

# 江南丘陵地区湿润指数变化特征及敏感性分析

刘燕<sup>1</sup>, 刘友存<sup>1</sup>, 边晓辉<sup>1,2</sup>, 焦克勤<sup>3</sup>, 陈明<sup>1</sup>, 侯兰功<sup>4</sup>, 丁倩倩<sup>1,2</sup>

(1. 江西理工大学 资源与环境工程学院, 江西 赣州 341000; 2. 江西理工大学 建筑与测绘工程学院, 江西 赣州 341000;  
3. 中国科学院 西北生态环境资源研究院, 兰州 730000; 4. 西南科技大学 土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010)

**摘要:**基于江南丘陵及其周边地区69个气象站点1951—2013年的逐月降水量、月均气温、风速、日照百分率和相对湿度等数据,运用Penman-Monteith模型计算出了参考蒸散量和地表湿润指数,并结合地表湿润指数倾向率、M-K检验、ArcGIS反距离加权插值等方法,探讨了研究区地表干湿状况时空变化特征及敏感性分析。结果表明:近63 a,江南丘陵地区地表湿润指数在波动中呈现降低趋势,其10 a变化倾向率为-0.05,趋于干旱;累计距平可分为波动变化时期、高于多年平均地表湿润指数时期和低于多年平均地表湿润指数时期;地表湿润指数在1955年左右存在一个由湿变干的突变点。地表湿润指数的年代际和季节变化上,20世纪50年代最高,21世纪初最低,但不论季节还是年代际,春季最高,秋季最低。地表湿润指数的空间变化,南部和西部低,北部和东部高。地表湿润指数倾向率空间变化则是东南部较区域其他地方高,为正值,季节变化除夏季外,其他季节地表湿润指数倾向率都以负值为主。地表湿润指数与降水量、相对湿度的相关性较好,但在空间上各气象要素与地表湿润指数的季节相关性存在差异。此外,江南丘陵地区地表湿润指数与海拔存在较好的相关性,海拔越高地表湿润指数越大。

**关键词:**气候变化;湿润指数;江南丘陵;Penman-Monteith模型;敏感性分析

中图分类号:S161.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)02-0263-09

## Variation Characteristics and Sensitivity Analysis of Wetness Index in Jiangnan Hilly Areas

LIU Yan<sup>1</sup>, LIU Youcun<sup>1</sup>, BIAN Xiaohui<sup>1,2</sup>, JIAO Keqin<sup>3</sup>,  
CHEN Ming<sup>1</sup>, HOU Langong<sup>4</sup>, DING Qianqian<sup>1,2</sup>

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China; 2. School of Architectural and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China; 3. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 4. School of Civil Engineering and Architectural, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China)

**Abstract:** Based on the data of monthly precipitation, monthly mean temperature, wind speed, sunshine percentage and relative humidity of 69 meteorological stations in Jiangnan hilly area and its surrounding areas from 1951 to 2013, Penman-Monteith model was used to calculate the reference evapotranspiration and the surface wetness index, and the temporal and spatial variation characteristics and sensitivity analysis of surface wet and dry conditions in the study area were discussed by combining with the tendency index of surface wettability index, M-K test and ArcGIS inverse distance weighted interpolation. The results showed that in the recent 63 years, the surface wetness index in the Jiangnan hilly presented the fluctuating decrease trend, and the 10 years tendency of variation tended to be -0.05, which tended to be dry. The accumulated anomalies could be divided into fluctuating periods, the index period and below the multi-year mean surface wetness index period; the surface wetness index around 1955 had the wet-dry mutation point. The interdecadal and seasonal variations of the surface wetness index were the highest in the 1950s and the lowest in the early 21st

century, but the highest was in spring and the lowest was in autumn regardless of seasons or decadal periods. Spatial variability of surface wetness index was low in the south and west, high in the north and east. The spatial variability of the wetland index tended to be higher in the southeast than that in other parts of the region. The seasonally wetted tendencies of the surface wetness indices in all seasons were negative except for summer. The correlativity between surface wetness index and precipitation and relative humidity was better, but there were differences in the seasonal correlation between each meteorological factor and surface wetness index in space. In addition, there was a good correlation between the surface wetness index and the elevation in the Jiangnan hilly area. The higher the elevation is, the higher the wettability index of the surface is.

**Keywords:** climate change; wetness index; Jiangnan hilly area; Penman-Monteith model; sensitivity analysis

在全球变化背景下,温度升高所引起的气候、环境问题已经引起了人类社会的极大关注。而气候变化引起的水分状况变化,即区域的干湿状况变化不仅已成为气候学研究的热点,而且已成为农业气候学家研究的焦点问题之一<sup>[1-2]</sup>。地表湿润指数作为理想的表征地表干湿状况的物理量,其物理基础在于能够较好的体现地表水分收支分量;大气降水和参考蒸散量,而这两个量正是地表热能和水分变化的关键参量,它能客观地反映一个地区的干湿状况<sup>[3]</sup>。同时,研究湿润指数的长期变化有助于了解在全球变暖背景下气候干湿状况的演变特征及正确评价农业气候资源并合理有效进行农业气候区划。近年来,在地域分异和全球变化的研究过程中,学者们对地表干湿状况给予了特别的关注,分别对我国北方<sup>[4]</sup>、西北<sup>[5]</sup>、三江源地区<sup>[6]</sup>、新疆<sup>[7-8]</sup>、甘肃<sup>[9]</sup>、西藏<sup>[10]</sup>、青海<sup>[11]</sup>、东北<sup>[12]</sup>、广东<sup>[13]</sup>以及全国<sup>[14]</sup>等进行了研究和探讨,并取得了较好的研究成果。

江南丘陵地区主要包括洞庭湖和鄱阳湖流域,是我国重要的农业生产区,但旱灾频发且持续时间长。20 世纪 70,80 年代以及 21 世纪初洞庭湖流域发生过大小不等的农业旱灾,且不同等级的旱灾频发率较高;近 60 a 来鄱阳湖流域的旱灾频率也越来越高,给当地农业生产和社会经济发展造成巨大损失<sup>[15-16]</sup>。以前对我国西北<sup>[17]</sup>和西南地区的湿润指数研究较多,但是对我国重要的农业生产区洞庭湖和鄱阳湖流域所在的江南丘陵地区地表湿润指数变化的研究极少。因此,探讨过去 60 多年来江南丘陵地区的参考蒸散量和地表湿润状况的时空分布特征、变化趋势及其影响因素,不仅能为我国重要的农业生产区的农业生产提供科学参考,而且对认识该地区生态环境现状与过去的差异、区域的农业生产以及经济建设提供科学基础,同时为探索区域生态与自然环境的变化原因以及未来气候变化研究提供科学理论依据。

## 1 研究区概况

江南丘陵为东南丘陵的一部分,即主要为长江以南、南岭以北、武夷山以西、雪峰山以东的广大区域(25°—31°N,110°—120°E)。包括湖南省和江西省大部、湖北省东南部、安徽省南部、江苏省西南部和浙江西部的大片丘陵地区,主要位于洞庭湖和鄱阳湖两大流域,地形以 200~500 m 的低山丘陵为主(图 1)。研究区属于典型的亚热带季风气候,年均降水量为 1 200~1 800 mm,年均气温为 15~23℃,植被以亚热带常绿阔叶林为主,土壤多为典型的红壤。研究区域人口密集,经济发达,农业耕作历史悠久,是我国重要的粮食生产区。但是,江南丘陵地区的地表干湿状况极大地影响着农作物的生长<sup>[18]</sup>。

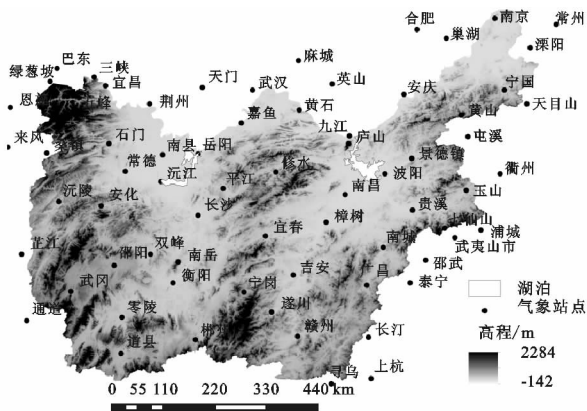


图 1 研究区气象站点分布

## 2 资料与方法

### 2.1 资料来源

本文选取江南丘陵及其周边地区的 69 个国家气象站 1951—2013 年的历史观测气象资料(表 1),资料来源于中国科学气象数据共享网(<http://cdc.cma.gov.cn/>)。主要以逐月降水量、月均气温、风速、日照百分率和相对湿度等资料,利用世界粮农组织推荐的 penman 修正公式,计算了江南丘陵地区

63 a来的湿润指数变化状况,再利用 ArcGIS 分析平

台获得参考蒸散量和湿润指数的空间分布特征,最后

用 SPSS 分析软件分析湿润指数和各气候因子以及

海拔的相关性。

表 1 江南丘陵地区气象站点

站点名称	纬度	经度	高程/m	资料序列	站点名称	纬度	经度	高程/m	资料序列
安庆	30.53N	117.05E	19.8	1951—2013 年	南昌	28.60N	115.92E	46.9	1951—2013 年
宁国	30.62N	118.98E	89.4	1957—2013 年	樟树	28.07N	115.55E	30.4	1957—2013 年
黄山	30.13N	118.15E	1840.4	1956—2013 年	贵溪	28.30N	117.22E	51.2	1953—2013 年
屯溪	29.72N	118.28E	142.7	1953—2013 年	玉山	28.68N	118.25E	116.3	1951—2013 年
绿葱坡	30.78N	110.23E	1819.3	1957—1997 年	景德镇	29.30N	117.2E	61.5	1953—2013 年
五峰	30.20N	110.67E	619.9	1958—2013 年	广昌	26.85N	116.33E	143.8	1954—2013 年
宜昌	30.70N	111.30E	133.1	1952—2013 年	桑植	29.40N	110.17E	322.2	1958—2013 年
三峡	30.87N	111.08E	139.9	1998—2005 年 2007—2008 年	石门	29.58N	111.37E	116.9	1960—2013 年
荆州	30.35N	112.15E	32.2	1954—2013 年	南县	29.37N	112.4E	36.0	1959—2013 年
天门	30.67N	113.17E	34.1	1955—2013 年	岳阳	29.38N	113.08E	53.0	1953—2013 年
武汉	30.62N	114.13E	23.1	1951—2013 年	沅陵	28.47N	110.4E	151.6	1953—2013 年
嘉鱼	29.98N	113.91E	36.0	1957—2013 年	常德	29.05N	111.68E	35	1951—1966 年 1968—2013 年
英山	30.73N	115.7E	123.8	1957—2013 年	安化	28.38N	111.22E	128.3	1955—2013 年
黄石	30.23N	115.03E	32.2	1954—2013 年	沅江	28.85N	112.37E	37	1955—2013 年
常州	31.88N	119.98E	4.4	1952—2013 年	长沙	28.20N	113.08E	44.9	1951—1986 年 2007—2013 年
溧阳	31.43N	119.48E	7.7	1953—2013 年	平江	28.72N	113.57E	106.3	1957—2013 年
天目山	30.35N	119.42E	1505.9	1956—1998 年	芷江	27.45N	109.68E	272.2	1951—2013 年
衢州	29.00N	118.90E	82.4	1951—2013 年	邵阳	27.23N	111.47E	248.6	1951—2013 年
邵武	27.33N	117.47E	218.0	1957—2013 年	双峰	27.45N	112.17E	10.0	1957—2013 年
七仙山	27.95N	117.83E	1401.9	1956—1961 年 1974—1991 年	南岳	27.30N	112.70E	1265.9	1953—2013 年
武夷山	27.77N	118.03E	222.1	1993—2013 年	通道	26.17N	109.80E	397.5	1957—2013 年
浦城	27.92N	118.53E	276.9	1951—2013 年	武冈	26.73N	110.63E	341.0	1953—2013 年
泰宁	26.90N	117.17E	342.9	1956—2013 年	零陵	26.23N	111.62E	172.6	1951—2013 年
长汀	25.85N	116.37E	310	1951—1953 年 1956—2013 年	衡阳	26.9N	112.60E	104.9	1951—2013 年
上杭	25.05N	116.42E	198	1957—2013 年	道县	25.53N	111.6E	192.2	1960—2013 年
修水	29.03N	114.58E	146.8	1953—2013 年	郴州	25.8N	113.03E	184.9	1953—2013 年
宜春	27.80N	114.38E	131.3	1953—2013 年	巴东	31.03N	110.37E	33.4	1953—2013 年
吉安	27.05N	114.92E	71.2	1952—2013 年	寻乌	24.95N	115.65E	303.9	1956—2013 年
宁冈	26.72N	113.97E	263.1	1957—1998 年 2007—2008 年	麻城	31.18N	115.02E	59.3	1959—2013 年
遂川	26.33N	114.50E	126.1	1951—2013 年	恩施	30.28N	109.5E	457.1	1951—2013 年
赣州	25.87N	115.00E	137.5	1951—2013 年	来凤	29.52N	109.4E	459.5	1953—2013 年
九江	29.73N	116.00E	36.1	1951—1991 年 2006—2008 年	南京	32N	118.8E	7.1	1951—2013 年
庐山	29.58N	115.98E	1164.5	1955—2013 年	南城	27.59N	116.65E	80.8	1953—2013 年
波阳	29N	116.68E	40.1	1955—2013 年	巢湖	31.62N	117.87E	22.4	1957—2013 年
合肥	31.78N	117.3E	27.0	1953—2013 年					

2.2 研究方法

2.2.1 参考蒸散量的计算方法 参考蒸散量作为一

个表征地表水分蒸散的物理量,计算方法很多。本文参考蒸散量的计算采用 1998 年联合国粮农组织推荐并修

订的 penman-monteith 模型来计算<sup>[19-20]</sup>,这是目前国内外学者们选用较多的计算方法。其表达式为:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \frac{900T \times U_2 \times (e_s - e_a)}{T + 273}}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

式中:  $ET_0$  为参照蒸发速率(mm/d);  $R_n$  为地表净辐射量[MJ/(m<sup>2</sup> · d)];  $G$  为土壤热通量[MJ/(m<sup>2</sup> · d)];  $T$  为平均气温(°C);  $U_2$  为 2 m 高度处的风速(m/s);  $e_s$  为饱和水汽压(kPa);  $e_a$  为实际水汽压(kPa);  $e_s - e_a$  为饱和水汽压差(kPa);  $\Delta$  为水汽压曲线斜率(kPa/°C);  $\gamma$  为湿度计常数。

净辐射的计算方法有多种<sup>[21]</sup>,本文采用的净辐射量的计算方法是净短波辐射减去净长波辐射的方法:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (2)$$

式中:  $R_{ns}$  为太阳短波辐射;  $R_{nl}$  为太阳长波辐射:

$$a_{ns} = (1 - a)[a_s + b_s \left(\frac{n}{N}\right)]R_a \quad (3)$$

式中:  $a$  为反射率,以草地为理想的参考作物其值为 0.23;  $R_a$  为天顶辐射[MJ/(m<sup>2</sup> · d)];  $n$  为实际日照时数(h);  $N$  为最大可能日照时数(h);  $a_s$  为回归常数;  $a_s + b_s$  为晴天天顶辐射到达地面部分。此处取  $a_s = 0.25$ ,  $b_s = 0.50$ 。

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin \varphi \cos \delta + \cos \varphi \sin \sigma \sin \omega_s] \quad (4)$$

式中:  $G_{sc}$  为太阳常数[MJ/(m<sup>2</sup> · min)];  $G_{sc} = 0.0820$ ;  $d_r$  为日地间相对距离的倒数;  $\omega_s$  为太阳时角(rad);  $\varphi$  为地理纬度;  $\delta$  为太阳磁偏角(rad)。

$R_{nl}$  为太阳长波辐射,太阳的长波辐射受水蒸气、温度等多种因素影响,根据 Stefan-Boltzmann 定律,本文采用的太阳长波辐射计算公式为:

$$R_{nl} = \sigma \left( \frac{T_{\max,k}^4 + T_{\min,k}^4}{4} \right) (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) [0.1 + 0.9 \left( \frac{n}{N} \right)] \quad (5)$$

式中:  $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常数[4.90 × 10<sup>-9</sup> MJ/(K<sup>4</sup> · m<sup>2</sup> · d)];  $T_{\max,k}$  为 24 小时内最高绝对温度值;  $T_{\min,k}$  为 24

小时内最低绝对温度值;  $e_a$  为实际水汽压(kPa)。

2.2.2 湿润指数的计算 地表湿润指数的计算表达式为:

$$W = P/ET_0 \quad (6)$$

式中:  $W$  为地表湿润指数;  $P$  为降水量(mm);  $ET_0$  为月最大参考蒸散量(mm)。

2.2.3 地表湿润指数倾向率 地表湿润指数倾向率是通过历年来的各气象要素数据拟合而成的直线倾向率。但为了凸显变化趋势通常将斜率乘以 10 倍,用 10 a 变化倾向率表示。本文中的地表湿润指数倾向率即为地表湿润指数 10 a 变化率,其表示公式为<sup>[22]</sup>:

$$X_i = a + bt_i \quad (7)$$

式中:  $X_i$  为湿润指数倾向率;  $a$  为回归常数;  $b$  为变化系数,以  $b$  的 10 倍作为 10 a 变化倾向率。

### 3 结果与分析

#### 3.1 地表湿润指数变化特征

3.1.1 地表湿润指数的时间变化 如图 2A 所示,63 a 来江南丘陵地区的湿润指数呈现缓慢下降的趋势,且达到了 0.01 显著性检验, ( $R^2 = 0.1138$ ,  $N = 63$ ,  $p < 0.01$ ),这也是全球变暖大背景<sup>[23]</sup>下地表变干的反映。研究区平均湿润指数为 1.51,1959 年地表湿润指数达到最高值为 2.045,在 2011 年达到最低值为 0.908。在湿润指数的距平上(图 2B)1951—1989 年湿润指数在多年平均值上下波动,1989—2000 年湿润指数基本上高于多年平均值,但 2001—2013 年湿润指数大都明显低于多年平均值。湿润指数正距平最大值的年份是 1959 年,最大正值为 0.533;湿润指数负距平最大值的年份是 2011 年,最大负值为 -0.604。说明湿润指数距平的负值变化幅度(-0.604~0)大于正值变化幅度(0~0.533),也就是说研究区地表变干加剧,变湿减缓。但是湿润指数高于多年平均值的年份(32 个)和低于多年平均值的年份接近(31 个),表明地表湿润指数在高于和低于平均值的年份上是比较稳定的。

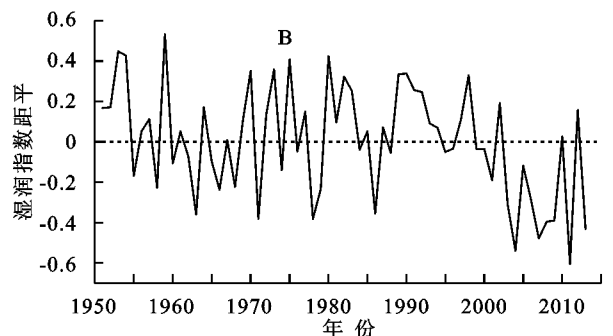
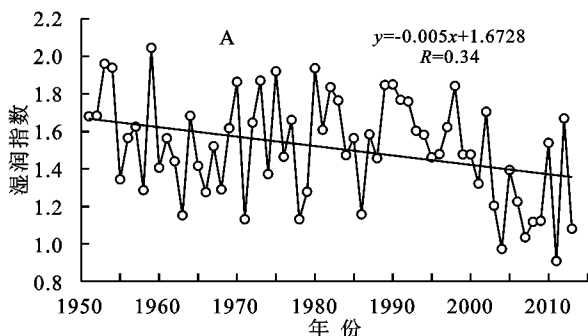


图 2 江南丘陵地区年湿润指数变化趋势和湿润指数距平

季节划分在我国南方和北方存在一定差异。本文以 12 月—翌年 2 月为冬季,3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—10 月为秋季。表 2 给出了 1951—2013 年 6 个时段的季节和年平均地表湿润指数的年代际变化,江南丘陵地区 20 世纪 50 年代地表湿润指数最高(1.63),即为湿润期,20 世纪 60 年代的地表湿润指数明显降低,70—90 年代又呈现微弱上升,但未达到 50 年代的最高值,到 21 世纪初期地表湿润指数又降低到最小值(1.21),即为干燥期。从季节上看,不论是哪个年代际,春季地表湿润指数都高于其他季

节,秋季地表湿润指数都低于其他季节。江南丘陵地区为典型的亚热带湿润性季风气候,春季降水量较多,气温较低,参考蒸散量较小,故春季湿润指数最高,地表比较湿润;秋季降水量少,气温偏高,参考蒸散量大,故湿润指数较低,地表比较干燥。春季和冬季湿润指数最大值都出现在 20 世纪 50 年代,夏季和秋季湿润指数最大值则分别出现在 20 世纪 90 年代和 20 世纪 80 年代,春、夏、秋 3 个季节的湿润指数最小值都出现在 21 世纪初,冬季湿润指数最小值则出现在 20 世纪 60 年代。

表 2 江南丘陵地区地表湿润指数年代际变化

季节	1951—1960 年	1961—1970 年	1971—1980 年	1981—1990 年	1991—2000 年	2001—2013 年
春季	2.55	2.15	2.27	2.03	2.23	1.51
夏季	1.25	1.28	1.41	1.27	1.71	1.22
秋季	0.91	1.12	0.97	1.27	0.84	0.74
冬季	1.83	1.29	1.43	1.58	1.45	1.34
年	1.63	1.46	1.52	1.54	1.56	1.21

为进一步描述湿润指数在时间上的变化,用 M-K 检验方法对近 63 a 来江南丘陵地区湿润指数进行突变分析,时间子序列为 5 a。图 3 为江南丘陵地区地表湿润指数突变分析,UF 为湿润指数的顺序统计曲线(虚曲线),UB 为湿润指数的逆序统计曲线(实曲线),并给定显著性水平  $\alpha=0.05$ ,临界线  $U=\pm 1.96$ 。从图中可以看出在 1955 年附近存在一个转折点,UF 和 UB 相交于 1955 年左右,且交点在临界线之间,1955 年以前较湿润,湿润指数较大,之后湿润指数变小,即 1955 年为显著变干的突变点。其变化趋势和图 2 中湿润指数的年变化一致。

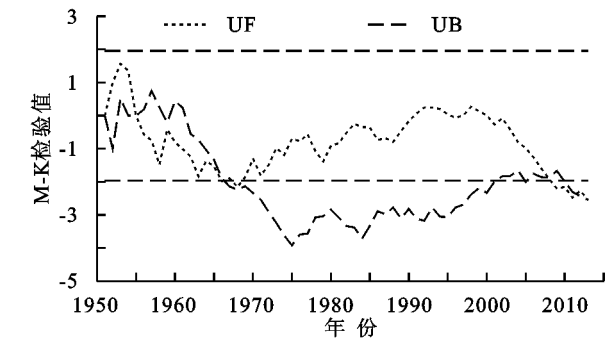


图 3 1951—2013 年江南丘陵地区地表湿润指数的 Mann-Kendall 检验

3.1.2 地表湿润指数的空间变化 通过江南丘陵地区地表湿润指数和地表湿润指数倾向率以及春夏秋冬四季湿润指数倾向率的计算和分析。并用 ArcGIS 平台进行插值分析,考虑到插值的精确性,本文选取了比较精确的反比距离插值法<sup>[24]</sup>,获得了江南丘陵地区湿润指数和湿润指数倾向率以及春夏秋冬四季湿润指数倾向率的空间分布状况(图 4)。图 4A 表示江南丘陵地区湿

润指数的空间分布,可以看出东南部和西南部湿润指数较低,地表相对于北部和东部地区干燥。湿润指数高值主要集中在东北部和北部地区,但在中部地区也存在湿润指数的高值中心,如西北部的绿葱坡,北部的嘉鱼、黄石、石门,中部的长沙、南岳以及东北部的黄山等,湿润指数达到 3.69~4.09。江南丘陵地区湿润指数倾向率空间分布比较复杂(图 4B)。研究区域内,大部分地区的湿润指数倾向率都为负值,但在中部的南岳、衡阳和东部的七仙山附近负值更为显著。只有在中南部的吉安、遂川以及东北部的宁国、天目山等部分地区为正值。表明 63 a 以来,江南丘陵地区(除少数地区外)湿润指数呈现下降的变化趋势,江南丘陵北部和中部地区的湿润指数普遍较南部高,东部普遍较西部高,说明北部、中部和东部的湿润条件更好。但是,中南部的吉安附近的湿润指数倾向率呈现正值,表明其湿润指数有上升的趋势。从整体湿润指数倾向率来看,江南丘陵作为我国南方重要的农业区,其大范围地区的地表湿润指数还是呈现下降趋势,这种变化趋势不利于农业生产发展。

江南丘陵地区地表湿润指数季节倾向率(图 5),春季湿润指数倾向率大部分为-0.63~-0.03,仅有吉安(0.16)和七仙山(0.30)的春季湿润指数倾向率为正值。东南部的长汀附近、内部的南岳衡阳和东北的黄山(-0.53)附近春季湿润指数呈现明显的下降趋势,湿润指数倾向率大于零值。呈增加趋势的仅有吉安、宜昌、七仙山和天目山附近,而全区域春季的湿润指数倾向率大致呈下降趋势。夏季湿润指数倾向率大部分为 0.01~0.34,除赣州(-0.03)、武夷山市(-0.547)和常德(-0.053)附近等极少数地区外,湿润指数倾向率都为正

值,而在黄山、天目山和长汀附近的湿润指数还达到了0.56左右,表明江南丘陵地区的夏季湿润指数整体呈现上升趋势。秋季湿润指数倾向率大部分为 $-0.11 \sim -0.09$ ,若和春季湿润指数倾向率相比,秋季湿润指数倾向率负值变化比较小,仅有西北部的绿葱坡、中部南岳和衡阳附近的湿润指数下降明显,而武夷山市(0.118)和长汀(0.309)附近湿润指数上升显著。故整个江南丘陵地区秋季湿润指数倾向率变化不大,湿润指数倾向率增加的地区主要是研究区的东南部。冬季湿润指数倾向率大部分为 $-0.34 \sim -0.02$ ,冬季

湿润指数也呈下降的趋势,湿润指数的正倾向率变化主要在北部地区,而在东南部的长汀附近倾向率的负值显著。显然,除夏季外,江南丘陵地区其他季节湿润指数倾向率大致负值显著,春季和冬季湿润指数下降趋势显著,秋季湿润指数下降缓慢,仅有夏季湿润指数上升区域较广。春季正值农作物的播种季节,秋季又正值农作物收获季节,若春秋季节湿润指数下降的变化趋势长期持续下去将严重影响江南丘陵地区的农业生产发展。因此,春秋季节要注重地表湿润保持和农作物灌溉。

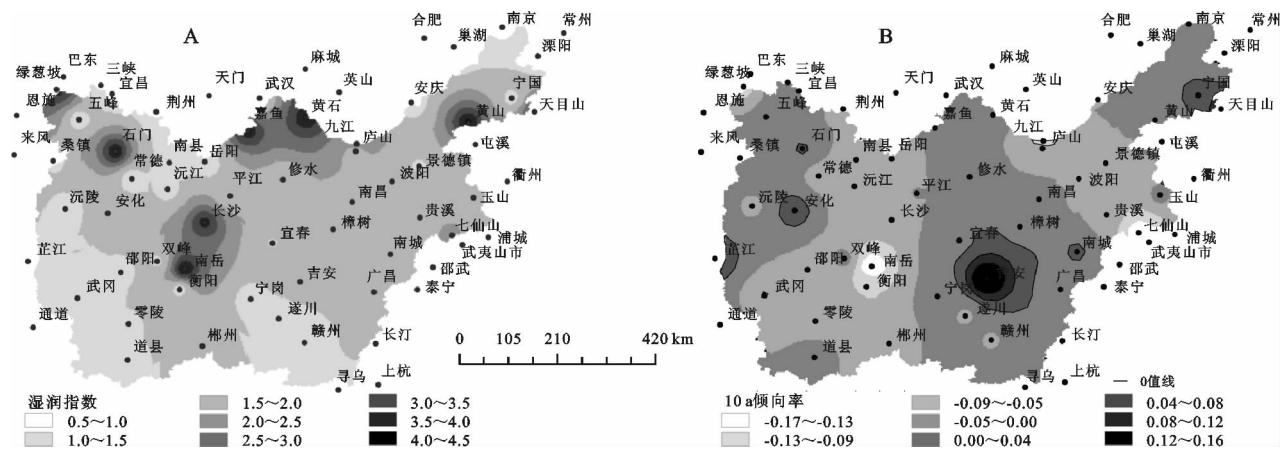


图4 湿润指数和湿润指数10a倾向率空间分布

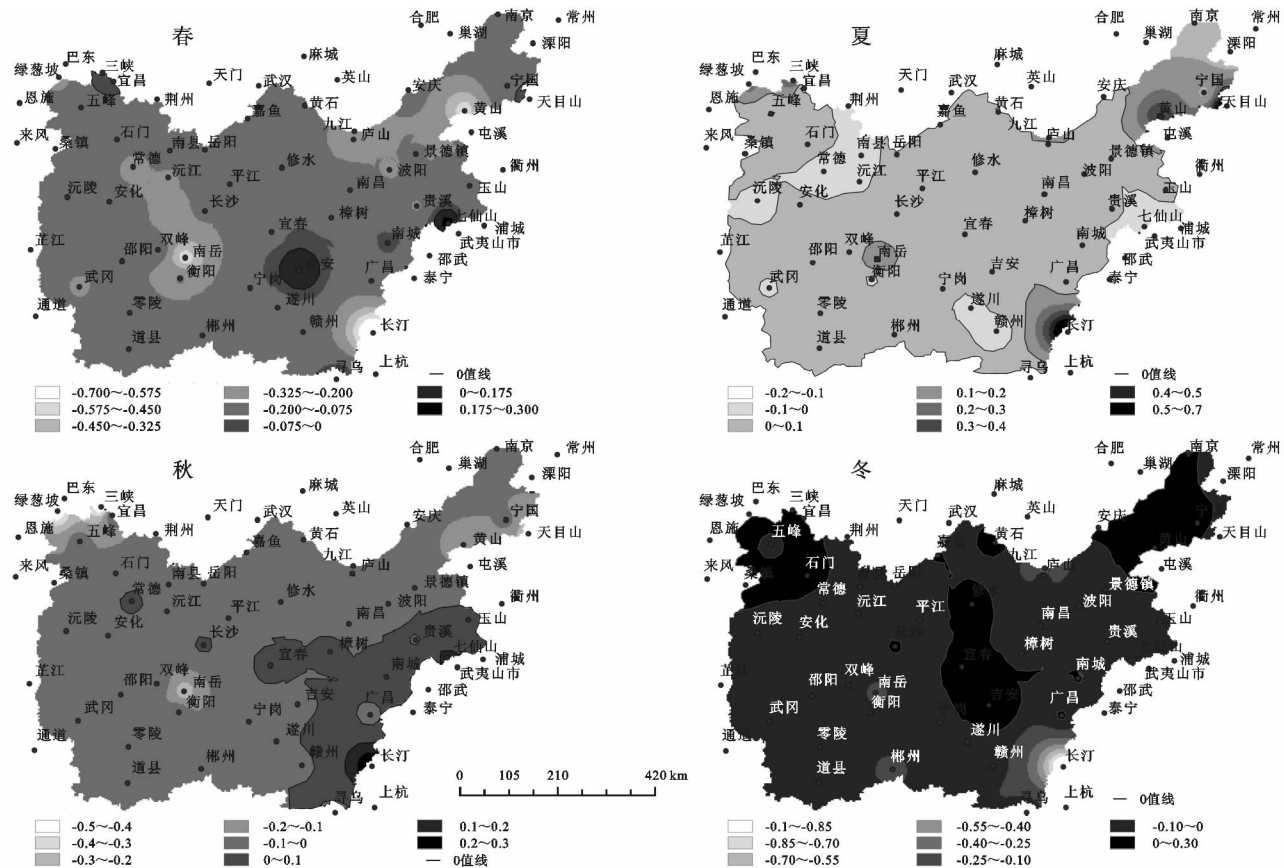


图5 湿润指数10a倾向率季节分布

### 3.2 地表湿润指数敏感性分析

#### 3.2.1 气象要素对湿润指数的影响 从湿润指数的

定义来看,影响其值大小的主要因素是降水量和参考蒸散量,参考蒸散量则主要涉及到日照百分率、平均

风速、相对湿度、气温等气象要素。通常情况下,日照百分率越大,实际日照时间越长,温度越高,地表水分的蒸散速率也就越快。同样,风速的增大也会加快蒸散速率,但同时也可能带来水汽,相对湿度的增大则会增加地表和空气中的水分,减弱参考蒸散量。

降水量不仅影响蒸散量的变化还直接影响湿润指数的大小,为此,本文利用皮尔逊相关分析,对湿润指数与各气象要素的相关性进行分析<sup>[25]</sup>,( $r$  值介于  $[-1,1]$ , $r>0$  表示正相关, $r<0$  表示负相关。 $0.3>|r|\geq 0,0.5>|r|\geq 0.3,0.8>|r|\geq 0.5,|r|\geq 0.8$  分别表示弱相关、中等相关、强相关和极强相关)。

从表 3 中可以看出,江南丘陵地区日照百分率和季节湿润指数呈弱负相关,且夏季的相关关系最大为  $-0.04$ ,并通过了显著性检验水平( $p<0.05$ )。这是因为夏季日照时间长,潜在蒸散量增加,从而使得日照百分率与地表湿润指数的负相关增强。但是,除夏季外,其他季节全年日照百分率和湿润指数的相关性没有通过显著性检验,说明日照百分率和湿润指数相关性不显著。平均风速与湿润指数在各个季节和全年都呈正相关,除冬季和全年外,其他的都通过了( $p<0.01$ )的显著性检验,但平均风速与湿润指数的相关性不强,在夏季最大为  $0.401$ 。风速增大往往会加速蒸发,但是风也可能携带水汽。对于江南丘陵地区,夏季相对湿度大,水汽含量多,风速的增大也可导致地表湿润指数的上升。而相对湿度与湿润指数在各个季节都通过了显著性检验( $p<0.01$ ),相关性最大值出现在夏季,这与江南丘陵地区的气候特点一致,夏季降水量大,增加了地表湿润。春、夏季的相对湿度与湿润指数呈强正相关,其他季节和全年的相对湿度与湿润指数呈中弱正相关。气温与湿润指数存在弱负相关,除全年外的各个季节都通过了( $p<0.01$ )的显著性检验,其中,夏季负相关性最大,这是因为研究区夏季气温最高,蒸散量大。各季节和全年的降水量与湿润指数呈强正相关。

表 3 江南丘陵地区地表湿润指数与各气象要素的相关系数

季节	气象要素				
	日照百分率	平均风速	相对湿度	平均气温	降水量
春	-0.025	0.370**	0.661**	-0.217**	0.690**
夏	-0.041*	0.401**	0.651**	-0.295**	0.758**
秋	-0.030	0.118**	0.184**	-0.119**	0.695**
冬	-0.022	0.016	0.453**	-0.096**	0.600**
年	0.002	0.211	0.124	-0.183	0.816**

注:\*\*表示通过显著性(0.01)检验水平,\*表示通过显著性(0.05)检验水平,其他的则为未通过显著性检验。

在江南丘陵地区各气象要素与湿润指数季节相

关性的空间分布上。(1) 研究区 69 个站点的降水量与湿润指数的季节相关性指数,春季为  $0.577$ (衢州)~ $0.96$ (三峡),夏季为  $0.795$ (常德)~ $0.98$ (桑植),秋季为  $0.752$ (常德)~ $0.981$ (巢湖),冬季为  $0.475$ (庐山)~ $0.975$ (巴东)。而且各个站点的降水量在各个季节都通过了显著性检验,说明降水对湿润指数的影响在各气象要素中最大。研究区相对湿度与湿润指数季节相关性和降水量与湿润指数季节相关性相似,相关性指数都为正值,同样各站点在各季节都通过了显著性检验。(2) 气温与湿润指数的季节相关性指数除少数几个站点呈微弱的正相关外,大部分气象站点的气温和湿润指数都呈显著的负相关,而且各季节都是西部和北部的负相关强于南部和东部。(3) 根据湿润指数的定义,风速越大参考蒸散量越大,湿润指数越小。但是,研究区各季节不同站点风速和湿润指数具有不同的正负相关性(图 6)。春季大多数站点的风速和湿润指数呈正相关且通过了显著性检验,而南部站点的风速与湿润指数多呈负相关且未能通过显著性检验;夏季风速和湿润指数多为负相关,但通过显著性检验的站点不多;秋季风速和湿润指数呈负相关的站点居多,但通过显著性检验的大多为北部呈正相关的站点;冬季风速与湿润指数大多呈弱正相关,风速与湿润指数呈负相关的站点主要分布西北部和东部狭长区域。(4) 各站点(除南昌、五峰外)春季日照百分率都和湿润指数呈负相关(图 7),相关系数主要为  $-0.8\sim-0.4$ ,除少数几个站点外都通过了显著性检验。空间上东部和北部的负相关系数要大于西部和南部;夏季日照百分率与湿润指数的相关系数为  $-0.4\sim-0.2$ ,而日照百分率与湿润指数的负相关不如春季显著;秋季日照百分率与湿润指数(除贵溪、五峰外)大多呈显著的负相关,而中部和南部的负相关系数大,东北部和西北部负相关系数小;冬季相关系数空间分布和春季相似,东部和北部的负相关系数较大。

3.2.2 海拔对湿润指数的影响 海拔高度和降水量、太阳辐射、风速等存在一定的相关性<sup>[26]</sup>。近 63 a 来,江南丘陵地区湿润指数通过了显著性检验( $R^2=0.4606, N=69, p<0.01$ (图 8)并与海拔呈正相关,即通常海拔低的区域,湿润指数也较低,随着海拔的升高湿润指数增大。研究区域 69 个气象站点的海拔为  $4.4\sim1\,840.4\text{ m}$ ,湿润指数为  $0.85\sim4.79$ 。海拔  $4.4\sim1\,000\text{ m}$  处的湿润指数为  $0.85\sim4.79$ ,且大部分站点湿润指数集中在  $1\sim2$  之间,平均值为  $1.71$ 。海拔  $1\,000\sim2\,000\text{ m}$  处的湿润指数为  $2.26\sim4.10$ ,平均值为  $3.31$ 。海拔高的地方一般云层较薄,太阳辐射较强,增加蒸散量,这与张克新等<sup>[27]</sup>对横断山区



水分盈亏量和海拔关系的分析相似。但是很多区域海拔升高的同时会导致降水量增加,并且海拔越高温

度越低,湿润指数越大。因此,江南丘陵地区的湿润指数不仅受气象因素的影响还和海拔高度密切相关。

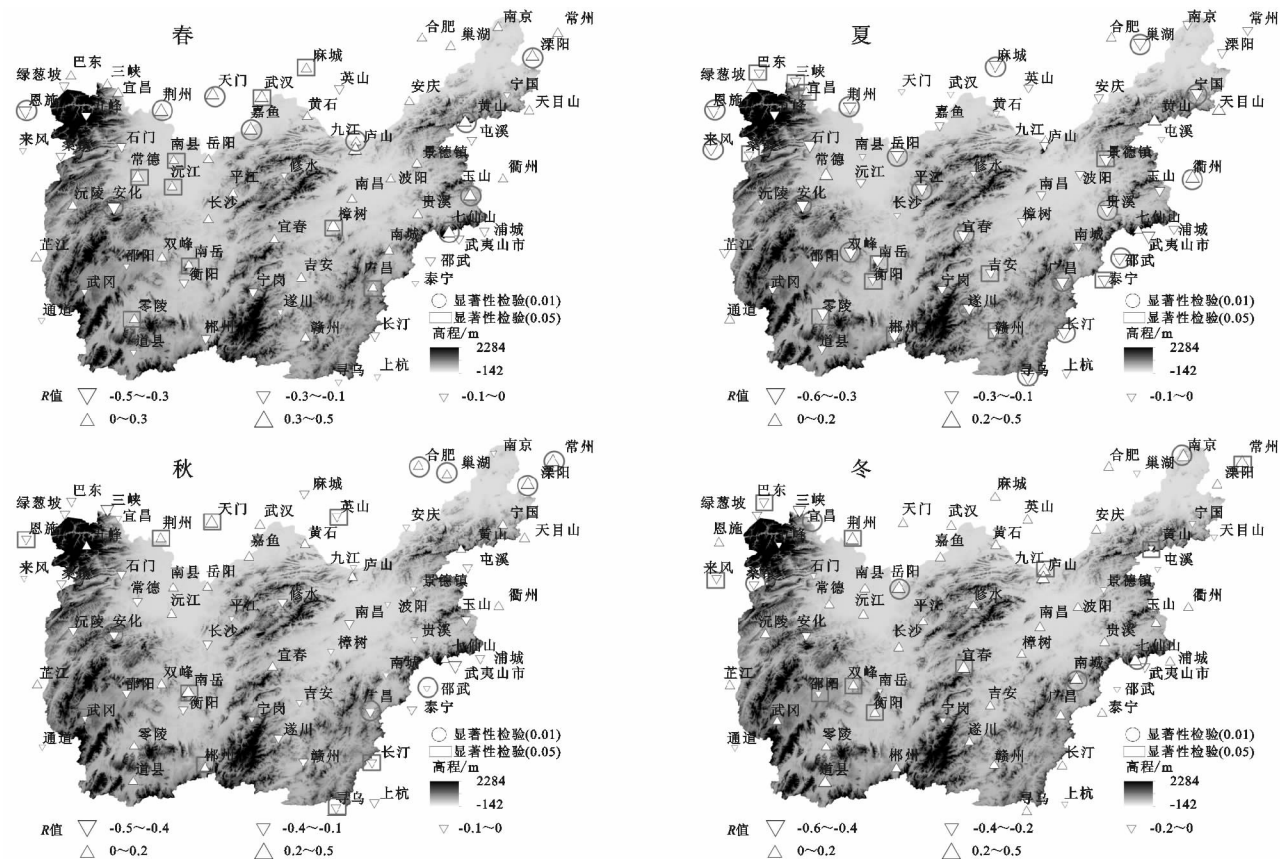


图 6 风速与湿润指数相关性空间分布

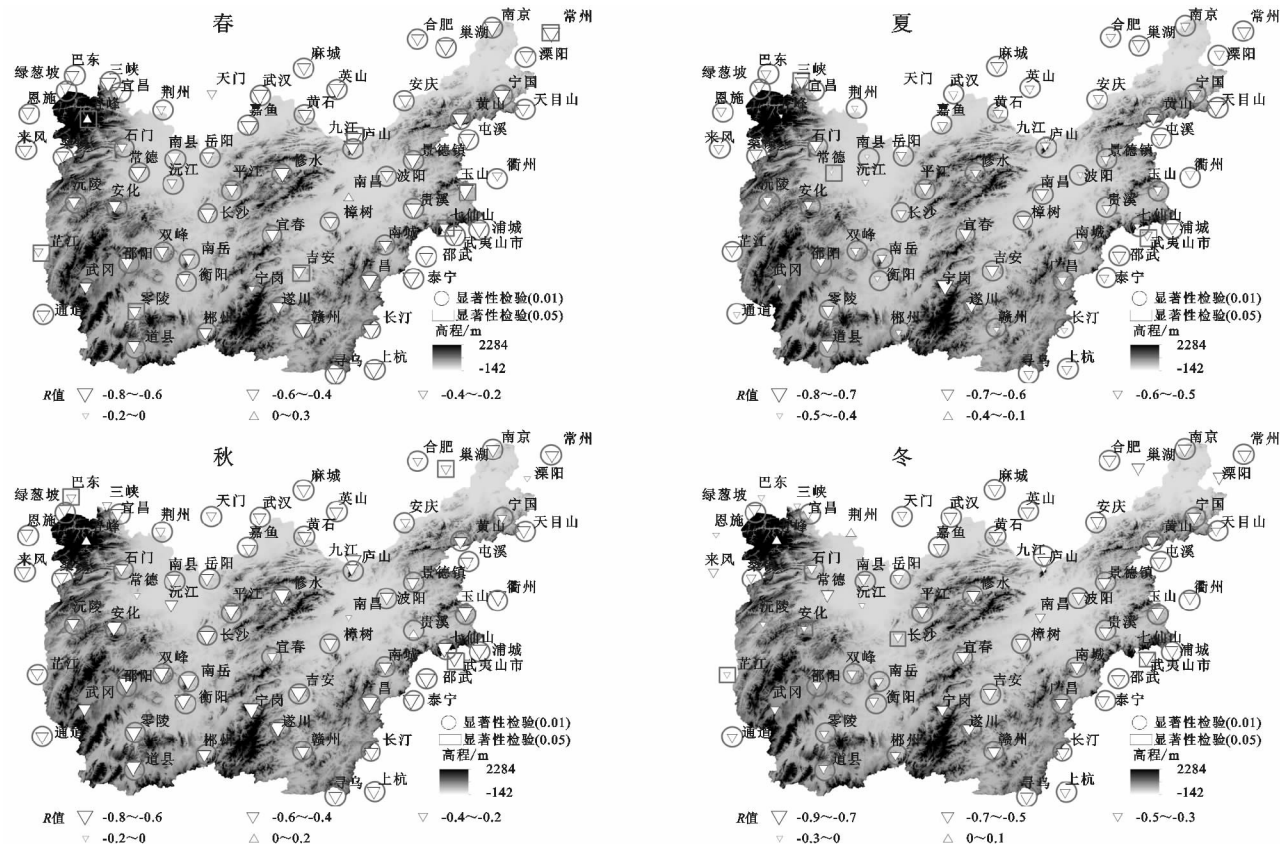


图 7 日照百分率与湿润指数相关性空间分布



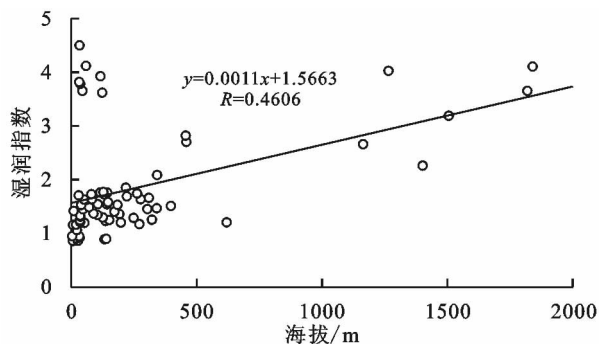


图8 湿润指数与海拔的关系

## 4 结论

(1) 近 63 a 来地表湿润指数呈现缓慢下降的趋势,湿润指数的变化幅度为 0.908~2.045,多年平均值为 1.51。湿润指数距平呈现波动变化,负距平值变化幅度大于正距平值变化幅度,但总体而言湿润指数波动不大。江南丘陵地区 20 世纪 50 年代地表湿润指数最高为湿润期,21 世纪初期地表湿润指数最小为干燥期。从季节上看,不论在哪个年代际,春季地表湿润指数都高于其他季节,秋季地表湿润指数都低于其他季节。

(2) 空间分布上,江南丘陵地区南部和西部湿润指数较低,湿润指数高值主要集中在东北部和北部区域。江南丘陵地区湿润指数倾向率大都为负值,湿润指数在空间上也表现为明显的下降趋势。各季节的湿润指数倾向率,夏季湿润指数倾向率为正值的区域较广,说明夏季湿润指数呈上升的趋势,但其他季节的湿润指数倾向率大部分为负值,表明春秋冬季湿润指数大致呈下降的趋势,这对江南丘陵地区未来的农业生产发展是不利的。

(3) 湿润指数受气象要素和海拔的影响。在气象要素上,湿润指数与降水量、相对湿度、风速等存在良好的正相关( $p < 0.01$ ),和气温存在显著的负相关,日照百分率也影响着湿润指数,但是相关性没有其他气象因素显著;降水量与湿润指数和相对湿度与湿润指数呈显著的正相关,气温和湿润指数在西部和北部呈强负相关,风速和湿润指数在各季节的各站点都存在正相关和负相关,日照百分率和湿润指数的负相关性在春冬季的北部和东部尤为突出。湿润指数和海拔的关系上,海拔越高湿润指数也越大,回归系数为 0.001 1。

### 参考文献:

[1] Quesney A, Le Hegarat Mascle S, Taconet O, et al. Estimation of watershed soil moisture index from ERS/SAR data[J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 72(3):290-303.

[2] Huo Z L, Dai X Q, Feng S Y, et al. Effect of climate

change on reference evapotranspiration and aridity index in arid region of China[J]. Journal of Hydrology, 2013, 492:24-34.

- [3] 王允,刘普幸,曹立国,等. 基于湿润指数的 1960—2011 年中国西南地区地表干湿变化特征[J]. 自然资源学报, 2014,29(5):830-838.
- [4] 马柱国,黄刚,甘文强,等. 近代中国北方干湿变化趋势的多时段特征[J]. 大气科学,2005,29(15):671-681.
- [5] 黄小燕,张明军,贾文雄,等. 中国西北地区地表干湿变化及影响因素[J]. 水科学进展,2011,22(2):151-159.
- [6] 姚玉璧,杨金虎,岳平,等. 近 50 年三江源地表湿润指数变化特征及其影响因素[J]. 生态环境学报,2011,20(11):1585-1593.
- [7] 邢文渊,马雷凯,肖继东,等. 北疆地区地表湿润指数变化分析[J]. 沙漠与绿洲气象,2009,3(4):9-12.
- [8] 邢文渊,刘志军,肖继东,等. 南疆地区地表湿润指数变化分析[J]. 新疆师范大学学报:自然科学版,2009,28(3):4-7.
- [9] 赵一飞,邹欣庆,张勃,等. 黄土高原甘肃区降水变化与气候指数关系[J]. 地理科学,2015,35(10):1325-1332.
- [10] 杜军,边多,拉巴,等. 1971—2005 年西藏主要农区农田蒸散量变化特征及其与环境因子的关系[J]. 冰川冻土,2009,31(5):815-821.
- [11] 张世虎,王一峰,侯勤正,等. 青海省干旱指数时空变化特征与气候指数的关系[J]. 草业科学,2015,32(12):1980-1987.
- [12] 张淑杰,张玉书,陈鹏狮,等. 东北地区湿润指数及其干湿界线的变化特征[J]. 干旱地区农业研究,2011,29(3):227-232.
- [13] 王富强,陈希,魏怀斌. 东江流域参考蒸散量及湿润指数变化特征研究[J]. 水电能源科学,2015,33(1):7-10.
- [14] 申双和,张方敏,盛琼. 1975—2004 年中国湿润指数时空变化特征[J]. 农业工程学报,2009,25(1):11-15.
- [15] 胡振鹏,林玉茹. 气候变化对鄱阳湖流域干旱灾害影响及其对策[J]. 长江流域资源与环境,2012,21(7):897-904.
- [16] 李景保,代勇,尹辉,等. 1950—2009 年洞庭湖流域农业旱灾演变特征及趋势预测[J]. 冰川冻土,2011,33(6):1391-1398.
- [17] 李弋林,徐袁,钱维宏. 近 300 年来中国西部气候的干湿变化[J]. 高原气象,2003,22(4):371-377.
- [18] 徐慧,张方敏,黄进. 江苏省 1961—2012 年干湿时空变化及对单季稻产量的潜在影响[J]. 水土保持研究, 2017,24(6):250-254.
- [19] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements[R]. Rome: FAO, 1998.
- [20] 王菱,陈沈斌,侯光良. 利用彭曼公式计算潜在蒸发的高度订正方法[J]. 气象学报,1988,46(3):381-383.

- [17] 李胜利, 巩在武, 石振彬, 等. 近 50 年来山东省极端降水指数变化特征分析[J]. 水土保持研究, 2016, 23(4): 120-127.
- [18] Rimkus E, Kažys J, Bukantis A, et al. Temporal variation of extreme precipitation events in Lithuania[J]. *Oceanologia*, 2011, 53(1): 259-277.
- [19] 李剑锋, 张强, 白云岗, 等. 新疆地区最大连续降水事件时空变化特征[J]. 地理学报, 2012, 67(3): 312-320.
- [20] 余敦先, 夏军, 张永勇, 等. 近 50 年来淮河流域极端降水的时空变化及统计特征[J]. 地理学报, 2011, 66(9): 1200-1210.
- [21] Limsakul A, Singhruck P. Long-term trends and variability of total and extreme precipitation in Thailand [J]. *Atmospheric Research*, 2016, 169: 301-317.
- [22] Ruml M, Gregorić E, Vujadinović M, et al. Observed changes of temperature extremes in Serbia over the period 1961—2010[J]. *Atmospheric Research*, 2016, 183: 26-41.
- [23] Shengjie Wang, Mingjun Zhang, Baolong Wang, et al. Recent changes in daily extremes of temperature and precipitation over the western Tibetan Plateau, 1973—2011[J]. *Quaternary International*, 2013, 313/314(6): 110-117.
- [24] 闫慧敏, 陈伟娜, 杨方兴, 等. 过去 50 年内蒙古极端气候事件时空格局特征[J]. 地理研究, 2014, 33(1): 13-22.
- [25] 王钊, 彭艳, 魏娜. 近 52a 秦岭南北极端温度变化及其与区域增暖的关系[J]. 干旱气象, 2016, 34(2): 269-275.
- [26] Keggenghoff I, Elizbarashvili M, King L. Recent changes in Georgias temperature means and extremes: Annual and seasonal trends between 1961 and 2010[J]. *Weather & Climate Extremes*, 2015, 8(4): 34-45.
- [27] 高红燕, 蔡新玲, 贺皓, 等. 西安城市化对气温变化趋势的影响[J]. 地理学报, 2009, 64(9): 1093-1102.
- [28] 贺伟, 布仁仓, 熊在平, 等. 1961—2005 年东北地区气温和降水变化趋势[J]. 生态学报, 2013, 33(2): 519-531.
- [29] 刘聚涛, 方少文, 冯倩, 等. 基于 Mann-Kendall 法的湖泊稳态转换突变分析[J]. 中国环境科学, 2015, 35(12): 3707-3713.
- [30] 刘宇峰, 原志华, 孙铂. 近 15 年来西安市主要气候要素变化的 R/S 分析[J]. 西安文理学院学报: 自然科学版, 2016, 19(1): 73-78.
- [31] 薛树强, 杨元喜. 广义反距离加权空间推估法[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2013, 38(12): 1435-1439.
- [32] 曾红伟, 李丽娟, 张永萱, 等. 大样本降水空间插值研究: 以 2009 年中国年降水为例[J]. 地理科学进展, 2011, 30(7): 811-818.
- [33] Huailiang Wang, Zhuhai Shao, Tao Gao, et al. Extreme precipitation event over the Yellow Sea western coast: Is there a trend[J]. *Quaternary International*, 2016, 441: 1-17.
- [34] 武文博, 游庆龙, 王岱. 基于均一化降水资料的中国极端降水特征分析[J]. 自然资源学报, 2016(6): 1015-1026.

~~~~~

(上接第 271 页)

- [21] 左大康, 王懿贤, 陈建绥. 中国地区太阳总辐射的空间分布特征[M]//左大康. 地理研究论文选. 北京: 科学出版社, 1993.
- [22] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]//魏凤英. 气候变化趋势. 北京: 气象出版社, 2007.
- [23] Zhou H, Wu J, Geng G, et al. Enhancing the ability of a soil moisture: based index for agricultural drought monitoring by incorporating root distribution[J]. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 2017, 53(6): 1409-1423.
- [24] 赵冰雪, 王雷, 程东亚. 安徽省气象数据空间插值方法比较与分布特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(3): 141-145.
- [25] 刘友存, 焦克勤, 赵奎, 等. 中国天山地区降水对全球气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2017, 39(4): 748-759.
- [26] 陈贺, 李原园, 杨志峰, 等. 地形因素对降水分布影响的研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(1): 119-122.
- [27] 张克新, 潘少明, 曹立国, 等. 横断山区季风期水分盈亏量时空变化特征及其与若干气候指数的相关性分析[J]. 自然资源学报, 2014, 29(11): 1869-1877.