

1961-2010年中国降水时空变化特征及对地表干湿状况影响

陈洁^{1,2}, 刘玉洁^{1,2}, 潘韬¹, 吴绍洪^{1,2}, 谭清华^{1,2},
葛全胜^{1,2}, 刘燕华^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 开展气候变化背景下中国降水时空变化特征及对地表干湿状况影响研究, 对揭示陆地表层系统对气候变化的动态响应与变化规律以及防灾减灾具有重要意义。基于1961-2010年地面气象观测资料, 分析我国降水与地表干湿状况时空格局; 在此基础上, 采用敏感性与贡献度分析, 定量评估降水变化对干湿状况的影响。结果表明: 过去50年间我国年降水量呈轻微增加趋势, 其中, 青藏高原(高原亚寒带、高原温带)、西北(中温带西部、暖温带西部)和南方地区(亚热带、热带)呈增加趋势, 东北(寒温带、中温带东部)和华北地区(中温带中东部、暖温带东部)呈减少趋势。就地表干湿状况而言, 华北和东北地区以干旱化趋势为主, 西北、青藏高原及南方地区主要呈湿润化趋势。地表干湿状况对降水变化响应较为敏感(全国多年平均敏感系数: -1.13), 干湿指数和降水呈负相关。内陆干旱地区降水对干湿状况变化的贡献高于湿润地区, 局部地区降水贡献度超过60%。

关键词: 降水; 干湿; 气候变化; 时空分异; 敏感性; 贡献度

陆地表层是众多自然要素相互作用形成的一个多要素—过程—尺度耦合的综合体, 是人类赖以生存和发展的环境^[1]。气候变化背景下自然与人类活动如何驱动陆地表层要素相互作用的效应发生变化, 进而影响整体格局的改变, 是气候变化研究领域的前沿与基础科学问题^[2]。水分是影响陆地表层格局的关键要素之一, 近几十年来, 全球变暖日益显著, 全球水循环速率加快, 对全球和区域降水及蒸散的强度与分布都产生重大影响。中国地域辽阔, 地形复杂, 气候时空分异大, 加之人类活动等因素影响, 使降水和蒸散均发生明显变化, 进而影响我国地表干湿状况。因此, 开展气候变化背景下我国降水时空变化规律研究, 量化降水对地表干湿状况的影响, 有助于深入理解关键自然要素时空变化对陆地表层系统的影响过程与作用机制, 揭示陆地表层系统对气候变化的动态响应与变化规律, 同时为制定气候变化适应对策提供科学依据。

近年来, 国内外众多学者开展了气候变化背景下的降水变化研究^[3-4]。Asadieh等^[5]基

收稿日期: 2019-05-13; 修订日期: 2019-08-31

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2016YFA0602402); 国家自然科学基金项目(41530749, 41671107); 中国科学院青年创新促进会会员项目(2016049); 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDBSSW-DQC005); 中国科学院地理科学与资源研究所可桢杰出青年学者计划项目(2017RC101)

作者简介: 陈洁(1994-), 女, 福建宁德人, 博士研究生, 主要从事气候变化影响与风险评估研究。

E-mail: chenji.16s@igsrr.ac.cn

通讯作者: 刘玉洁(1982-), 女, 甘肃省天水市人, 博士, 副研究员, 主要从事气候变化影响与适应研究。

E-mail: liuyujie@igsrr.ac.cn

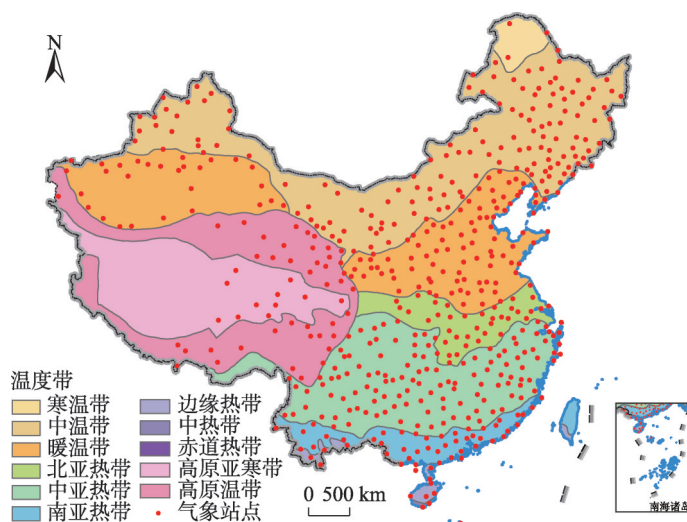
于1901-2010年全球历史站点观测数据及CMIP 5模式模拟数据,分析年最大单日降水深度(R_{1day})变化,结果观测与模拟数据均显示在研究期间 R_{1day} 总体呈上升趋势。Li等^[6]根据极端指数研究新加坡极端降水的变率和趋势,结果显示,受气候变化影响,极端降水频率和强度将显著增加。由于我国地域辽阔,且受典型季风气候影响,降水时空分异明显。因此,在研究区选择上,已有研究多聚焦区域尺度^[7-9];在季节上,对夏季降水变化研究较多^[10-11]。而在地表干湿状况的研究中,多整体分析干湿状况时空特征^[12-14],针对关键气候要素对地表干湿状况影响的量化研究相对欠缺。考虑到目前研究存在的不足,开展气候变化背景下近几十年中国年降水量时空特征分析及对地表干湿状况影响的研究是十分必要的。

因此,本文采用全国542个气象站点1961-2010年地面气象观测资料,在中国生态地理区域系统框架下,以温度带为基本单位,分析过去50年间降水变化趋势与空间分异特征;构建干湿指数,分析我国地表干湿状况时空格局;在此基础上,采用敏感性与贡献度分析,定量评估降水对干湿状况的影响。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

由于中国国土范围广阔,地域差异极大。为了更好地反映不同区域降水及地表干湿状况的空间差异,本文采用中国生态地理区域系统框架,分别评估不同生态地理区域的降水和干湿状况空间格局。中国生态地理区域系统采用与自然地域分异规律相适应的原则,按照地表地势特点和地貌结构的差异、温度水分状况的不同组合及地带性植被和土壤类型进行划分,将全国分为11个温度带(图1)^[15]。本文以温度带为基本单位,分析中国降水时空变化特征及对地表干湿状况影响。



注:本图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)1569号的标准地图制作,底图无修改,下同。

图1 中国生态地理区域

Fig. 1 Eco-geographic regional system of China

1.2 数据来源

采用1961-2010年542个地面气象观测站的逐月实测数据,数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。要素包括各站点经纬度、海拔高度、降水、最高和最低气温、风速、相对湿度和日照时数,站点分布见图1。

1.3 研究方法

1.3.1 干湿指数

干湿指数是表征一个地区干湿程度的指标,常用的干湿指标包括以下几种:(1)以降水量作为干湿指数的代用指标;(2)基于温度与降水计算,如de Martonne指数;(3)基于积温计算,如Selianinov指数;(4)基于辐射计算,如Budyko指数与Kira指数;(5)基于降水与参考蒸散量计算^[16]。其中,以降水量为代用指标的方法只考虑了水分收入,未考虑水分支出,而基于温度、辐射、积温等单一气象因子计算的方法也无法如实反映水分盈亏。当前,以降水与参考蒸散量计算干湿指数的方法在国际上较为流行,该方法同时考虑水分收入与支出,能定量说明水分盈亏^[17]。按照计算可能蒸散量的方法不同,可以分为Thornthwaite^[18]和Penman-Monteith^[19]方法等。相对于Thornthwaite公式仅考虑热力因子对蒸散的影响,Penman-Monteith公式同时考虑了热力和动力作用,计算合理,有较好的物理学意义,因此在干旱区与湿润区计算的参考蒸散量都与实测值较为符合,适用于我国不同气候类型地区参考蒸散量的计算^[20]。本文参考Vysotskii模型,将干湿指数 I_a 定义为湿润指数的倒数,即蒸散与降水的比值:

$$I_a = ET_o / P \quad (1)$$

式中: ET_o 为参考蒸散量; P 为降水。 ET_o 的计算采用联合国粮农组织(FAO)推荐并修订的Penman-Monteith修正模型^[21],即:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34)u_2} \quad (2)$$

式中: T 为平均气温; γ 为干湿常数; Δ 为饱和水汽压曲线斜率; e_s 为饱和水汽压; e_a 为实际水汽压; R_n 为净辐射; G 为土壤热通量($G=0$); u_2 为2 m高处的风速。各项指标具体计算过程如下:

平均气温:

$$T = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \quad (3)$$

式中: T_{\max} 为最高气温; T_{\min} 为最低气温。

干湿常数:

$$\gamma = \frac{c_p P}{\epsilon \lambda} = 0.665 \times 10^{-3} P \quad (4)$$

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \quad (5)$$

式中: P 为大气压; z 为站点的海拔高度; $c_p = 1.013 \times 10^{-3}$ 为恒压下的比热; $\epsilon = 0.622$ 为水蒸气/干燥空气的分子量比例; $\lambda = 2.45$ 为蒸发潜热。

饱和水汽压曲线斜率:

$$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 \exp \left(\frac{17.27T}{T+237.3} \right) \right]}{(T+237.3)^2}$$

(6)

饱和水汽压和实际水汽压:

$$e^o(T_{\max}) = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27T_{\max}}{T_{\max} + 237.2} \right]$$

(7)

$$e^o(T_{\min}) = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27T_{\min}}{T_{\min} + 237.2} \right]$$

(8)

$$e_s = \frac{e^o(T_{\max}) + e^o(T_{\min})}{2}$$

(9)

$$e_a = e_s \times rh$$

(10)

式中: $e^o(T_{\max})$ 为最高温度下的饱和水汽压; $e^o(T_{\min})$ 为最低温度下的饱和水汽压; rh 为相对湿度。

净辐射:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

(11)

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s$$

(12)

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{\max,K}^4 + T_{\min,K}^4}{2} \right] \left((0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \right)$$

(13)

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a$$

(14)

$$R_{so} = (a_s + b_s) R_a$$

(15)

$$R_a = \frac{12(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)]$$

(16)

式中: R_{ns} 为净短波辐射; R_{nl} 为净长波辐射; $\alpha=0.23$ 为反照率; R_s 为太阳辐射; R_{so} 为晴空辐射; $\sigma=4.903 \times 10^{-9}$ 为史蒂芬—波兹曼常数; $T_{\max,K}$ 为最高绝对温度; $T_{\min,K}$ 为最低绝对温度; a_s 和 b_s 为辐射项系数; $\frac{n}{N}$ 为相对日照时长; R_a 为地外辐射; $G_{sc}=0.0820$ 为太阳常数; d_r 为反向日地相对距离; ω_s 为日落时角; φ 为纬度; δ 为太阳赤纬。

在计算时, 基于逐月气象资料计算逐月潜在蒸散量, 经过累加得到年降水量与年蒸散量, 在此基础上计算逐年干湿指数。根据 Vysotskii 定义, 与干湿指数 I_a 相对应的干湿状况如表 1 所示:

1.3.2 显著性检验

Mann-Kendall (M-K) 法是一种气候诊断与预测技术, 是世界气象组织推荐并已广泛应用的非参数统计方法^[22]。该方法可以判断气候序列中是否存在气候突变, 如果存在, 可确定出突变发生的时间。M-K 检验法也常用于气候变化影响下的降水、干旱变化

表 1 干湿指数等级划分

Table 1 Grade standard divided for I_a

I_a	干湿类型
≤ 0.99	湿润
1.00~1.49	半湿润
1.50~3.99	半干旱
≥ 4.00	干旱

趋势检测^[23-24]。本文采用M-K趋势检验法对降水及干湿状况的时间序列进行计算,检验降水及干湿状况变化趋势的显著性水平。当M-K的统计量 $Z>0$ 时,表示时间序列呈上升趋势; $Z<0$,表示时间序列呈下降趋势;当 $|Z|>1.96$ 时,通过0.05显著性水平检验;当 $|Z|>2.576$ 时,通过0.01显著性水平检验。本文采用0.05显著性水平对各站点进行趋势检验,得出每个站点M-K的统计量 Z 值,在ArcMap中运用IDW(反距离权重插值法)进行插值,得出M-K趋势检验空间分布。

1.3.3 敏感性分析

依据Beven^[25]基于偏导数的敏感性分析方法来计算干湿指数对降水变化的敏感性,考虑到降水与干湿指数的变化范围与量纲差异,将偏导数进行无量纲转化,即干湿指数变化率与降水变化率的比值。

$$S_p = \lim_{\Delta P \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta I_a / I_a}{\Delta P / P} \right) = \frac{\Delta I_a}{\Delta P} \times \frac{P}{I_a} \quad (17)$$

式中: S_p 表示敏感系数; I_a 、 ΔI_a 分别为干湿指数及其变化量; P 、 ΔP 分别为降水及其变化量。若 $S_p>0$,表示干湿指数与降水为正相关,即干湿指数随降水量的增加而增大,反之则干湿指数与降水为负相关; S_p 的绝对值越大,表示干湿指数对降水变化的敏感性越大。

1.3.4 贡献度分析

参考前人研究对贡献度的定义,某一气象要素的贡献率为该因子的多年相对变化率与敏感系数的乘积^[26],因此,降水对干湿指数的贡献度为:

$$C_p = \frac{\Delta P}{\bar{P}} \times S_p = \frac{n \times Tre_p}{\bar{P}} \times S_p \quad (18)$$

式中: C_p 为降水对干湿指数的贡献率; n 为研究年限; Tre_p 为研究时段内各站点降水变化趋势斜率,可由最小二乘法拟合得到; \bar{P} 为多年平均年降水量; S_p 为敏感系数。本文研究时段为1961-2010年,因此 n 取值为50。若 $C_p>0$,表示降水变化引起干湿指数增大,反之则引起干湿指数减小, C_p 绝对值越大,表示降水对干湿指数变化贡献度越大。

2 结果分析

2.1 降水时空变化格局

2.1.1 时间变化趋势

1961-2010年间,全国及各温度带年降水量变化趋势如图2所示。50年间,在全国范围内,降水呈轻微增加趋势,平均速率为0.049 mm/a。但不同地区降水变化存在较大差异,青藏高原、西北内陆和南方沿海地区(高原亚寒带、高原温带、北亚热带、南亚热带、中热带)以增加趋势为主,其中中热带增加趋势最为明显,平均上升速率分别为8.16 mm/a;东北、华北和南方内陆地区(寒温带、中温带、暖温带、中亚热带、边缘热带、赤道热带)以减少趋势为主,其中暖温带和赤道热带的减少较为明显,平均速率分别为-1.17 mm/a和-1.97 mm/a。在所有温度带的年降水量变化线性拟合中,仅暖温带、中热带及高原温带通过0.05显著性水平检验。

对各站点1961-2010年年降水量时间序列进行M-K趋势检验分析,得到降水变化显著性检验空间分布(图3)。结果表明,我国年降水量变化具有明显空间分异性,大部分

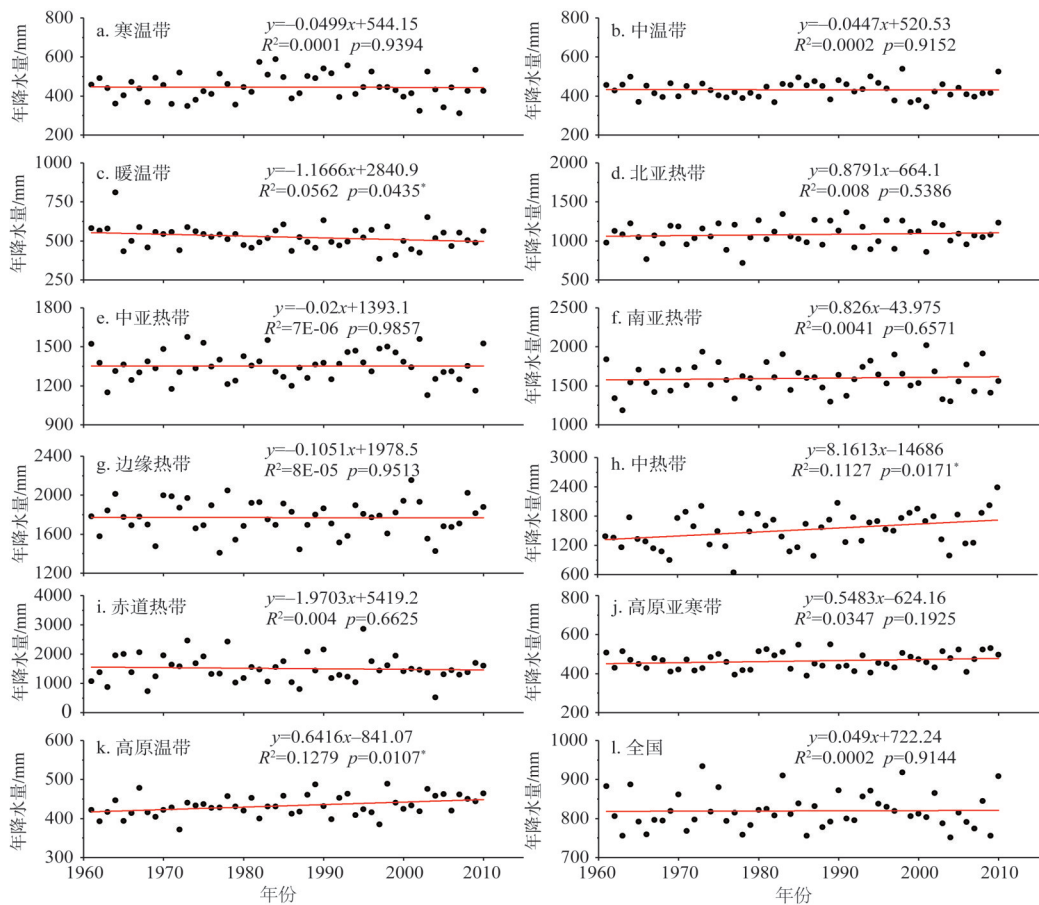


图2 1961-2010年中国年降水量时间序列及线性拟合

Fig. 2 Time series and linear fitting of annual precipitation in China from 1961 to 2010

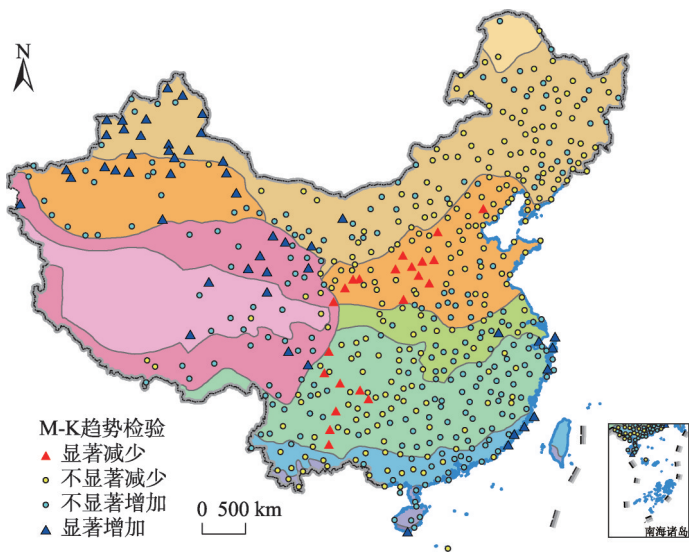


图3 1961-2010年中国年降水量趋势检验

Fig. 3 Annual precipitation M-K test results (Z) distributed across China for 1961-2010

站点降水变化未通过显著性检验。青藏高原（高原亚寒带、高原温带）、西北内陆地区（中温带西部、暖温带西部）及东部季风区（亚热带、热带）沿海地区以增加趋势为主，东北、华北地区（寒温带、中温带中部与东部、暖温带东部）及南方（亚热带、热带）内陆地区以减少趋势为主。其中，中温带西部、暖温带西北部、高原亚寒带东部、高原温带东部和亚热带、热带沿海地区共49个站点通过显著性检验，年降水呈显著增加趋势；暖温带东部内陆及中亚热带内陆地区共22个站点通过显著性检验，呈显著减少趋势。

2.1.2 降水空间分异

1961-2010年全国多年平均降水量为819.61 mm。就空间格局而言（图4a），年降水量由东南沿海向西北内陆逐渐递减。亚热带、热带地区年降水量大多超过800 mm，而中温带中西部、暖温带西部、高原温带北部与高原亚寒带西北部多年平均降水量不足200 mm，其他地区降水范围在200~800 mm之间。对比不同温度带降水量气候态特征可知（图4b），亚热带（北亚热带、中亚热带、南亚热带）和热带（边缘热带、中热带、赤道热带）地区降水量年际变化明显高于其他地区，由于这些地区降水主要受夏季风影响，而夏季风不稳定，在不同年份间强弱差异较大，因此降水年际变化大，非季风区（如高原亚寒带、高原温带等）降水年际变化相对较小。

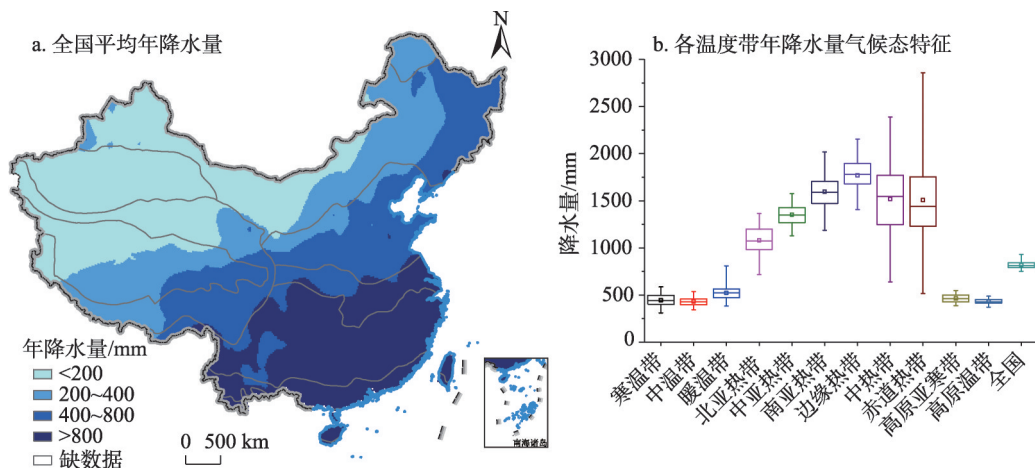


图4 1961-2010年中国年降水量空间格局

Fig. 4 Spatial pattern of annual precipitation in China during 1961-2010

2.2 干湿时空分异

1961-2010年间，全国及各温度带干湿变化线性拟合结果见表2。由干湿指数定义可知，时间序列呈上升趋势表明地表呈干旱化趋势，反之时间序列呈下降趋势表明地表呈湿润化趋势。结果显示，除寒温带、边缘热带及赤道热带呈上升趋势外，其他温度带均呈现不同程度的下降趋势，其中，中温带和高原温带的下降趋势通过0.05显著性水平检验。对各站点1961-2010年干湿指数 I_a 的M-K趋势检验结果表明（图5a），过去50年间我国干湿状况变化存在显著空间差异性，中温带西部、暖温带西部、高原亚寒带、高原温带、亚热带与热带地区以湿润化趋势为主，其中，中温带与暖温带西部、高原亚寒带与高原温带东部及亚热带沿海地区共46个站点通过显著性检验；寒温带、中温带与暖温带东部及中亚热带西部地区主要呈现干旱化趋势，其中，共24个站点通过显著性检验。

表2 1961-2010年各温度带干湿变化趋势统计分析

Table 2 Statistical analysis of dry-wet trend in each temperature zone from 1961 to 2010

温度带	斜率	截距	R^2	显著性检验 P 值
寒温带	2.97×10^{-3}	-4.70	0.04	0.18
中温带	-7.27×10^{-4}	4.32	5.95×10^{-4}	0.87
暖温带	-0.01	24.15	0.03	0.20
北亚热带	-1.69×10^{-3}	4.16	0.03	0.26
中亚热带	-6.01×10^{-4}	1.86	0.02	0.34
南亚热带	-7.99×10^{-4}	2.27	0.01	0.41
边缘热带	2.49×10^{-4}	0.17	2.16×10^{-3}	0.75
中热带	-5.86×10^{-3}	12.52	0.09	0.03*
赤道热带	1.21×10^{-3}	-1.48	2.40×10^{-3}	0.74
高温亚寒带	-6.58×10^{-4}	3.22	1.80×10^{-3}	0.77
高原温带	-0.02	52.16	0.10	0.03*
全国	-9.27×10^{-3}	21.84	0.04	0.19

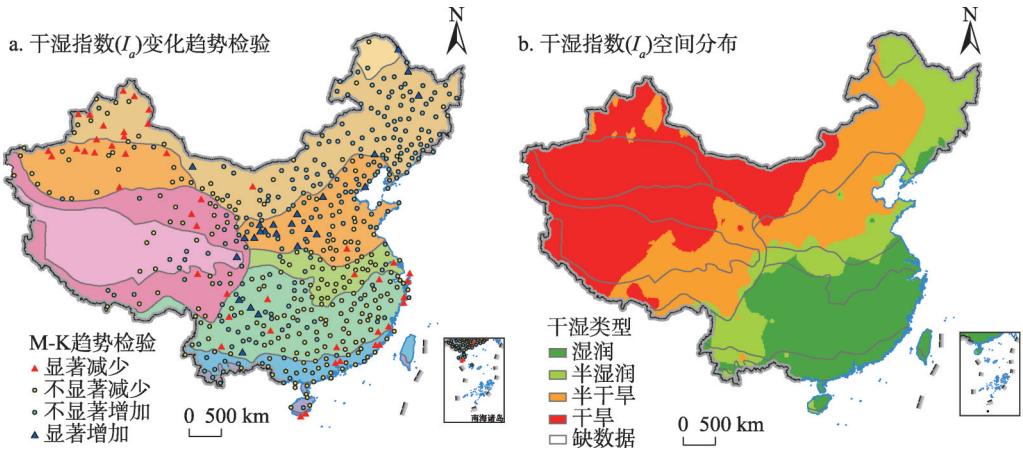


图5 1961-2010年中国地表干湿状况时空分异
Fig. 5 Spatiotemporal variation of dry-wet conditions in China during 1961-2010

总体而言，通过显著性检验的站点较少，占有所有站点的12.92%。

将各站点1961-2010年多年平均干湿指数数据进行空间插值，得到全国干湿指数空间分布（图5b）。结果显示，干湿指数由东南沿海向西北内陆逐渐递增，干湿类型由湿润向干旱类型过渡。其中，北亚热带东部、中亚热带、南亚热带及热带地区为湿润类型；寒温带、中温带西部、暖温带南部、北亚热带西部及中亚热带西部为半湿润类型；中温带中部、暖温带东部、高原亚寒带东部及高原温带东部为半干旱类型；中温带中西部、暖温带西部、高原亚寒带西部及高原温带西部为干旱类型。

2.3 降水对地表干湿状况的影响

2.3.1 敏感性分析

将各站点1961-2010年多年平均敏感系数数据进行空间插值，得到全国干湿指数对降水量年平均敏感系数空间分布（图6）。根据敏感性定义，当敏感系数为正时，表明干湿

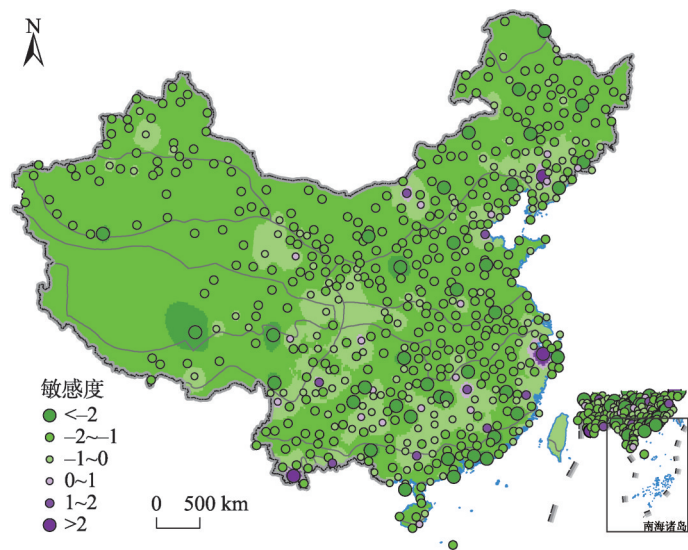


图6 1961-2010年中国干湿指数 (I_a) 对降水年平均敏感系数空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of mean annual sensitivity coefficient of I_a to precipitation in China during 1961-2010

指数与降水正相关,反之则干湿指数与降水负相关。结果显示,在全国范围内,大多数地区敏感系数为负值,表明干湿指数和降水呈负相关性,即降水量增加引起干湿指数减小,地表呈湿润化趋势。各温度带敏感系数统计结果表明(表3),所有温度带多年平均敏感系数均小于0,且除中亚热带外,所有温度带敏感系数均值都小于-1。在所有站点中,敏感系数范围为-6.18~5.89,均值为-1.13,其中敏感系数小于0的站点为514个,占有所有站点95%。比较敏感系数绝对值可知,全国多数地区 $|S_p|>1$,在所有温度带中,仅中亚热带中西部、中温带

2.3.2 贡献度分析

表3 1961-2010年各温度带干湿指数对降水年平均敏感系数统计

Table 3 Statistics of mean annual sensitivity coefficient of I_a to precipitation in each temperature zone during 1961-2010

温度带	多年平均值	年际标准差
寒温带	-1.13	0.80
中温带	-1.09	0.64
暖温带	-1.21	0.58
北亚热带	-1.12	0.80
中亚热带	-0.94	0.83
南亚热带	-1.42	1.29
边缘热带	-1.28	1.16
中热带	-1.07	1.10
赤道热带	-1.04	0.93
高温亚寒带	-1.03	0.71
高原温带	-1.04	0.76

东部地区及暖温带、北亚热带与高原亚寒带、高原温带交界地区 $|S_p|<1$,多位于地表干湿过渡带(半湿润和半干旱区),这表明地表干湿状况对降水变化的响应较为敏感。

图7显示了1961-2010年中国降水对地表干湿状况的贡献度空间分布。由贡献度定义可知,当 $C_p>0$ 时,表示降水的变化引起干湿指数增大,为正贡献,反之则为负贡献。结果表明,降水对地表干湿状况的影响在空间上呈现显著的地带性分布,其中,南方沿海地区(亚热带东部及热带)、西北内陆及青藏高原地区(中温带、暖温带西部及高原亚寒带、高原温带)为负贡献,东北、华北及南方内陆地区(寒温带、温带东部及亚热带

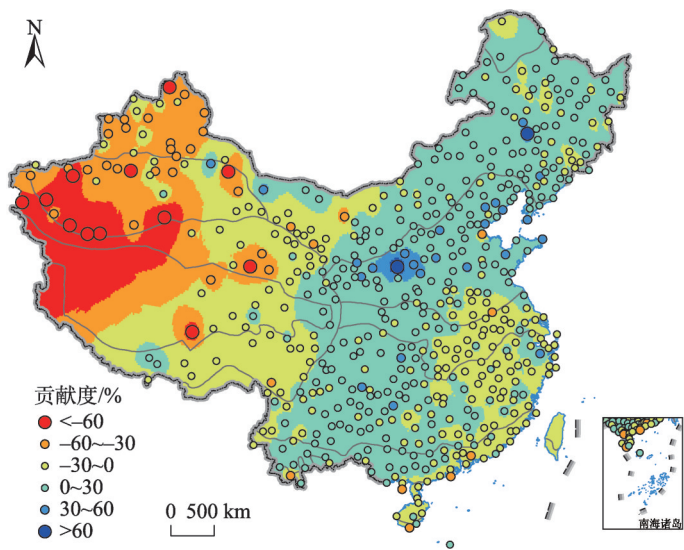


图7 1961-2010年中国降水对于干湿指数年平均贡献度空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of mean annual contribution to I_a of precipitation in China during 1961-2010

中西部)为正贡献。统计各温度带平均贡献度可知(表4),边缘热带、中热带、高原亚寒带与高原温带的降水贡献度明显高于其他地区,区域平均贡献度绝对值超过10%。结合干湿指数对降水的敏感性(图6)以及过去50年全国降水变化趋势(图3)分析可知,年降水量呈增加趋势的区域,降水对地表干湿状况起负贡献,而年降水量呈下降趋势的地区主要起正贡献。就贡献度绝对值空间分布而言,西北及青藏高原地区降水贡献度明显大于东部地区,其中暖温带西南部、高原亚寒带与高原温带西部地区贡献度超过60%,这表明干旱地区降水的贡献度明显高于其他地区。统计各站点的贡献度绝对值可知,多数站点降水的贡献率超过15%,其中超过20%的站点占有所有站点的37%。考虑到干湿指数受到降水、气温、辐射、风速、相对湿度等多种气象要素及其相互作用的共同影响,可知降水是影响地表干湿状况的主导因素之一,尤其是在水分短缺的内陆干旱地区。

表4 1961-2010年各温度带降水对于干湿指数年平均贡献度统计

Table 4 Statistics of mean annual contribution to I_a of precipitation in each temperature zone during 1961-2010

温度带	区域平均值/%	标准差
寒温带	0.16	0.14
中温带	-1.97	0.19
暖温带	7.80	0.28
北亚热带	-3.60	0.08
中亚热带	1.03	0.14
南亚热带	-2.03	0.11
边缘热带	-11.61	0.20
中热带	-18.08	0.18
赤道热带	6.82	0
高温亚寒带	-17.51	0.28
高原温带	-15.19	0.21

3 结论与讨论

3.1 结论

本文基于1961-2010年气象站点地面观测数据,分析降水及地表干湿状况时空格局,

采用敏感性和贡献度分析,定量评估降水对干湿状况的影响,得到以下主要结论:

(1) 过去50年间我国年降水量呈轻微增加趋势,但不同温度带的空间差异性明显,其中,青藏高原(高原亚寒带,高原温带)、西北(中温带西部、暖温带西部)和南方地区(亚热带、热带)降水呈增加趋势,东北(寒温带、中温带东部)、华北地区(中温带中东部、暖温带东部)呈减少趋势。就地表干湿状况而言,华北和东北地区以干旱化趋势为主,西北、青藏高原及南方地区主要呈湿润化趋势。

(2) 地表干湿状况对降水变化的响应较为敏感(全国多年平均 S_p 为-1.13),干湿指数和降水呈负相关关系,降水量的增加会引起干湿指数减小,地表呈湿润化趋势。

(3) 降水是影响地表干湿状况的主导因素之一,在水分短缺的西北内陆及青藏高原干旱地区,降水对地表干湿状况的贡献度尤为明显,局部地区超过60%。

3.2 讨论

气候变化对降水、蒸散等都会产生明显影响,最终导致地表干湿状况的变化。本文分析了我国过去50年间降水与干湿指数的时空变化,并采用敏感性与贡献度分析定量评估降水变化对地表干湿状况的影响。在降水和地表干湿状况空间格局方面,本文所得研究结果与前人大致相同,即降水的空间分布由东南沿海向西北内陆逐渐递减,地表干湿类型由湿润向干旱类型过渡^[27-29]。在降水和干湿状况变化趋势研究中,华北和东北地区降水以减少为主,呈现干旱化趋势;西北、青藏高原及南方地区降水以增加为主,地表呈湿润化趋势,这与部分已有研究结果相似^[30-32],但一些区域性的研究分析结果与本文存在差异,如Song等^[33]研究认为,近30年东北地区降水有较强的增加趋势,Deng等^[34]研究表明1959-2012年间华南沿海地区干湿指数有所增加,干旱有加重趋势。研究结果存在差异的原因可能是选取的研究时段不同,采用的气象站点数据不同、构建的地表干湿状况指标的差异等。干湿状况对降水变化的敏感性分析结果表明,在全国范围内,干湿指数和降水呈现负相关,降水量的增加会引起干湿指数减小,地表呈湿润化趋势,干湿状况对降水变化的响应较为敏感,其中过渡地带(半湿润、半干旱地区)部分区域敏感系数小于其他地区,这与前人研究所得结论一致^[35]。其原因是处于过渡地带的地区,地表干湿状况更为复杂,对除降水外的其他要素的敏感性更高。降水对干湿状况的贡献度研究表明,年降水量呈增加趋势的区域,降水对地表干湿状况起负贡献,降水量呈下降趋势的地区主要起正贡献,在全国范围内,降水对干湿指数变化贡献度较高,是影响地表干湿状况的主导因素之一,这与前人研究结果吻合,如苑全治等^[36]研究表明,1961-2015年中国陆地大部分地区气候干湿变化的第一主导因子是年降水量。在水分短缺的西北内陆及青藏高原干旱地区,降水对地表干湿状况的贡献度尤为明显,局部地区超过60%。

需要指出的是,受选取的研究时段影响,本文所采用的气象站点较少,且站点空间分布不均衡,西部的气象站点数明显少于东部地区,因此在进行降水和干湿指数空间插值时误差大于东部地区。此外,在研究内容方面,本文主要探讨降水时空变化及其对干湿状况的影响,而根据干湿指数的定义可知,地表干湿状况还受到除降水外诸多要素影响,如气温,相对湿度,辐射,风速等,本文研究结果也显示,半湿润与半干旱部分地区干湿指数对降水变化的敏感性低于湿润和干旱地区,这表明这些地区干湿指数受其他因素的影响较大。因此,在未来的研究中,需要开展其他要素对地表干湿状况影响的定量评估,深入了解不同气候因子对干湿的影响过程与机制,分析地表干湿状况对不同要素的敏感性及各要素对地表干湿状况变化的贡献度。

参考文献(References):

- [1] 吴绍洪, 尹云鹤, 樊杰, 等. 地域系统研究的开拓与发展. 地理研究, 2010, 29(9): 1538-1545. [WU S H, YIN Y H, FAN J, et al. Retrospect and prospect of regionalization system of China. *Geographical Research*, 2010, 29(9): 1538-1545.]
- [2] 刘昌明. 中国农业水问题: 若干研究重点与讨论. 中国生态农业学报, 2014, 22(8): 875-879. [LIU C M. Agricultural water issues in China: Discussions on research highlights. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(8): 875-879.]
- [3] BHUTIYANI M R, KALE V S, PAWAR N J. Climate change and the precipitation variations in the Northwestern Himalaya: 1866-2006. *International Journal of Climatology*, 2010, 30(4): 535-548.
- [4] VILLAFUERTE M Q, MATSUMOTO J. Significant influences of global mean temperature and ENSO on extreme rainfall in Southeast Asia. *Journal of Climate*, 2015, 28(5): 1905-1919.
- [5] ASADIEH B, KRAKAUER N Y. Global trends in extreme precipitation: Climate models vs observations. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, 2015, 11(11): 11369-11393.
- [6] LI X, WANG X, BABOVIC V. Analysis of variability and trends of precipitation extremes in Singapore during 1980-2013. *International Journal of Climatology*, 2018, 38(1): 125-141.
- [7] 李双双, 杨赛霓, 刘宪锋. 1960-2013 年秦岭—淮河南北极端降水时空变化特征及其影响因素. 地理科学进展, 2015, 34(3): 354-363. [LI S S, YANG S N, LIU X F. Spatiotemporal variability of extreme precipitation in north and south of the Qinling-Huaihe region and influencing factors during 1960-2015. *Progress in Geography*, 2015, 34(3): 354-363.]
- [8] HUANG J, LIU F, XUE Y, et al. The spatial and temporal analysis of precipitation concentration and dry spell in Qinghai, Northwest China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2015, 29(5): 1403-1411.
- [9] ZHAO N, YUE T, LI H, et al. Spatio-temporal changes in precipitation over Beijing-Tianjin-Hebei region, China. *Atmospheric Research*, 2018, 202: 156-168.
- [10] 王庆, 马倩倩, 夏艳玲, 等. 最近 50 年来山东地区夏季降水的时空变化及其影响因素研究. 地理科学, 2014, 34(2): 220-228. [WANG Q, MA Q Q, XIA Y L, et al. Spatial-temporal variations and influential factors of summer precipitation in Shandong region during the last 50 years. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(2): 220-228.]
- [11] HE C, LIN A, GU D, et al. Interannual variability of Eastern China summer rainfall: The origins of the meridional triple and dipole modes. *Climate Dynamics*, 2017, 48(1-2): 683-696.
- [12] 王利平, 文明, 宋进喜, 等. 1961-2014 年中国干燥度指数的时空变化研究. 自然资源学报, 2016, 31(9): 1488-1498. [WANG L P, WEN M, SONG J X, et al. Spatial-temporal variation of aridity index during 1961-2014 in China. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(9): 1488-1498.]
- [13] DU J, FANG J, XU W, et al. Analysis of dry/wet conditions using the standardized precipitation index and its potential usefulness for drought/flood monitoring in Hunan province, China. *Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*, 2013, 27(2): 377-387.
- [14] 苏秀程, 王磊, 李奇临, 等. 近 50 a 中国西南地区地表干湿状况研究. 自然资源学报, 2014, 29(1): 104-116. [SU X C, WANG L, LI Q L, et al. Study of surface dry and wet conditions in Southwest China in recent 50 years. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(1): 104-116.]
- [15] 郑度. 中国生态地理区域系统研究. 北京: 商务印书馆, 2008: 6-31. [ZHENG D. Study of China's Eco-geographical Region System. Beijing: The Commercial Press, 2008: 6-31.]
- [16] 孟猛, 倪健, 张治国. 地理生态学的干燥度指数及其应用评述. 植物生态学报, 2004, 28(6): 853-861. [MENG M, NI J, ZHANG Z G. Aridity index and its applications in geo-ecological study. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(6): 853-861.]
- [17] 徐羽, 吴艳飞, 徐刚, 等. 长三角地区地表干湿状况及极端干湿事件特征研究. 自然资源学报, 2017, 32(9): 1579-1590. [XU Y, WU Y F, XU G, et al. Characteristics of surface humidity and extreme drought/wet events in Yangtze River Delta. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(9): 1579-1590.]
- [18] THORNTHWAITE C W. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 1948, 38(1): 55-94.
- [19] PENMAN H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1948, 193(1032): 120-145.
- [20] 刘珂, 姜大膀. 基于两种潜在蒸散发算法的 SPEI 对中国干湿变化的分析. 大气科学, 2015, 39(1): 23-36. [LIU K, JI-

- ANG D B. Analysis of dryness/wetness over China using standardized precipitation evapotranspiration index based on two evapotranspiration algorithms. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2015, 39(1): 23-36.]
- [21] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements: FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO. Rome, 1998, 300(9): D05109. <http://www.fao.org/3/X0490E/X0490E00.htm>.
- [22] HAMED K H. Exact distribution of the Mann-Kendall trend test statistic for persistent data. *Journal of Hydrology*, 2009, 365(1-2): 86-94.
- [23] ZHAI L, FENG Q. Spatial and temporal pattern of precipitation and drought in Gansu province, Northwest China. *Natural Hazards*, 2009, 49(1): 1-24.
- [24] ZARCH M A A, SIVAKUMAR B, SHARMA A. Droughts in a warming climate: A global assessment of standardized precipitation index (SPI) and reconnaissance drought index (RDI). *Journal of Hydrology*, 2015, 526: 183-195.
- [25] BEVEN K. A sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates. *Journal of Hydrology*, 1979, 44(3-4): 169-190.
- [26] 胡琦, 董蓓, 潘学标, 等. 1961-2014 年中国干湿气候时空变化特征及成因分析. *农业工程学报*, 2017, 33(6): 124-132. [HU Q, DONG B, PAN X B, et al. Spatiotemporal variation and causes analysis of dry-wet climate over period of 1961-2014 in China. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(6): 124-132.]
- [27] HE B, LYU A, WU J, et al. Drought hazard assessment and spatial characteristics analysis in China. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 21(2): 235-249.
- [28] 任国玉, 战云健, 任玉玉, 等. 中国大陆降水时空变异规律: I 气候学特征. *水科学进展*, 2015, 26(3): 299-310. [REN G Y, ZHAN Y J, REN Y Y, et al. Spatial and temporal patterns of precipitation variability over mainland China: I Climatology. *Advances in Water Science*, 2015, 26(3): 299-310.]
- [29] WANG Q, WANG M, FAN X, et al. Trends of temperature and precipitation extremes in the Loess Plateau region of China, 1961-2010. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017, 129(3-4): 949-963.
- [30] WANG H, CHEN Y, CHEN Z. Spatial distribution and temporal trends of mean precipitation and extremes in the arid region, northwest of China, during 1960-2010. *Hydrological Processes*, 2013, 27(12): 1807-1818.
- [31] HUANG J, SUN S, XUE Y, et al. Spatial and temporal variability of precipitation indices during 1961-2010 in Hunan province, Central South China. *Theoretical and applied climatology*, 2014, 118(3): 581-595.
- [32] 张彦龙, 刘普幸. 基于 AI 指数的新疆干湿时空变化及其影响因素分析. *自然资源学报*, 2016, 31(4): 658-671. [ZHANG Y L, LIU P X. Study on temporal and spatial variation of the dry-wet and its influence factors in Xinjiang based on aridity index. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(4): 658-671.]
- [33] SONG X, SONG S, SUN W, et al. Recent changes in extreme precipitation and drought over the Songhua River Basin, China, during 1960-2013. *Atmospheric Research*, 2015, 157: 137-152.
- [34] DENG S, CHEN T, YANG N, et al. Spatial and temporal distribution of rainfall and drought characteristics across the Pearl River basin. *Science of the Total Environment*, 2018, 619-620: 28-41.
- [35] 刘畅. 1961-2015 年中国陆地干湿变化特征及成因分析. 兰州: 兰州大学, 2017. [LIU C. Spatiotemporal variation of aridity in China during 1961-2015. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.]
- [36] 苑全治, 吴绍洪, 戴尔阜, 等. 1961-2015 年中国气候干湿状况的时空分异. *中国科学: 地球科学*, 2017, 47(11): 1339-1348. [YUAN Q Z, WU S H, DAI E F, et al. Spatial-temporal variation of the wet-dry conditions from 1961 to 2015 in China. *Science China Earth Science*, 2017, 47(11): 1339-1348.]

Spatiotemporal variation of precipitation in China and its impact on surface dry-wet conditions during 1961-2010

CHEN Jie^{1,2}, LIU Yu-jie^{1,2}, PAN Tao¹, WU Shao-hong^{1,2}, TAN Qing-hua^{1,2},
GE Quan-sheng^{1,2}, LIU Yan-hua^{1,2}

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences (UCAS), Beijing 100049, China)

Abstract: Studying the spatiotemporal variation of precipitation in China under the background of climate change and its impact on surface dry-wet conditions is of great significance in revealing the dynamic responses and changes of land surface systems to climate change and disaster prevention and mitigation. Based on measured meteorological data from 1961 to 2010, the spatiotemporal variations of precipitation and surface dry-wet conditions were analyzed. Furthermore, sensitivity and contribution analysis were used to quantify the impact of precipitation on dry-wet conditions. Results showed that the annual precipitation in national scale showed a slight increasing trend over the past 50 years, but the variations of annual precipitation in different temperature zones were significant, the Qinghai-Tibet Plateau (Plateau sub-cold zone and Plateau temperate zone), the northwestern (the west of both Medium temperate zone and Warm temperate zone) and southern regions of China (Subtropical zone and Tropical zone) showed an increasing trend, while the northeastern (Cold temperate zone and the east of Medium temperate zone) and northern regions of China (middle and east of Medium temperate zone and east of Warm temperate zone) showed a decreasing trend. In terms of dry-wet conditions, it varied greatly in different regions, the northern and northeastern regions of China got dried while the Qinghai-Tibet Plateau, the northwestern and the southern regions got wet. The dry-wet conditions were sensitive to the change of precipitation (mean annual sensitivity coefficient: -1.13). The dry-wet index was negatively correlated with precipitation. In the inland arid regions, precipitation contributed more to the change of dry and wet conditions than that in humid regions, and some of the regions exceeded 60%.

Keywords: precipitation; dry-wet condition; climate change; spatiotemporal variation; sensitive analysis; contribution analysis