

# 气候变化背景下贵州省秋绵雨时空变化特征\*

韩会庆<sup>1</sup>, 苏志华<sup>2</sup>, 白玉梅<sup>1</sup>, 张新鼎<sup>1</sup>

(1. 贵州理工学院 建筑与城市规划学院, 贵州 贵阳 550003;

2. 贵州财经大学 管理科学学院, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:**【目的】了解贵州省秋绵雨变化特点, 为贵州省农业气象服务、应对气候变化提供科学参考。

【方法】基于贵州省 84 个气象观测站 1960—2017 年逐日降水量资料, 采用线性回归、小波分析和 IDW 插值法分析了贵州省 58 年来秋绵雨变化趋势及空间格局。【结果】58 年间贵州省秋绵雨发生次数、站次比和秋绵雨指数整体呈现下降趋势, 但 21 世纪 10 年代开始呈现趋强特点。秋绵雨变化趋势、发生频率和秋绵雨指数存在突出空间异质性。全省轻度秋绵雨发生范围较大, 中度和重度秋绵雨发生范围相对较小。秋绵雨存在 2 个时间尺度的变化周期, 19 年是其变化的主周期。【结论】全省秋绵雨发生次数、站次比和秋绵雨指数整体下降有利于农业生产, 但秋绵雨发生频率较高的西部地区仍亟须构建应对策略, 减少农业生产损失。

**关键词:** 秋绵雨; 变化趋势; 空间格局; 气候变化

中图分类号: P 426.6

文献标识码: A

文章编号: 1004-390X (2020) 03-0511-08

## Characteristics of Spatial and Temporal Variation of Autumn Rain in Guizhou Province under the Background of Climate Change

HAN Huiqing<sup>1</sup>, SU Zhihua<sup>2</sup>, BAI Yumei<sup>1</sup>, ZHANG Xinding<sup>1</sup>

(1. College of Architecture and Urban Planning, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550003, China;

2. School of Management Science, Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** [Purpose] In order to understand the change characteristics of autumn rain in Guizhou Province, scientific reference was provided for agriculture meteorological service and climate change response in this region. [Method] The variation trend and spatial pattern of autumn rain in Guizhou Province in the past 58 years were analyzed by linear regression, wavelet analysis and IDW interpolation based on the daily precipitation data of 84 meteorological observation stations in Guizhou Province from 1960 to 2017. [Result] There were decline trends for occurrence frequency, occurrence station proportion of autumn rain and autumn rain index in the past 58 years. However, an increasing trend could be found since the 2010s. There were prominent spatial heterogeneities for variation trend, occurrence frequency and index of autumn rain. The occurrence scope of mild autumn rain was big while occurrence scope of moderate and severe autumn rains were relatively small. There were two time scale variation cycles for autumn rain, and 19a was the main period of change. [Conclusion] The decline of occurrence frequency, occurrence station proportion of autumn rain and au-

收稿日期: 2018-08-14

修回日期: 2018-10-28

网络首发时间: 2020-06-23 17:13:22

\*基金项目: 贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合 KY 字[2018]262); 贵州理工学院学术新苗培养及探索创新项目(黔科合平台人才[2017]5789-23); 贵州理工学院高层次人才科研启动经费项目; 贵州省科技计划项目(黔科合基础[2020]1Y152)。

作者简介: 韩会庆(1983—), 男, 山东济南人, 博士, 教授, 主要从事生态系统服务和气候变化研究。

E-mail: hhuiqing2006@126.com

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20200623.0910.001.html>



tumn rain index is beneficial to agricultural production. However, the western region in Guizhou with higher frequency of occurrence of autumn rain needs to establish countermeasures and reduce the loss of agricultural production.

**Keywords:** autumn rain; change trend; spatial pattern; climate change

贵州省是中国西部重要农业生产区,其农作物播种面积和产量(如水稻、玉米、油菜、烤烟、马铃薯、猕猴桃和刺梨等)在中国占重要地位,秋季是该区农作物播种、生长和成熟的关键时期,该时期发生的连续性降水将深刻影响农作物耕种和收获,甚至引起秋涝,造成严重的农业损失<sup>[1]</sup>。秋绵雨是主要发生于中国西部地区(包括贵州省)的秋季连续阴雨现象,它是中国雨季的重要阶段<sup>[2]</sup>。在全球气候变化背景下,不同区域秋季降水特点发生了明显变化<sup>[3]</sup>,这将深刻影响秋绵雨变化规律。厘清贵州省秋绵雨变化规律对该区秋季农业气象服务、秋绵雨科学预报以及应对气候变化具有重要的意义。

目前,学者们已从秋绵雨演变特征、对农作物的影响和成因等方面开展相关研究,其中秋绵雨演变研究主要关注中国西部地区,如王春学等<sup>[4]</sup>分析了中国华西秋雨的气候变化规律,薛春芳等<sup>[5]</sup>分析了 1960—2009 年渭河流域秋雨变化特征,仅有少量学者关注中国北方<sup>[6]</sup>以及南海地区<sup>[7]</sup>。此外,秋绵雨对农作物产量和生产的影响也受到关注,如余显权等<sup>[8]</sup>和李长权等<sup>[9]</sup>分别分析了秋雨对水稻产量和烟叶生产的影响。大量学者从大气环流(如位势高度场、水汽场、风场、海温和环流异常等)方面开展不同区域秋绵雨的成因分析,研究表明大气环流演变及异常是影响秋绵雨的重要因素<sup>[10-12]</sup>。贵州省作为秋绵雨发生频繁地区,在全球气候变化背景影响下,其变化规律的研究还未见报道。因此,本研究利用逐日降水量观测资料,分析 1960—2017 年贵州省秋绵雨时空变化特征。

## 1 材料与方法

### 1.1 资料及概念界定

本研究主要利用贵州省 84 个气象站点 1960—2017 年 9—11 月逐日降水观测资料,缺测数据多为短期(单日或几日),无月或年的长时间缺测,该数据质量整体较好,数据利用临近站点平均值进行插值。依据文献<sup>[13]</sup>将贵州省秋绵雨

界定为:每年 9 月 1 日~11 月 30 日发生的持续时间 5 d 及以上的日降水量 $\geq 0.1$  mm 的时段,如秋绵雨持续时间为 5~10 d 即为轻度绵雨,持续时间为 11~15 d 即为中度绵雨,持续时间 $\geq 16$  d 即为重度绵雨。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 秋绵雨发生频率

表示某一时间段内秋绵雨发生频繁状况,计算公式为

$$P = n/N \times 100\% \quad (1)$$

式中, $P$ 为秋绵雨发生频率,%; $n$ 为某一气象站点发生秋绵雨的总年份; $N$ 为研究总年份。

#### 1.2.2 秋绵雨发生站次比

表示秋绵雨发生的空间范围大小,计算公式为

$$W = m/M \times 100\% \quad (2)$$

式中, $W$ 为秋绵雨发生站次比,%; $m$ 为发生秋绵雨的站数; $M$ 为气象站总数。如 $W \geq 50\%$ ,表示发生全域性秋绵雨, $50\% > W \geq 25\%$ 表示发生区域性秋绵雨, $25\% > W \geq 10\%$ 表示发生局域性秋绵雨, $W < 10\%$ 表示无明显秋绵雨。

#### 1.2.3 秋绵雨指数

依据文献<sup>[14]</sup>,引入秋绵雨指数分析秋绵雨强度变化特征,计算公式为

$$I = P_i/P_j \times W \quad (3)$$

式中, $I$ 为秋绵雨指数; $P_i$ 为秋季降水量; $P_j$ 为全年降水量; $W$ 为秋绵雨日数。

#### 1.2.4 其他方法

采用线性回归方程<sup>[15]</sup>和小波分析法<sup>[16]</sup>研究贵州省秋绵雨变化趋势及周期特征,利用 IDW 空间插值法<sup>[17]</sup>分析贵州省秋绵雨变化的空间特征。

## 2 结果与分析

### 2.1 秋绵雨发生频次变化

由图 1 可见:1961、1967、1972、1978、1981、1982、1987 和 2010 年是秋绵雨发生频次较高年份,1979、1980、1998、2001、2002 和

2015 年是秋绵雨发生频次较低年份。58 年间轻度、中度、重度和全部的秋绵雨发生次数均呈下降趋势, 其中轻度和全部的秋绵雨下降幅度较大, 而中度和重度的秋绵雨下降幅度较小。从不同年代看 (表 1), 20 世纪 60 年代至 21 世纪 00 年代全部的秋绵雨发生频次一直呈下降趋势, 而

至 21 世纪 10 年代, 秋绵雨发生频次呈增加趋势。轻度的秋绵雨发生频次呈先增加, 然后下降, 最后再增加的特点。中度和重度的秋绵雨发生频次均经历先下降再增加, 然后下降, 最后再增加的特点, 其中 20 世纪 70 年代和 21 世纪 00 年代是发生频次低谷期。

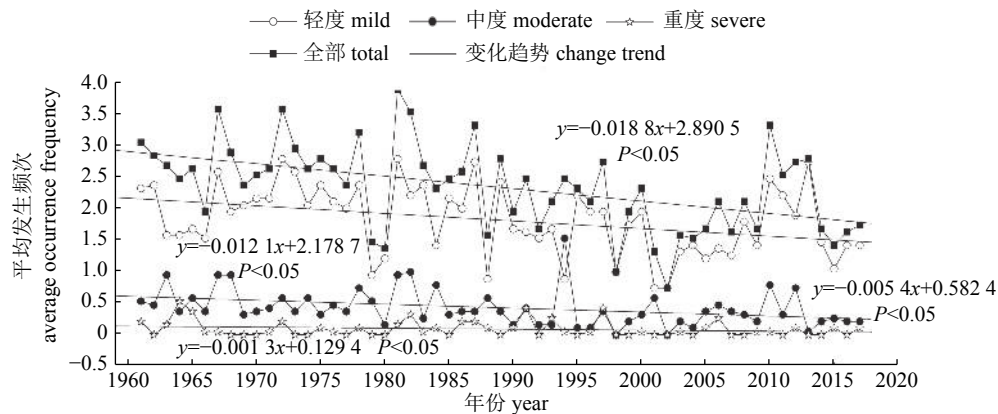


图 1 1960—2017 年贵州省秋绵雨发生频次年际变化

Fig. 1 Interannual variability of occurrence frequency for autumn rain from 1960 to 2017 in Guizhou Province

表 1 1960—2017 年贵州省秋绵雨发生频次不同年代变化

Tab. 1 Decadal variability of occurrence frequency of autumn rain from 1960 to 2017 in Guizhou Province

| 年代 years  | 轻度 mild | 中度 moderate | 重度 severe | 全部 total |
|-----------|---------|-------------|-----------|----------|
| 1960—1969 | 1.98    | 0.56        | 0.14      | 2.68     |
| 1970—1979 | 2.15    | 0.47        | 0.05      | 2.67     |
| 1980—1989 | 2.02    | 0.52        | 0.12      | 2.55     |
| 1990—1999 | 1.63    | 0.32        | 0.13      | 2.08     |
| 2000—2009 | 1.32    | 0.29        | 0.05      | 1.67     |
| 2010—2017 | 1.84    | 0.35        | 0.06      | 2.23     |

由图 2 可知: 贵州省绝大部分地区的轻度、中度和重度秋绵雨发生频次均呈下降趋势, 仅有零星地区的发生频次呈增加趋势。轻度秋绵雨发生频次下降高值区位于西北部 and 南部, 仅有西部小部分地区发生频次呈增加趋势, 中度秋绵雨发生频次下降高值区主要分布在西部和西北部, 仅有中部地区呈增加趋势, 重度秋绵雨发生频次下降高值区主要位于西部以及东部零星地区, 仅有西北部和中部等零星地区呈增加趋势。贵州省各地的全部秋绵雨发生频次均呈下降趋势, 其中下降高值区位于西北部 and 南部, 下降低值区位于西南部和中北部。

2.2 秋绵雨发生频率空间格局

由图 3 可知: 轻度秋绵雨发生频率呈现北部较高、南部和西部较低的特点, 中度和重度秋绵

雨发生频率均呈现从东部和南部向西部增加的特点, 全部秋绵雨发生频率呈现西部和北部较高、南部较低的特点。

2.3 秋绵雨发生站次比变化

由图 4 可知: 除 2016 年外, 其他年份全省均发生了全域性轻度秋绵雨, 此外, 全省大部分年份发生了区域性和局域性中度秋绵雨, 但大多数年份没有发生重度秋绵雨, 仅有 1964、1965、1982、1991、1993、1997 和 2006 年发生了范围相对较大的重度秋绵雨, 全省全部年份均发生了全域性全部秋绵雨。从不同年代看 (表 2), 轻度秋绵雨发生站次比呈现先增加、后下降和再增加的特点; 中度和全部秋绵雨发生站次比呈现先下降、后增加和再下降、最后增加的特点; 重度秋绵雨发生站次比呈现先下降、后增加和再下降的特点。

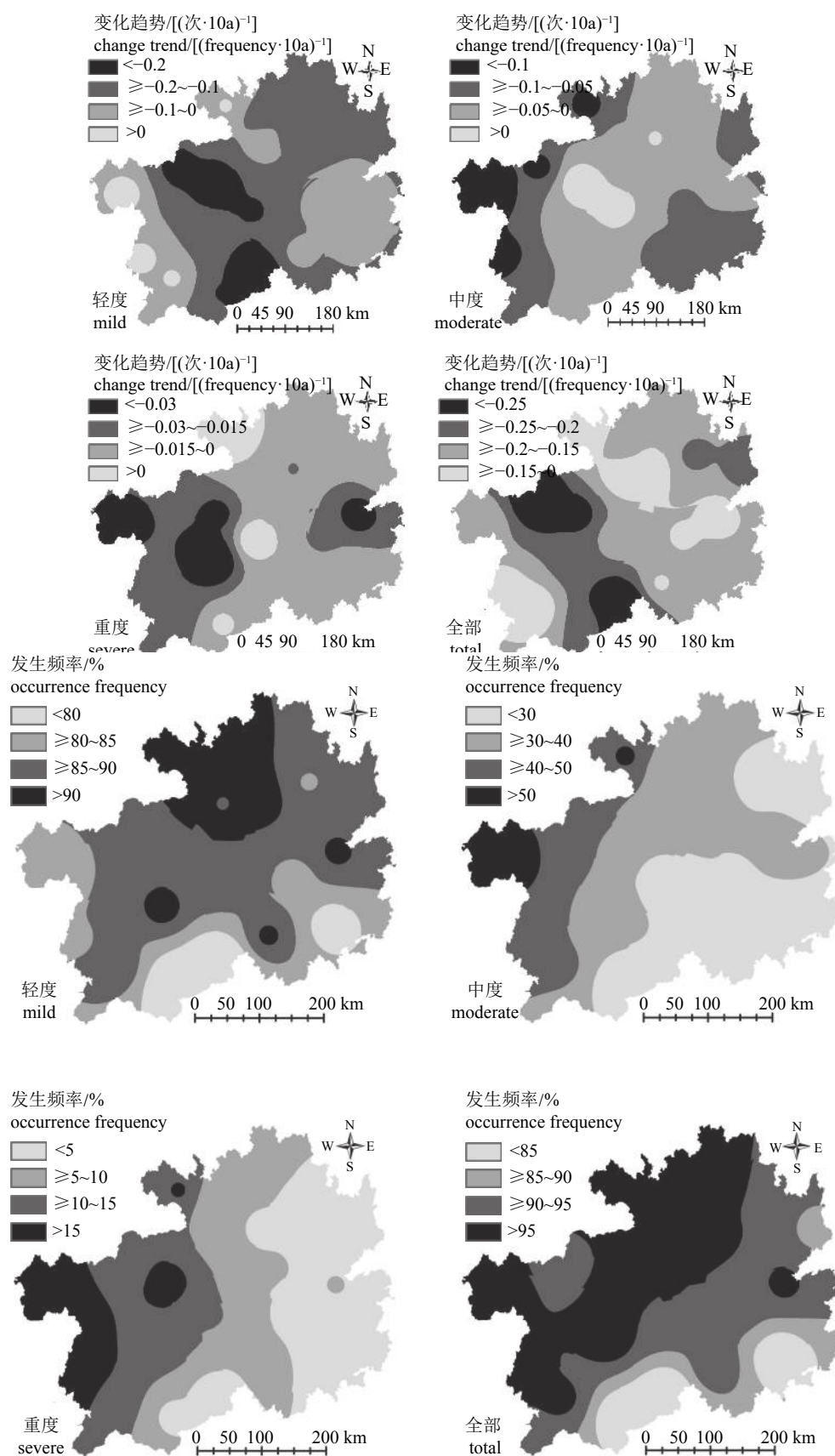


图 3 1960—2017 年贵州省秋绵雨发生频率空间格局

Fig. 3 Spatial pattern of occurrence frequency for autumn rain in Guizhou Province from 1960 to 2017



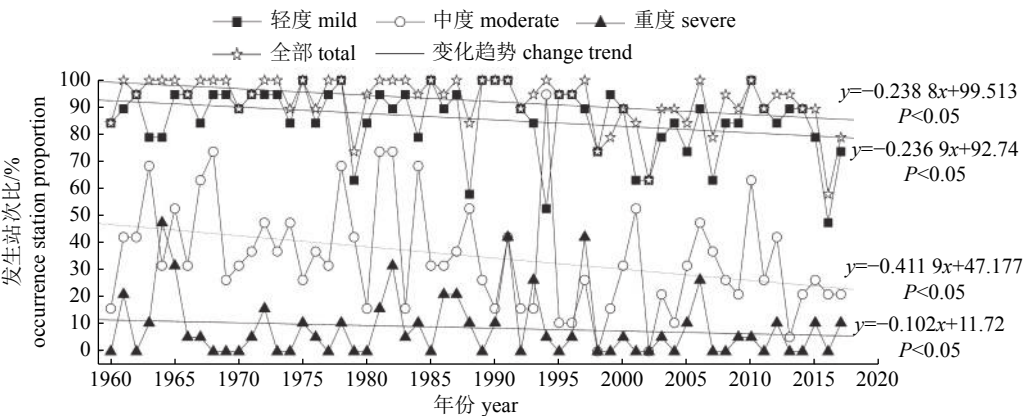


图 4 1960—2017 年贵州省秋绵雨发生站次比年际变化

Fig. 4 Interannual variability of occurrence station proportion of autumn rain from 1960 to 2017 in Guizhou Province

表 2 1960—2017 年贵州省秋绵雨发生站次比不同年代变化

Tab. 2 Decadal variability of occurrence station proportion of autumn rain from 1960 to 2017 in Guizhou Province

| 年代 years  | 轻度 mild | 中度 moderate | 重度 severe | 全部 total |
|-----------|---------|-------------|-----------|----------|
| 1960—1969 | 88.95   | 44.74       | 12.11     | 97.37    |
| 1970—1979 | 90.00   | 40.53       | 4.74      | 93.68    |
| 1980—1989 | 88.42   | 42.63       | 11.58     | 96.84    |
| 1990—1999 | 87.37   | 24.74       | 13.16     | 92.63    |
| 2000—2009 | 77.37   | 27.89       | 5.26      | 86.32    |
| 2010—2017 | 81.58   | 28.29       | 4.61      | 86.84    |

2.4 秋绵雨发生变化周期性特征

由图 5 可知: 轻度秋绵雨发生频次上存在 7、11 和 19 年 3 个时间尺度的变化周期, 其中 19 年为变化的第 1 主周期, 经历了 5 次变化循环。中度秋绵雨发生频次上存在 5、8 和 23 年 3 个时间尺度的变化周期, 其中 8 年为变化的第 1 主周期, 经历了 10 余次变化循环。重度秋绵雨发生频次上存在 5、8、13 和 22 年 4 个时间尺度的变化周期, 其中 13 年为变化的第 1 主周期, 经历了 8 次变化循环。全部秋绵雨发生频次上存在 7 和 19 年 2 个时间尺度的变化周期, 其中 19 年为变化的第 1 主周期, 经历了 5 次变化循环。

2.5 秋绵雨指数(强度)变化

由图 6 可见: 1961、1963、1972、1978、1981、1982 和 1994 年是秋绵雨指数较高年份, 1980、1992、1998、2002、2004 和 2009 年是秋绵雨指数较低年份。58 年间, 秋绵雨指数整体呈下降趋势。从不同年代看(表 3), 秋绵雨指数呈现先增加、后下降和再增加趋势, 其中 20 世纪 70 年代和 21 世纪 00 年代分别为高峰期和低谷期。

由图 7 可知: 贵州省全部地区的秋绵雨指数

均呈下降趋势, 其中下降高值区位于全省西部以及东部小部分地区, 下降低值区主要分布全省中北部以及东南部和西南部的小部分地区。

3 讨论

本研究发现 58 年间贵州省秋绵雨发生频次呈下降趋势, 这与张顺谦等<sup>[18]</sup>对中国西南地区华西秋雨的研究结果、高阳华等<sup>[19]</sup>对重庆市秋雨的研究成果较为一致。已有研究表明秋雨的形成与水汽输送强弱、大气环流有关<sup>[20]</sup>。印度洋通道、孟加拉湾通道及南海太平洋通道作为影响华西秋雨的主要水汽通道, 其在过去几十年间呈现减弱趋势<sup>[21]</sup>。西太平洋副热带高压与印度低压作为影响秋雨年际变化的重要因素<sup>[22]</sup>, 西太平洋副热带高压偏西、偏北和偏南时以及印度低压(较强)明显时秋雨发生频率增强<sup>[22]</sup>。近几十年来, 西太平洋副热带高压偏东以及印度低压偏弱<sup>[23]</sup>, 造成秋雨发生频率下降。此外, 张顺谦等<sup>[18]</sup>对华西秋雨发生频率空间格局的研究结果与本研究结果存在一定偏差, 这主要与秋绵雨的界定存在一定差异有关。值得注意的是, 21 世纪 10 年代开始贵州

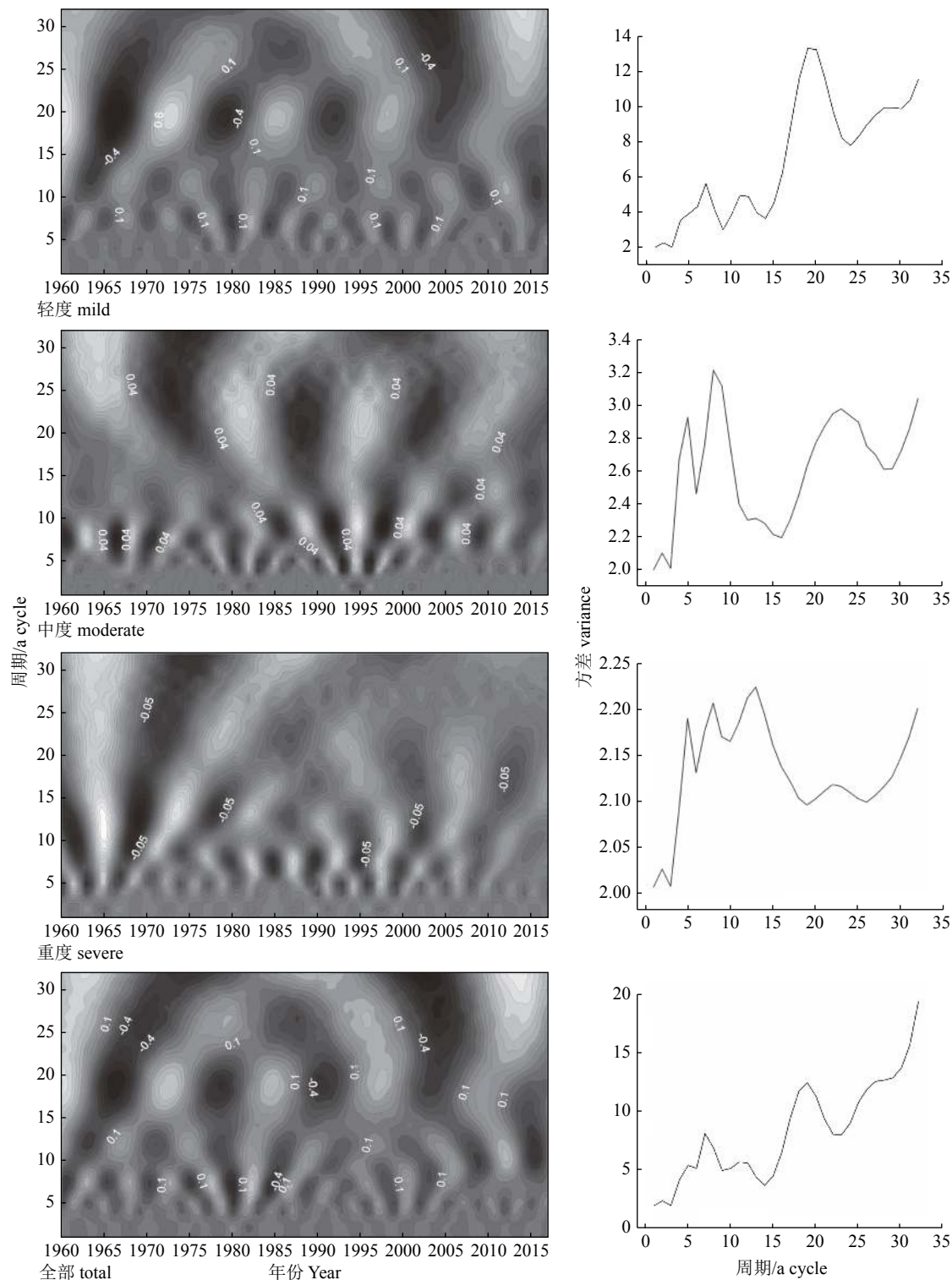


图 5 1960—2017 年贵州省秋绵雨发生频次变化周期特征

Fig. 5 Cycle characteristics of occurrence frequency for autumn rain in Guizhou Province from 1960 to 2017

省秋绵雨发生频次和强度均呈增加趋势, 这会对秋绵雨发生频率较高地区 (如贵州西部) 产生严重负面影响, 亟须构建应对策略, 减少农业生产损失。

#### 4 结论

58 年间贵州省秋绵雨发生频次整体上呈下降趋势, 轻度和全部的秋绵雨下降幅度高于中度和

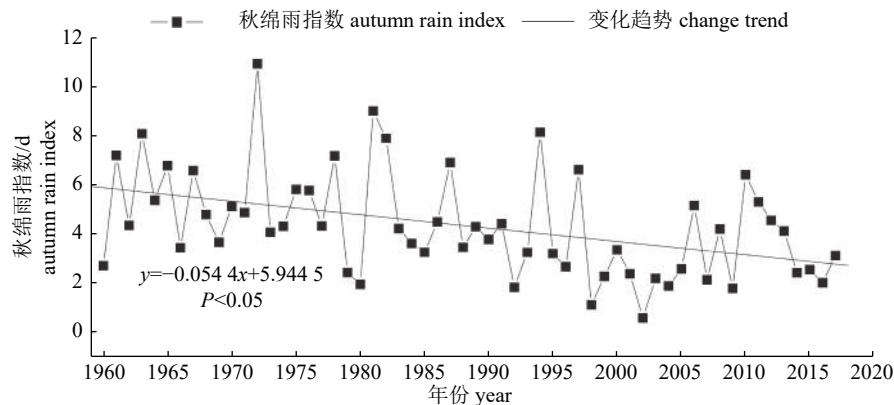


图 6 1960—2017 年贵州省秋绵雨指数年际变化

Fig. 6 Interannual variability of autumn rain index from 1960 to 2017 in Guizhou province

表 3 1960—2017 年贵州省秋绵雨指数不同年代变化

Tab. 3 Decadal variability of autumn rain index from 1960 to 2017 in Guizhou province

| 年代 time                 | 1960—1969 | 1970—1979 | 1980—1989 | 1990—1999 | 2000—2009 | 2010—2017 |
|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 秋绵雨指数 autumn rain index | 5.31      | 5.49      | 4.92      | 3.74      | 2.64      | 3.83      |

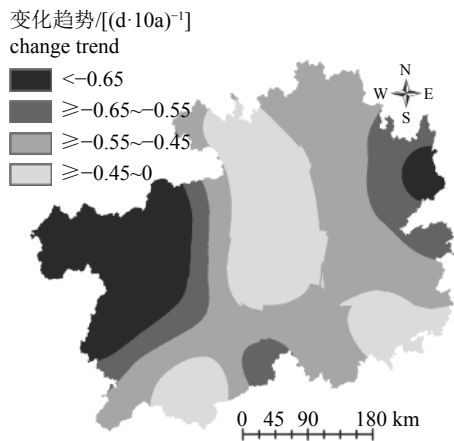


图 7 1960—2017 年贵州省秋绵雨指数变化趋势空间格局

Fig. 7 Spatial pattern of change trend for autumn rain index from 1960 to 2017 in Guizhou Province

重度。21 世纪各等级及全部的秋绵雨均呈增加趋势。各等级及全部的秋绵雨变化趋势及发生频率的空间格局存在明显差异。轻度和全部的秋绵雨以全域性发生为主,中度秋绵雨以区域性和局域性发生为主,重度秋绵雨以无明显发生为主。各等级及全部的不同年代秋绵雨发生站次比变化波动较大。轻度、中度、重度和全部的秋绵雨分别存在 3、3、4 和 2 四个时间尺度的变化周期。秋绵雨指数整体上呈下降趋势,下降高值区位于全省西部以及东部小部分地区,下降低值区主要分布全省中北部以及东南部和西南部的小部分地区。

[ 参考文献 ]

[1] 杨利群. 贵州暴雨洪涝、秋绵雨和凝冻的气候特征及灾情分析[J]. 贵州气象, 1999, 23(4): 3.

[2] 李传浩, 刘宣飞, 李智, 等. 华西秋雨区域性极端降水的环流特征[J]. 热带气象学报, 2015, 31(4): 526. DOI: 10.16032/j.issn.1004-4965.2015.04.010.

[3] 张存杰, 高学杰, 赵红岩. 全球气候变暖对西北地区秋季降水的影响[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 157. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0240.2003.02.007.

[4] 王春学, 马振峰, 邵鹏程, 等. 我国华西秋雨的气候变化规律及其影响因子[J]. 干旱区研究, 2015, 32(6): 1113. DOI: 10.13866/j.azr.2015.06.10.

[5] 薛春芳, 董文杰, 李青, 等. 近 50 年渭河流域秋雨的特征与成因分析[J]. 高原气象, 2012, 31(2): 409.

[6] 韩晋平, 张人禾, 苏京志. 中国北方秋雨与热带中太平洋海表冷却的关系[J]. 大气科学, 2013, 37(5): 1059. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12042.

[7] 肖潺, 原韦华, 李建, 等. 南海秋雨气候特征分析[J]. 气候与环境研究, 2013, 18(6): 693. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.2013.120163.

[8] 余显权, 邓加省. 水稻孕穗开花期遇秋风秋雨对产量的影响[J]. 种子, 2003, 127(1): 64. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4705.2003.01.029.

[9] 李长权, 王丹林, 王旭. 秋风秋雨对六盘水烟叶生产的影响及应对措施[J]. 耕作与栽培, 2015(4): 58. DOI: 10.3969/j.issn.1008-2239.2015.04.025.

[10] 韩晋平. 北太平洋增暖对我国西北秋雨的影响[J]. 应用气象学报, 2014, 25(3): 257. DOI: 10.11898/1001-7313.20140301.

[11] 徐金霞, 闫彩霞, 钟燕川, 等. 北半球秋季欧亚遥相关与华西秋雨的关系[J]. 气象科技, 2017, 45(3): 492. DOI: 10.19517/j.1671-6345.20160491.

[12] 罗霄, 李栋梁, 王慧. 华西秋雨演变的新特征及其对大

- 气环流的响应[J]. 高原气象, 2013, 32(4): 1019. DOI: [10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00018](https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00018).
- [13] 李玉柱, 许炳南. 贵州短期气候预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2001.
- [14] 白虎志, 董文杰. 华西秋雨的气候特征及成因分析[J]. 高原气象, 2004, 23(6): 884. DOI: [10.3321/j.issn:1000-0534.2004.06.022](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-0534.2004.06.022).
- [15] 李小明, 王申令. 带线性约束的多元线性回归模型参数估计[J]. 统计研究, 2016, 33(11): 85. DOI: [10.19343/j.cnki.11-1302/c.2016.11.012](https://doi.org/10.19343/j.cnki.11-1302/c.2016.11.012).
- [16] 李明亮, 杨旸, 杨磊, 等. 气候变化与建闸影响下小流域入海径流量长周期变化特征:以盐城海岸为例[J]. 气候与环境研究, 2017, 22(6): 671. DOI: [10.3878/j.issn.1006-9585.2017.15249](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.15249).
- [17] 陈云凡, 陈成文, 倪家栖. 基于反向距离加权法的公租房的租金定价模型及实证[J]. 经济地理, 2015, 35(7): 87. DOI: [10.15957/j.cnki.jjdl.2015.07.013](https://doi.org/10.15957/j.cnki.jjdl.2015.07.013).
- [18] 张顺谦, 马振峰, 陈文秀, 等. 西南地区秋绵雨变化趋势与周期性特征的区域差异[J]. 自然资源学报, 2014, 29(2): 275. DOI: [10.11849/zrzyxb.2014.02.009](https://doi.org/10.11849/zrzyxb.2014.02.009).
- [19] 高阳华, 唐云辉, 李轲, 等. 重庆市绵雨的分类与指标及其时空分布规律[J]. 长江流域资源与环境, 2003, 12(3): 237. DOI: [10.3969/j.issn.1004-8227.2003.03.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-8227.2003.03.008).
- [20] 袁旭, 刘宣飞. 华西秋雨起止与秋冬季节大气环流转换[J]. 气象学报, 2013, 71(5): 913. DOI: [10.11676/qxxb.2013.034](https://doi.org/10.11676/qxxb.2013.034).
- [21] 王遵娅, 丁一汇. 中国雨季的气候学特征[J]. 大气科学, 2008, 32(1): 1. DOI: [10.3878/j.issn.1006-9895.2008.01.01](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2008.01.01).
- [22] 周浩, 李梗, 程炳岩. 重庆秋季降水特征及大气环流异常分析[J]. 气象科学, 2008, 28(4): 444. DOI: [10.3969/j.issn.1009-0827.2008.04.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-0827.2008.04.016).
- [23] 冯丽文, 郭其蕴. 华西秋雨的多年变化[J]. 地理研究, 1983, 2(1): 74.

责任编辑: 何承刚

(上接第 442 页)

- [11] PENG Y, CUI C Y, HE Y X, et al. Down-regulation of EPAS1 transcription and genetic adaptation of tibetans to high-altitude hypoxia[J]. Molecular Biology and Evolution, 2017, 34(4): 818. DOI: [10.1093/molbev/msw280](https://doi.org/10.1093/molbev/msw280).
- [12] MIAO B P, WANG Z, LI Y X. Genomic analysis reveals hypoxia adaptation in the tibetan mastiff by introgression of the gray wolf from the tibetan plateau[J]. Molecular Biology and Evolution, 2017, 34(3): 734. DOI: [10.1093/molbev/msw274](https://doi.org/10.1093/molbev/msw274).
- [13] VONHOLDT B, FAN Z X, VECCHYO O D, et al. EPAS1 variants in high altitude Tibetan wolves were selectively introgressed into highland dogs[J]. PeerJ, 2017, 5: e3522. DOI: [10.7717/peerj.3522](https://doi.org/10.7717/peerj.3522).
- [14] WEI C H, WANG H H, LIU G, et al. Genome-wide analysis reveals adaptation to high altitudes in Tibetan sheep[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 26770. DOI: [10.1038/srep26770](https://doi.org/10.1038/srep26770).
- [15] VERMA P, SHARMA A, SODHI M, et al. Transcriptome analysis of circulating PBMCs to understand mechanism of high altitude adaptation in native cattle of Ladakh Region[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 7681. DOI: [10.1038/s41598-018-25736-7](https://doi.org/10.1038/s41598-018-25736-7).
- [16] WU X Y, DING X Z, CHU M, et al. Novel SNP of EPAS1 gene associated with higher hemoglobin concentration revealed the hypoxia adaptation of yak (*Bos grunniens*)[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14(4): 741. DOI: [10.1016/S2095-3119\(14\)60854-6](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(14)60854-6).
- [17] SEMENZA G L, WANG G L. A nuclear factor induced by hypoxia via de novo protein synthesis binds to the human erythropoietin gene enhancer at a site required for transcriptional activation[J]. Molecular and Cellular Biology, 1992, 12(12): 5447. DOI: [10.1128/MCB.12.12.5447](https://doi.org/10.1128/MCB.12.12.5447). Updated.
- [18] MAKINO Y, CAO R H, SVENSSON K, et al. Inhibitory PAS domain protein is a negative regulator of hypoxia-inducible gene expression[J]. Nature, 2001, 414(6863): 550. DOI: [10.1038/35107085](https://doi.org/10.1038/35107085).
- [19] BEALL C M, CAVALLERI G L, DENG L B, et al. Natural selection on EPAS1 (*HIF2α*) associated with low hemoglobin concentration in Tibetan highlanders[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(25): 11459. DOI: [10.1073/pnas.1002443107](https://doi.org/10.1073/pnas.1002443107).
- [20] YI X, LIANG Y, HUERTA-SANCHEZ E, et al. Sequencing of 50 human exomes reveals adaptation to high altitude[J]. Science, 2010, 329(5987): 75. DOI: [10.1126/science.1190371](https://doi.org/10.1126/science.1190371).
- [21] GILLES L, ARSLAN A D, MARINACCIO C, et al. Downregulation of GATA1 drives impaired hematopoiesis in primary myelofibrosis[J]. Journal of Clinical Investigation, 2017, 127(4): 1316. DOI: [10.1172/JCI82905](https://doi.org/10.1172/JCI82905).

责任编辑: 何馨成