步的深入研究和分析。

因此,本文通过对水分盈亏量的气候统计分析,旨在揭示中国水分盈亏量的气候时空分布特征,以及中国和十大流域近几十年的年和四季水分盈亏量的变化趋势规律,并结合降水、潜在蒸散量的变化趋势,试图解释水分盈亏量变化的主要原因。

2 资料与方法

2.1 资料

本文采用中国气象局中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>)提供的全国743个站1961-2010年的月平均气温、平均最高气温、平均最低气温、平均相对湿度、平均风速、月日照时数、月降水量等气候要素站点观测资料进行分析,站点分布及十大流域(即中国水资源一级区)^[19]的划分(图1)。

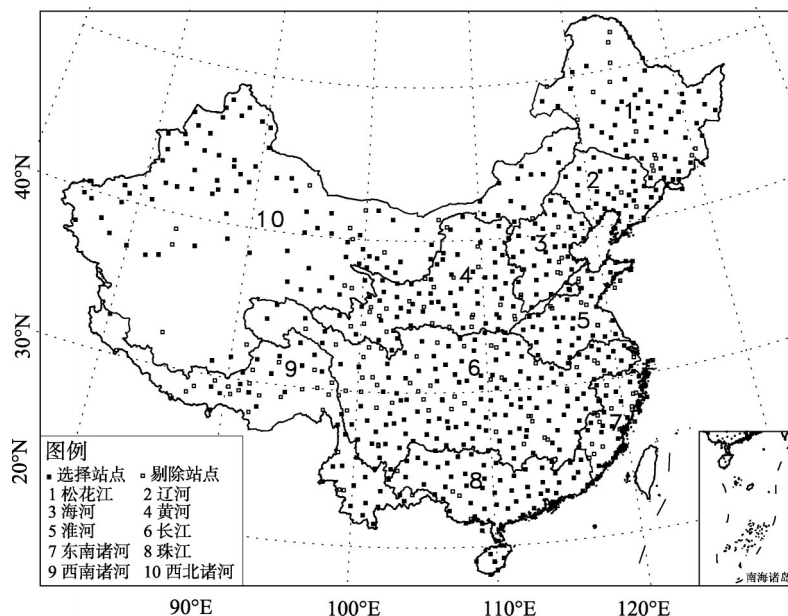


图1 中国743个气象观测站点分布及十大流域图

Fig. 1 Distribution of 743 meteorological stations and 10 major river basins in China

2.2 水分盈亏量和潜在蒸散量的计算

水分盈亏量为降水量和蒸发力(潜在蒸散量)的差。当水分盈亏量大于0时,水分有盈余,表示气候湿润;当其小于0时,水分处于亏缺状态,表示气候干燥;当其等于0时,表示水分收支平衡。量值大小反映水分盈亏程度及气候的干湿程度。

蒸发力的估算有多种方法^[1, 4, 14],主要依赖于可获取气象要素资料的情况。其变化决定于参与计算的各要素的变化及其共同作用,因此不同的方法,导致变化趋势分析会有较大差别,有些区域甚至相反^[20],进而影响水分盈亏的变化趋势估计。本文采用FAO推荐的彭曼-孟蒂斯(Penman-Monteith)方法^[21]计算潜在蒸散量。潜在蒸散量是指假设平坦地面被特定矮杆绿色作物(高0.12 m,地面反射率为0.23)全部遮蔽,同时土壤保持充分湿润情况下的蒸散量,也称可能蒸散量或参考蒸散量。该方法理论基础坚实、物理意义明确,涉及气候要素多,如:气温、辐射、相对湿度、风速等,能够客观反映各气候要素对潜在蒸散量的综合影响,且适应于不同气候类型地区潜在蒸散量的计算。具体算法及参数选取参见文献[9]。

多年平均值计算时段为1961-2010年。季、年值基于月值统计。流域平均值采用算术平均方法统计,为保障历年流域平均值序列的一致性,即参与计算的站点数历年基本保持不变,选择年和四季水分盈亏值缺测率少于10%的站点进行统计,共568站(图1)。空间分析主要采用Cressman^[22]插值方法,该方法在气象要素插值分析中运用广泛。

2.3 变化趋势及显著性检验分析

本文采用线性回归和Mann-Kendall两种方法进行变化趋势及显著性检验分析。

线性回归方法采用斜率作为变化趋势及线性变化速率,并用t检验方法^[23]检验斜率与0差异是否显著,表示线性趋势是否显著。如有显著差异,且斜率为正,则表明增加趋势显著,为负则减少趋势显著,信度取 $\alpha = 0.05$ 。考虑到该方法要求序列服从正态分布,因此,采用Kolmogorov-Smirnov方法^[24]对各站的季和年降水量、潜在蒸散量、水分盈亏量时间序列进行正态分布检验,信度取 $\alpha = 0.05$ 。统计结果表明,1961-2010年绝大多数站点四季和年值的潜在蒸散量和水分盈亏量服从正态分布,只有春(3%)、秋(4%)、冬(7%)季降水量少部分站点不服从正态分布,主要分布在新疆、西藏、内蒙古、青海、甘肃等局部地区。年和四季降水量、潜在蒸散量和水分盈亏的历年流域平均值经检验也均服从正态分布。

Mann-Kendall方法是一种基于排列的非参数检验方法来估计趋势的显著性,该方法不要求序列符合正态分布这个条件,趋势确定及显著性检验的具体方法参见文献[25],信度取 $\alpha = 0.05$ 。其中检验统计量大于0表示增加趋势,相反则为减少趋势。考虑到序列的1阶自相关会影响非参数Mann-Kendall方法对变化趋势的判别:如果自相关系数显著,正的相关会增加判定显著趋势的概率,负相关则低估检测趋势的概率,因此需先对序列与滞后1年的自相关系数进行检验,1阶自相关系数计算方法详细可见文献[24],显著性检验参见文献[26],信度取 $\alpha = 0.10$ 。自相关显著的原始序列需先去掉自相关性,然后再按照文献[25]进行变化趋势显著性检验。

全国各站四季及年水分盈亏序列采用Mann-Kendall方法进行趋势显著性检验时,序列自相关显著的站点占有效站点(序列长度 ≥ 45 年)的17%~20%左右;原序列订正前后,显著性有变化的站点14~32个,所占比例总体较小。Mann-Kendall方法与线性回归方法确定的趋势显著性大多数是一致的,不一致的比例仅为7%~12%。因此,本文集中两种方法优点,采用线性回归方法确定的线性斜率和Mann-Kendall方法考虑了序列自相关的影响和序列修订后确定的趋势显著性反映变化速率和趋势的显著性。

3 结果分析

3.1 中国水分盈亏量时空特征

3.1.1 年和四季水分盈亏量空间分布特点 年水分盈亏量总体呈现南方盈余,向北向西水分亏缺量增加的态势(图2a)。年水分盈亏量的0 mm线大致穿过苏皖北部、河南南部、陕西南部、四川盆地西缘、云南中北部及东北的东南部地区,年水分收支相对比较平衡,与张方敏等^[27]分析的1975-2004年湿润指数为1的等值线、吴绍洪等^[28]分析的1971-2000年干湿指数为1的等值线、文献^[29]中干燥度为1的等值线走向大体相似,细微的不同主要是由于潜在蒸散量计算方法、所用资料时间尺度、统计的具体时间段或个别相关参数的选取等差异造成的。此线以南,气候湿润,水分有盈余,江南、华南盈余量有400~800 mm,其中江西东北部、福建西北部、广东中部达800~1000 mm,局部地区超过1000 mm;此线以北水分为亏缺,亏缺量向北和向西逐渐增加,一般有400~1000 mm,

其中内蒙古西部、甘肃西部、青海西北部、南疆部分地区有1000~1900 mm。年水分盈亏量的分布特征与年降水量南多向北向西减少的分布态势大致类似(图2b), 年水分盈亏量0 mm线与年降水量800 mm线穿过区域也大体一致。

四季水分盈亏量空间分布特征分明。春季, 冬季风显著减弱, 4月中旬, 夏季风到达华南, 进入前汛期, 降水量增多, 受其影响, 春季水分盈亏空间分布总体呈现东南部为盈余, 北方和西南地区大部为亏缺态势。盈余的北边界为淮河流域南部、西边界为四川中部和贵州西部, 西藏东南部也略有盈余(图3a)。夏季, 随着季风向北推进, 雨带随之由华南移向江淮, 然后再向华北、东北移动, 同时华南受热带辐合带和台风的影响,

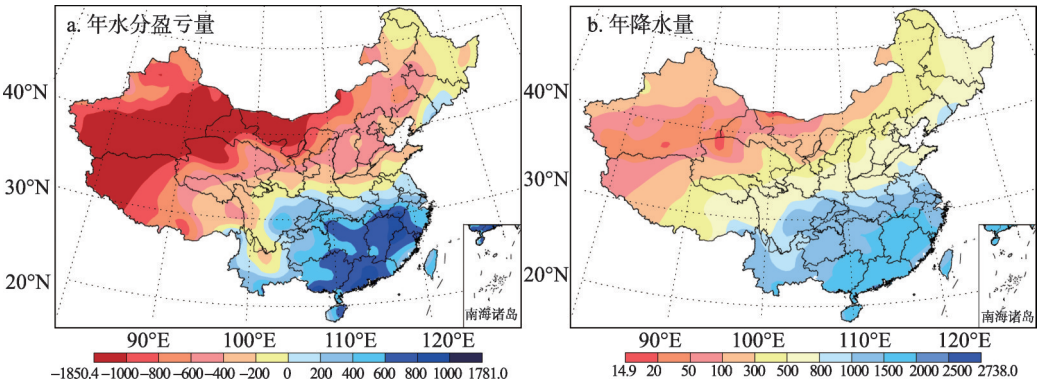


图2 1961-2010年中国年水分盈亏量和年降水量空间分布(mm)

Fig. 2 The patterns of mean annual water surplus and deficit and annual precipitation in China during 1961-2010 (mm)

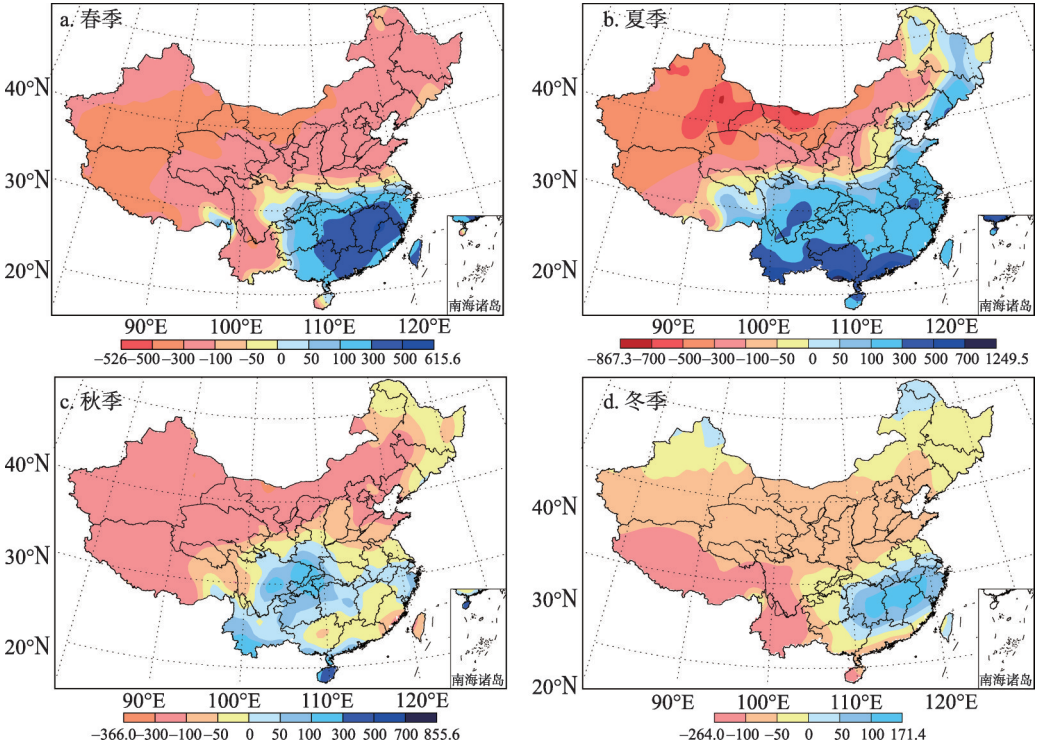


图3 1961-2010年中国四季水分盈亏量空间分布(mm)

Fig.3 The patterns of mean seasonal water surplus and deficit during 1961-2010 in China (mm)

降水增加,因此,夏季水分盈亏空间分布虽仍保持南方盈余、北方亏缺态势,但盈余的北边界随着北方地区降水量的增加,向北扩展到秦岭及黄河中下游一带,西边界达到青藏高原东部,东北大部地区也以盈余为主;华北中西部、西北地区及内蒙古、西藏中西部由于降水量小于潜在蒸散量,仍以水分亏缺为主(图3b)。秋季,季风从北向南迅速推进,中国东部大部地区降水减少,由于西南季风依然活跃,西南地区降水较多,华南降水仍受台风影响,因此,秋季中国水分盈余区集中在华南南部、西南地区东部及陕西南部、湖北和湖南大部、浙江、苏皖南部等地,但盈余量较夏季明显减少;其余地区以水分亏缺为主(图3c)。冬季,冬季风最盛,气候干冷,因此,中国大部分地区以水分亏缺为主,水分盈余区则向东南方向缩小,主要集中在长江中下游地区以及华南东部和北部(图3d)。

3.1.2 全国及十大流域水分盈亏量月变化特征 中国及各大流域水分盈亏量月变化特征(图4),中国水分盈亏量月变化特征表现为6-8月有盈余,其中7月盈余量最大;其余各月均为亏缺,4月最大,10月为秋季亏缺最大。松花江、辽河、海河、淮河流域水分盈亏量月变化基本一致:从3月开始,水分亏缺明显加大,5月亏缺量最大,易多发春旱,进入夏季水分条件逐渐好转,7、8月水分为盈余,其中7月为最大,随后9、10月又转为亏缺状态,冬季,水分亏缺量减少。黄河流域和西北诸河流域全年水分亏缺,黄河流域5月亏缺量最大,之后,6-9月水分条件不断改善,9月亏缺量为一年中最少;西北诸河流域则呈现单谷型,6月亏缺量最大,1月最小。长江和珠江流域除1月、11-12月水分亏缺(珠江流域亏缺量大于长江流域)外,其余各月都有盈余,长江流域呈现单峰型,6月盈余量最大,珠江流域大部分月盈余量较长江流域多,且呈双峰型,6月最多,7月盈余量减少明显,8月又略增多。东南诸河流域年内波动大,除10-12月略有亏缺,全年大部分月份有盈余,6月为一年中盈余量最大,7月,由于雨带北移,该流域由副高控制,多高温晴热少雨,水分显著下降,为伏旱多发期,之后直到9月盈余量又略有回升。西南诸河流域大致呈现单峰型,6-9月水分有盈余,7月最大,其余各月水分亏缺,3、4月亏缺量最大,利冬春旱多发。

3.2 水分盈亏量变化趋势分析

3.2.1 年水分盈亏量年代际变化特征 图5为中国及十大流域年水分盈亏量历年变化曲线及各年代值。从常年值和历年值来看,中国水分情况总体表现为亏缺,亏缺量为 -117.6 mm ;松花江流域、辽河流域、海河流域和淮河流域常年值也均为亏缺,分别为 -228.0 mm 、 -261.5 mm 、 -419.2 mm 、 -466.6 mm ,亏缺量从北到南逐渐增加,且历年值除极个别年

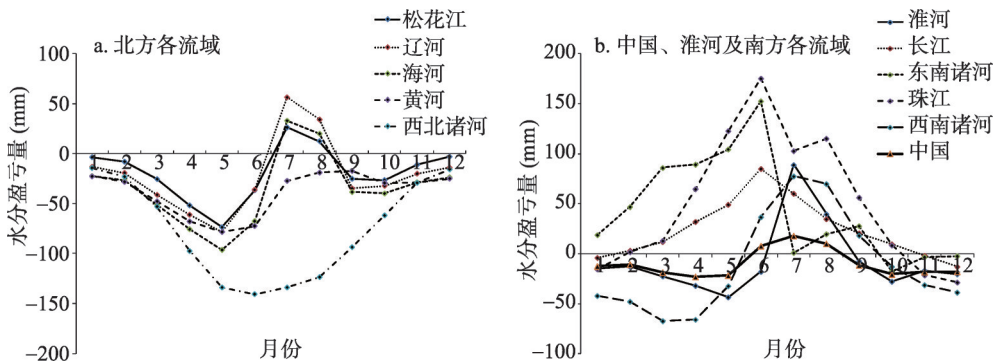


图4 中国及十大流域1961-2010年平均水分盈亏量月变化图(mm)

Fig. 4 Monthly variations of water surplus and deficit averaged in 10 major river basins and in China from 1961 to 2010 (mm)

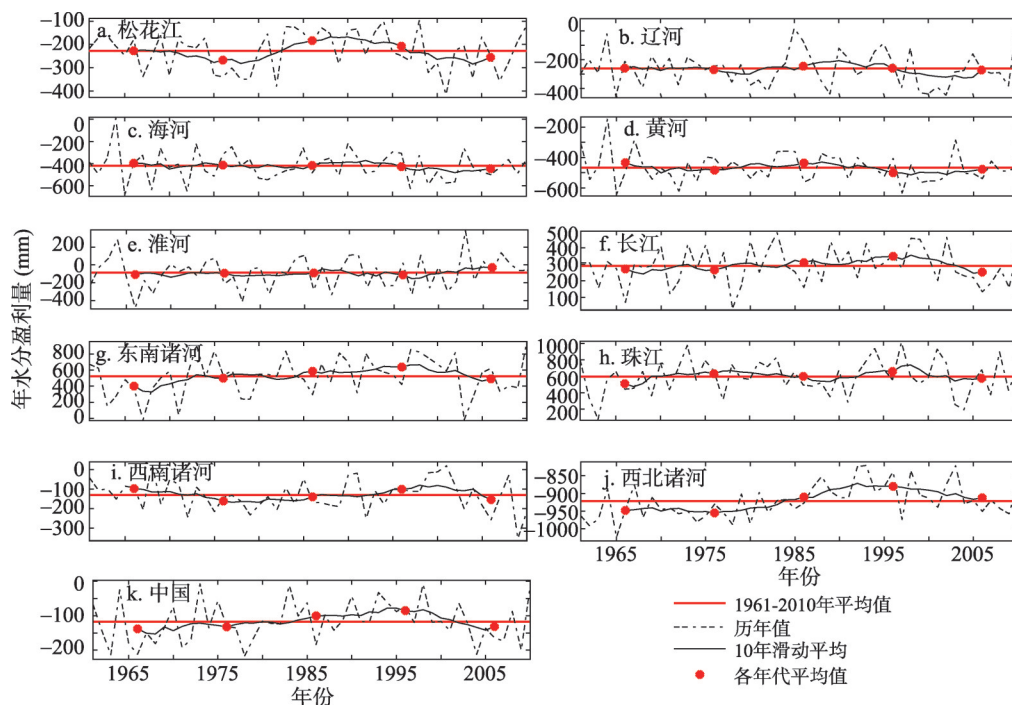


图5 中国及十大流域1961-2010年年水分盈亏量历年及年代际变化(mm)

Fig. 5 Time series and decadal variations of annual water surplus and deficit in 10 major basins and China during 1961-2010 (mm)

外,均表现为亏缺;西南诸河和西北诸河流域常年值也为亏缺,分别为 -131.1 mm 、 -921.2 mm ,西北诸河亏缺量为十大流域最大;淮河流域常年值为 -87.1 mm ,过去50年亏缺年份多于盈余年份;长江、东南诸河和珠江流域历年水分情况均表现为盈余,常年值分别为 290.0 mm 、 523.3 mm 、 594.7 mm ,珠江流域盈余量为十大流域最大。采用相对标准差的绝对值反映水分盈亏量序列的离散程度,十大流域中西北诸河离散程度最小,淮河流域离散程度大,其余流域介于二者之间。

由各年代平均值变化来看,中国水分亏缺量总体呈现多—少—多变化特征,1980s、1990s亏缺量较常年偏少,1990s亏缺量为近50年来最少。十大流域各年代变化呈现不同特征:松花江流域1970s、2000s水分亏缺较常年偏多,1970s亏缺最大,1980s亏缺最少;辽河流域各年代水分亏缺变化幅度不大,接近常年;海河流域水分亏缺逐年代增加,1990s和2000s亏缺量较常年偏多,2000s水分亏缺量最大;黄河流域1970s和近20年水分亏缺均较常年偏多,其中1990s水分亏缺最大;淮河流域仅2000s水分亏缺量较常年偏少,其他年代均较常年偏多,其中1990s最多;西北诸河流域水分亏缺量自1980s由偏多转偏少,1990s最少;西南诸河流域1970s、1980s和2000s水分亏缺量多于常年;长江、东南诸河流域1980s-1990s、珠江流域1970s-1990s水分盈余量均较常年偏多,其中1990s盈余量为近50年最大,这是造成中国1990s的亏缺量为近50年最少的主要原因,其余年代3个流域水分盈余量均较常年偏少,其中长江2000s水分盈余量为近50年最少。

就2000s来讲,中国水分亏缺量较常年偏多,主要是由于大多数流域水分亏缺量偏多或盈余量偏少造成的,其中松辽海黄和西南诸河等5个流域水分亏缺量较常年偏多,其中辽河、海河流域亏缺量为近50年最多;长江、东南诸河、珠江流域水分盈余量较常年偏少,其中长江为近50年最少,东南诸河和珠江流域为近40年最少;仅淮河流域和西

北诸河流域水分亏缺量较常年偏少，其中淮河流域为近 50 年最少。

3.2.2 年和四季水分盈亏量变化趋势 从中国及十大流域年和四季水分盈亏量变化趋势情况看，线性回归方法和 Mann-Kendall 方法判定的趋势变化方向和显著性仅个别流域和季节略有差异，趋势变化方向不一致的季节和流域，趋势均不显著。

1961-2010 年，中国平均年水分盈亏量呈增加趋势，线性增加速率为 5.7 mm/10a，春、夏、冬季也以增加趋势为主，仅秋季呈现显著减少趋势。空间上，松花江、辽河、海河、黄河流域及西南诸河流域水分盈亏量呈现减少趋势，其余大部分流域均呈现增加趋势，西北诸河流域增加趋势显著（表 1）。

表 1 1961-2010 年中国及十大流域年和四季水分盈亏量变化趋势
Tab. 1 Trends of seasonal and annual water surplus and deficit for 10 major river basins and whole China during 1961 to 2010 (* denotes significant trend)

| 时段 | 流域名称 | 松花江 | 辽河 | 海河 | 黄河 | 淮河 | 长江 | 东南诸河 | 珠江 | 西南诸河 | 西北诸河 | 中国 |
|----|------|------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|
| 春 | L | 6.7* | 7.6* | 4.7 | -3.9 | -2.9 | -6.5 | -6.6 | 1.6 | 9.3* | 3.9* | 0.4 |
| | M | 1.5 | 1.5 | 1.9 | -0.6 | 0.1 | -1.4 | -0.8 | -0.3 | 1.9 | 1.9 | 0.3 |
| 夏 | L | -5.4 | -7.5 | -15.1 | 0.4 | 20.4 | 18.1* | 30.4* | 17.1 | -9.8 | 6.4* | 7.7* |
| | M | -0.6 | -1.0 | -2.1* | 0.1 | 1.6 | 2.1* | 2.4* | 0.9 | -1.5 | 2.3* | 1.8 |
| 秋 | L | -4.3 | -2.0 | 0.6 | -7.8 | -9.3 | -10.6 | -1.5 | -9.8 | -2.1 | 3.1* | -5.2 |
| | M | -1.2 | -0.9 | 0.5 | -1.4 | -1.2 | -2.2* | -0.1 | -1.2 | -0.3 | 2.7* | -2.1* |
| 冬 | L | 1.2 | 0.9 | 0.6 | 0.7 | 5.5 | 4.9 | 8.8 | 3.5 | -1.3 | 1.1* | 2.7 |
| | M | 1.5 | 0.7 | 0.4 | 0.7 | 1.6 | 1.7 | 1.0 | 0.4 | -0.6 | 1.9 | 1.4 |
| 年 | L | -1.2 | -1.1 | -9.5 | -10.4 | 13.0 | 5.4 | 33.7 | 13.2 | -6.0 | 14.2* | 5.7 |
| | M | 0.0 | -0.4 | -0.5 | -0.7 | 0.9 | 0.1 | 1.4 | 0.5 | -0.7 | 3.1* | 1.1 |

注：* 趋势显著，通过 0.05 的信度检验。L 代表线性回归方法，计算的线性变化趋势速率单位为 mm/10a；M 代表 Mann-Kendall 方法计算的统计量，符号表示趋势增减，无单位。

分流域来讲，松辽河流域水分盈亏量呈现出夏秋季减少，冬春季增加趋势，趋势总体不显著；海河流域除夏季呈现显著减少（线性减少速率为-15.1 mm/10a）外，其它三季均有不明显增加趋势；黄河、淮河、长江、东南诸河等四个流域春秋季节以减少趋势为主，长江流域秋季减少趋势显著（-10.6 mm/10a），冬夏季则为增加趋势，其中夏季长江（18.1 mm/10a）和东南诸河（30.4 mm/10a）流域增加趋势显著；珠江流域春夏冬呈现增加趋势，秋季则呈减少趋势；西南诸河除春季有增加趋势外，其他三季节均呈不显著的减少趋势；西北诸河四季均呈现增加趋势，其中夏秋趋势显著，水分亏缺量减少，有利于农业生产和生态环境改善。总体来讲，春季，松花江、辽河、海河等北方流域的农业主产区水分亏缺量减少，对降低春旱风险有利，一定程度上缓和了农业灌溉的压力。夏季，松花江、辽河、海河及西南诸河流域水分亏缺量呈现增加趋势，不利于水库蓄水和水资源补充，尤其对原本水资源很匮乏的华北地区更为不利。秋季，水分盈亏量除西北诸河显著增加、海河流域略有增加，其余流域呈现不同程度的减少趋势，水分条件变差，有利于干旱的发生。冬季，除西南诸河外，其余流域呈现不同程度的增加趋势，西南诸河水条件变差，冬旱更易发生。

3.2.3 年水分盈亏量变化成因 农业生产、水资源利用和生态建设过程中，除需要考虑水分盈亏量变化趋势外，还需要了解具体的成因，才能制定合理科学的规划和采用正确措施。年降水量和潜在蒸散量的变化趋势和速率共同决定了年水分盈亏量的变化趋势和速率。表 2 为中国及各流域年降水量、年潜在蒸散量、年水分盈亏量的趋势变化情况。

表2 1961-2010年中国及十大流域年降水量、潜在蒸散量、水分盈亏量变化趋势
Tab. 2 Trends of annual precipitation, potential evapotranspiration, and water surplus and deficit for 10 major river basins and whole China during 1961 to 2010 (* denotes significant trend)

| 要素 | 流域名称 | 松花江 | 辽河 | 海河 | 黄河 | 淮河 | 长江 | 东南诸河 | 珠江 | 西南诸河 | 西北诸河 | 中国 |
|--------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|
| 年降水量 | L | -1.4 | -8.7 | -19.5 | -11.0 | -2.6 | -1.4 | 29.9 | 7.1 | 0.7 | 6.4* | 0.3 |
| | M | -0.3 | -1.3 | -1.7 | -1.4 | -0.2 | -0.6 | 1.5 | 0.3 | 0.2 | 3.2* | 0.0 |
| 年潜在蒸散量 | L | -0.2 | -7.7 | -10.0 | -0.3 | -15.3 | -7.1 | -3.0 | -5.4 | 3.7 | -7.9 | -5.4 |
| | M | 0.1 | -1.8 | -2.4* | -0.5 | -2.6* | -2.2* | -0.8 | -1.2 | 1.0 | -2.7* | -2.7* |
| 年水分盈亏量 | L | -1.2 | -1.1 | -9.5 | -10.4 | 13.0 | 5.4 | 33.7 | 13.2 | -6.0 | 14.2* | 5.7 |
| | M | 0.0 | -0.4 | -0.5 | -0.7 | 0.9 | 0.1 | 1.4 | 0.5 | -0.7 | 3.1* | 1.1 |

注: * 趋势显著, 通过0.05的信度检验。说明同表1。

1961-2010年年降水量全国总体略呈增加趋势, 松花江、辽河、海河、黄河、淮河、长江流域呈现减少趋势, 其余流域则呈现增加趋势, 其中西北诸河增加趋势显著。年潜在蒸散量, 全国平均值呈现显著减少趋势, 绝大多数流域也呈现减少趋势, 其中海河、淮河、长江、西北诸河等流域减少趋势显著, 仅西南诸河呈现增加趋势。

降水量减少导致水分收入减少, 潜在蒸散量减小使得水分支出减少而有利于总体水分的增加。松花江、辽河、海河、黄河流域年水分盈亏量的减少与年降水减少速率大于年潜在蒸散量减少速率有关, 降水量减少变化趋势起主要作用。西南诸河流域, 年降水增加速率非常小, 但年蒸散量增加速率大, 因而导致水分盈亏量减少, 水分条件变差。淮河和长江流域年降水量和潜在蒸散量虽也均呈现减少趋势, 但潜在蒸散量减少速率大于降水, 导致年水分盈亏量呈现增加趋势, 潜在蒸散量的减少变化趋势起主要作用。东南诸河、珠江、西北诸河流域由于年降水呈现增加趋势, 年潜在蒸散量呈现减少趋势, 二者对增加水分均有利, 所以年水分盈亏量呈现增加趋势。

3.2.4 年和四季水分盈亏变化趋势空间分布 考虑到十大流域中, 有些流域面积大, 跨越多个气候区, 区域平均值反映不出区域内的空间差异, 因此, 有必要对全国水分盈亏量变化趋势的空间分布进行详细分析。

年水分盈亏量近50年在中国的东南部及西部大部分地区呈现增加趋势, 其中淮河流域中上游、长江流域中下游、东南诸河流域、珠江流域东部增加幅度有10~50 mm/10a, 西北诸河流域、青藏高原东南部增加幅度也有10~50 mm/10a, 而松花江流域大部、辽河流域北部及南部、海河流域、淮河流域东部、黄河流域中上游大部以及四川盆地、珠江流域上游、西南诸河的南部等地呈现减少趋势(图6a)。

春季, 水分盈亏量总体表现为中国西部地区及松、辽、海河流域呈现增加趋势, 增加速率普遍不足10 mm/10a, 西南诸河流域东部较大有10~30 mm/10a, 海河流域春季水分条件有所改善, 利于农业生产; 其余地区有减少趋势, 长江流域中部及下游、东南诸河北部减少速率为10~20 mm/10a, 局部地区趋势显著(图6b)。夏季水分盈亏值变化趋势与年值变化趋势的空间分布相似, 黄河下游及渭水流域以南地区普遍呈增加趋势, 增加速率有10~30 mm/10a, 淮河流域上游、长江流域中下游部分地区、东南诸河流域北部、珠江流域东南部增加速率有30~60 mm/10a, 部分站点趋势显著, 新疆中部普遍增幅有10~20 mm/10a。东北、华北、四川盆地至云南一带, 水分盈亏量呈现减少趋势(图6c)。秋季, 水分盈亏量变化趋势呈现中国中东部地区减少、西部增加态势, 西部增加速率不足10 mm/10a, 海南则有10~30 mm/10a; 黄河流域中部、长江流域四川盆地及以东大部地区、珠江流域大部减少速率有10~20 mm/10a(图6d)。冬季, 全国大部地区呈现

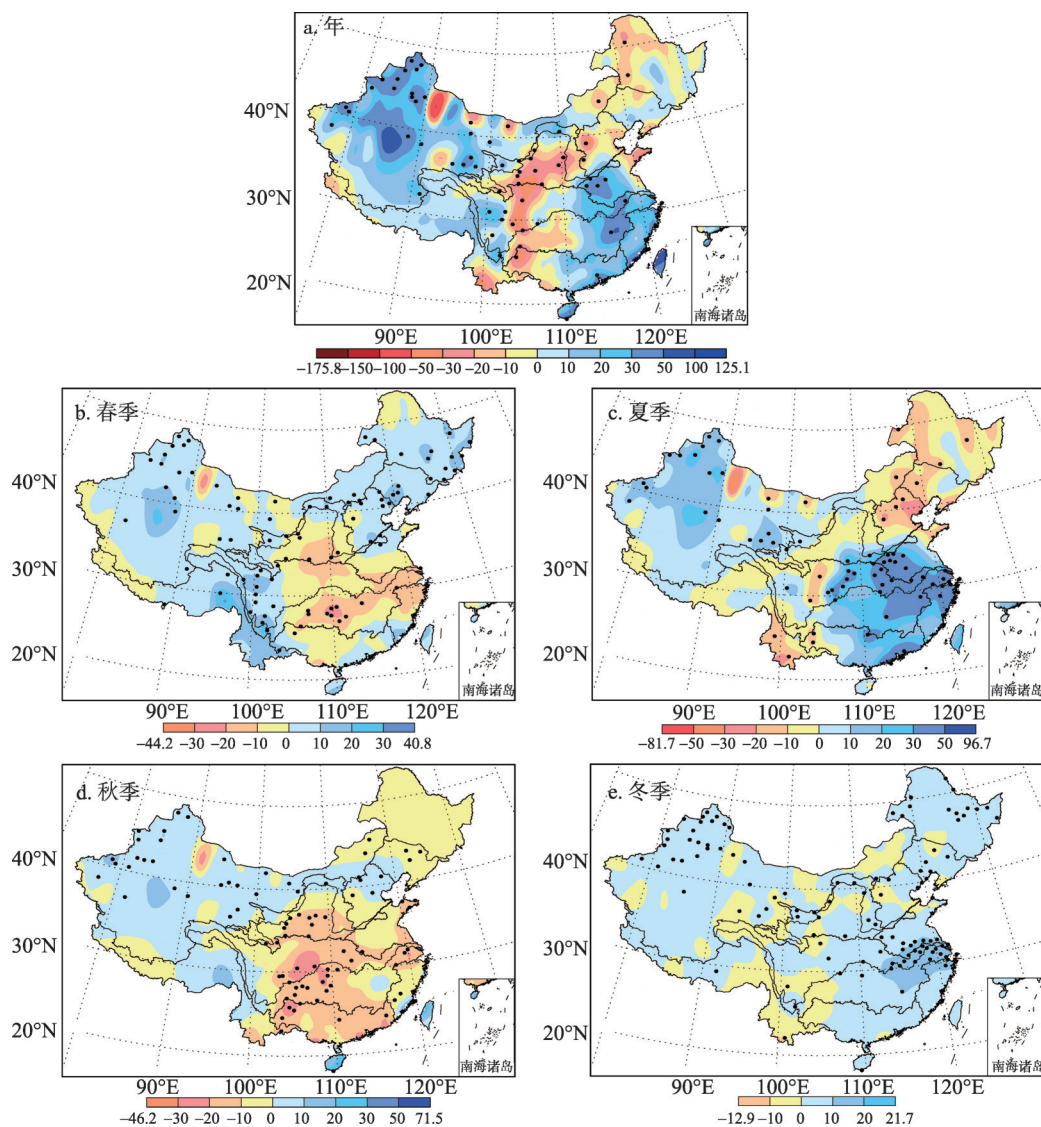


图6 1961-2010年中国年和四季水分盈亏值变化趋势(mm/10a)

(圆点为采用Mann-Kendall方法确定的趋势变化显著的站点)

Fig. 6 The trends of annual and seasonal water surplus and deficit in China during 1961-2010
(the dots denote the stations with significant trends by the Mann-Kendall method) (mm/10a)

增加趋势,长江下游及淮河流域南部增加速率有10~20 mm/10a,且部分地区显著;西南诸河流域东部、长江上游流域和黄河源区等地略有减少(图6e),西南东部水分盈亏量减少,导致冬季水分条件略变差,气候更为干燥,干旱更易发生或变的严重。

4 结论

(1) 1961-2010年年水分盈亏量总体呈现南方盈余向西向北亏损的态势,0 mm线大致穿过苏皖北部、河南南部、陕西南部、四川盆地西部、云南中部及东北的东南部地区。中国水分盈亏量月变化特征表现为夏季6-8月有盈余,7月盈余量最大;其余各月为

亏缺, 4月亏缺量最大, 十大流域月变化呈现不同特征。

(2) 从常年值来看, 中国水分情况总体表现为亏缺。十大流域中, 长江、东南诸河、珠江流域常年值为正, 表现为盈余, 其中珠江盈余量最大, 其余流域常年值均为负值, 表现为亏缺, 西北诸河亏缺最大。

(3) 近50年来, 中国年水分亏缺量总体呈现多—少—多变化特征, 1980s、1990s亏缺量较常年偏少, 1990s亏缺量为近50年来最少, 十大流域年代变化各有所不同。就2000s来讲, 中国水分亏缺量较常年偏多, 主要是由于大多数流域水分亏缺量偏多(松辽海黄和西南诸河等)或盈余量偏少(长江、东南诸河、珠江流域)造成的, 其中辽河、海河流域亏缺量为近50年最多; 长江水分盈余量为近50年最少, 东南诸河和珠江流域为近40年最少。淮河流域和西北诸河流域水分亏缺量较常年偏少, 其中淮河流域为近50年最少。

(4) 1961-2010年, 全国平均年和春夏冬三季水分盈亏量变化趋势呈现增加趋势, 秋季则减少趋势显著。松花江、辽河、海河、黄河流域及西南诸河流域年水分盈亏量呈现减少趋势, 水分条件变差; 其余大部分流域年水分盈亏量呈现增加趋势, 西北诸河流域增加显著, 水分条件好转。

(5) 各流域水分盈亏量变化成因决定于年降水和潜在蒸散量的变化趋势和速率。1961-2010年, 松花江、辽河、海河、黄河等流域年降水量减少速率大于潜在蒸散量减少速率, 导致年水分盈亏量也呈减少趋势, 年降水量减少变化趋势起主要作用; 西南诸河流域, 则是由于年降水量增加速率小于潜在蒸散量增加速率, 而导致年水分盈亏量减少, 潜在蒸散量增加变化趋势起主要作用。淮河和长江流域, 由于潜在蒸散量减少速率大于降水的减少速率, 导致年水分盈亏量呈现增加趋势, 潜在蒸散量的减少变化趋势起主要作用; 东南诸河、珠江、西北诸河流域年降水量增加、潜在蒸散量减少, 二者均对增加水分盈亏量有利。各地区农业生产、水资源开发利用、生态环境建设应考虑不同成因, 因地制宜, 合理制定规划和采取措施。

参考文献(References)

- [1] Lu Yurong, Gao Guodong, Li Huaijin. On the dry and wet condition of China. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 1979, (1): 125-138. [陆渝蓉, 高国栋, 李怀瑾. 关于我国干湿状况的研究. 南京大学学报(自然科学版), 1979, (1): 125-138.]
- [2] Zhao Junfang, Guo Jianping, Xu Jingwen et al. Trends of Chinese dry- wet condition based on wetness index. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(8): 18-24. [赵俊芳, 郭建平, 徐精文等. 基于湿润指数的中国干湿状况变化趋势. 农业工程学报, 2010, 26(8): 18-24.]
- [3] Liu Bo, Ma Zhuguo. Area change of dry and wet regions in China in the past 45 years. *Arid land Geography*, 2007, 30(1): 8-15. [刘波, 马柱国. 过去45年中国干湿气候区域变化特征. 干旱区地理, 2007, 30(1): 8-15.]
- [4] Sun Li, Shen Baizhu, An Gang. A study of the variation and tendency of surface dry-and-wet state of northeast area in China. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2003, 14(5): 542-552. [孙力, 沈柏竹, 安刚. 中国东北地区地表干湿状况的变化及趋势分析. 应用气象学报, 2003, 14(5): 542-552.]
- [5] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [6] Li Weiguang, Yi Xue, Hou Meiting et al. Standardized precipitation evapotranspiration index shows drought trends in China. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(5): 643-649. [李伟光, 易雪, 侯美亭等. 基于标准化降水蒸散指数的中国干旱趋势研究. 中国生态农业学报, 2012, 20(5): 643-649.]
- [7] Wang Zunya, Ding Yihui, He Jinhai et al. An updating analysis of the climate change in China in recent 50 years. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 62(2): 228-236. [王遵娅, 丁一汇, 何金海等. 近50年来中国气候变化特征的再分析. 气象学报, 2004, 62(2): 228-236.]
- [8] Chen Yu, Gao Ge, Ren Guoyu et al. Spatial and temporal variation of precipitation over ten major basins in China

- between 1956-2000. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(5): 637-643. [陈峪, 高歌, 任国玉 等. 中国十大流域近 40 多年降水量时空变化特征. *自然资源学报*, 2005, 20(5): 637-643.]
- [9] Gao G, Chen D L, Ren G Y et al. Spatial and temporal variations and controlling factors of potential evapotranspiration in China: 1956-2000. *Journal Geographical Sciences*, 2006, 16(1): 3-12
- [10] Yin Yunhe, Wu Shaohong, Dai Erfu. Determining factors in potential evapotranspiration changes over China in the period 1971-2008. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(22): 2226-2234. [尹云鹤, 吴绍洪, 戴尔阜. 1971-2008 年我国潜在蒸散时空演变的归因. *科学通报*, 2010, 55(22): 2226-2234.]
- [11] Cao Wen, Shen Shuanghe, Duan Chunfeng. Temporal- spatial variations of potential evapotranspiration and quantification of the causes in Northwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(11): 3394-3403. [曹雯, 申双和, 段春峰. 中国西北潜在蒸散时空演变特征及其定量化成因. *生态学报*, 2012, 32(11): 3394-3403.]
- [12] Zhang Shujie, Zhang Yushu, Caifu et al. Changes of water budget and their effects and responses in northeastern China from 1961 to 2007. *Resources Science*, 2010, 32(4): 663-670. [张淑杰, 张玉书, 蔡福 等. 1961 年至 2007 年东北地区水分盈亏变化趋势及其影响与响应. *资源科学*, 2010, 32 (4): 663-670.]
- [13] Zeng Lihong, Song Kaishan, Zhang Bai. Spatial and temporal structure of water deficit over northeast China during the period of 1951-2008. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(5): 858-870. [曾丽红, 宋开山, 张柏. 1951-2008 年东北地区水分盈亏时空格局. *自然资源学报*, 2011, 26(5): 858-870.]
- [14] Zeng Yan, Liu Changming, Qiu Xinfa. Water resources analysis based on climatic indices. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2003, 20(4): 458-463. [曾燕, 刘昌明, 邱新法. 从气候角度分析西北地区水资源状况. *中国科学院研究生院学报*, 2003, 20(4): 458-463.]
- [15] Yao Xiaojun, Zhang Xiao, Sun Meiping. Spatial-temporal characteristics of water deficit in Northwest China from 1960 to 2010. *Geographical Research*, 2013, 32(4): 607-616. [姚晓军, 张晓, 孙美平 等. 1960-2010 年中国西北地区水分盈亏量时空特征. *地理研究*, 2013, 32(4): 607-616.]
- [16] Shao Xiaomei, Xu Yueqing, Yan Changrong. Analysis on the spatial and temporal structure of climatic water deficit in the Yellow River Basin. *Climatic and Environmental Research*, 2007, 12(1): 74-80. [邵晓梅, 许月卿, 严昌荣. 黄河流域气候水分盈亏时空格局分析. *气候与环境研究*, 2007, 12(1): 74-80.]
- [17] Shi Jianguo, Yan Changrong, He Wenqing. Study on spatial and temporal variation of water surplus and deficiency in Yellow River basin. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(1): 113-119. [史建国, 严昌荣, 何文清 等. 黄河流域水分亏缺时空格局变化研究. *自然资源学报*, 2008, 23(1): 113-119.]
- [18] Li Pengfei, Sun Xiaoming, Zhao Xinyi. Analysis of precipitation and potential evapotranspiration in arid and semi arid area of China in recent 50 years. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(7): 57-63. [李鹏飞, 孙小明, 赵昕奕. 近 50 年中国干旱半干旱地区降水量与潜在蒸散量分析. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(7): 57-63.]
- [19] The Ministry of Water Resources of the people's Republic of China. *China Water Resources Bulletin*. Beijing: China Water Power Press, 2010: 1-51. [中华人民共和国水利部. 中国水资源公报. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 1-51]
- [20] Chen D L, Gao G, Xu C Y et al. Comparison of the Thornthwaite method and pan data with the standard Penman-Monteith estimates of reference evapotranspiration in China. *Climate Research*, 2005, 28: 123-132.
- [21] Allen R G, Pereira L S, Raes D et al. *Crop evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements* - FAO Irrigation & Drainage Paper 56. Roma: United Nations Food and Agriculture Organization, 1998.
- [22] Cressman G P. An operational objective analysis system. *Monthly Weather Review*, 1959, 87: 367-374.
- [23] Haan, C T. *Statistical Methods in Hydrology*. 2nd ed. Iowa: Iowa State University Press, 2002: 496.
- [24] Chu J T, Xia J, Xu C Y et al. Spatial and temporal variability of daily precipitation in Haihe River basin, 1958-2007. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(2): 248-260.
- [25] Gao Ge. The climatic characteristics and change of haze days over China during 1961- 2005. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(7): 761-768. [高歌. 1961-2005 年中国霾日气候特征及变化分析. *地理学报*, 2008, 63(7): 761-768.]
- [26] Yue S, Pilon P, Phinney B et al. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological Processes*, 2002, 16: 1807-1829.
- [27] Zhang Fangmin, Shen Shuanghe. A study on dry/wet conditions and changes of dry/wet climate boundary in China. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2008, 31(4): 574-579. [张方敏, 申双和. 中国干湿状况和干湿气候界限变化研究. *南京气象学院学报*, 2008, 31(4): 574-579.]
- [28] Wu Shaohong, Yin Yunhe, Zheng Du et al. Dry and wet condition in China in recent 30 years. *Science in China, Series D, Earth Sciences*, 2005, 35(3): 276-283. [吴绍洪, 尹云鹤, 郑度 等. 近 30 年中国陆地表层干湿状况研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2005, 35(3): 276-283.]

- [29] Zhao Ji, Chen Chuankang. Geography of China. Beijing: Higher Education Press, 2012: 35. [赵济, 陈传康. 中国地理. 北京: 高等教育出版社, 2012: 35.]

Characteristics of water surplus and deficit change in 10 major river basins in China during 1961-2010

GAO Ge^{1,2}, XU Chongyu³

- (1. Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 2. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In this paper, linear regression and Mann-Kendall methods are used to examine the climate trend characteristics of annual water surplus and deficit and their causes in the 10 major river basins over China during 1961-2010. The results showed that: (1) The mean annual water surplus and deficit in China during 1961-2010 was negative and the water condition was deficient. The spatial pattern of normal values shows surplus in the south and deficit in the north and west parts of China. (2) The normal monthly values of water surplus and deficit across China show surplus from June to August and deficit in other months. The most surplus was observed in July and the most deficit in April. Different monthly variations were found in each river basin. (3) Decadal variation of annual water surplus and deficit of China shows the feature of more-less-more than normal. The deficit of the 1990s was the least in the past 50 years. In the 2000s, the water deficits of China were more than normal, which was mainly caused by more deficit and less surplus in most of the river basins. (4) Annual, spring, summer and winter water surplus and deficit of China increased during 1961-2010 and the water condition became better, while it decreased significantly in autumn. (5) In the basins of Songhua River, Liaohe River, Haihe River, Yellow River and river basins of Southwest China, the annual water surplus and deficit showed a decreasing trend. For the four major river basins, the decreasing rate of annual precipitation was greater than that of annual potential evapotranspiration, and the decreasing annual precipitation played a great role in these regions. But in river basins of Southwest China, the increasing rate of annual precipitation was less than that of annual potential evapotranspiration, which led to a reduction of water availability. In the Huaihe and Yangtze river basins, the decreasing rate of annual evapotranspiration was greater than that of annual precipitation, which resulted in an uptrend of annual water surplus and deficit. In river basins of Southeast China, Pearl River Basin and river basins of Northwest China, the increase in annual precipitation and decrease in annual evapotranspiration are both beneficial to water increase.

Keywords: water surplus and deficit; 10 major river basins, trend; China