

气候变暖背景下降水变化对中国铁路安全运营秩序的影响

江滢, 陈仲榆*, 张晓美, 王宇虹, 郜婧婧, 胡若愚, 张辉, 吴昊

中国气象局公共气象服务中心, 北京 100086

摘要 通过分析气候变暖背景下中国降水量的时空分布变化、降水强度等级分布的变化以及铁路降水警戒风险时数变化等, 研究了气候变暖背景下降水变化对中国铁路安全运营秩序的影响。研究发现: (1) 近5年, 江南南部和华南等地年降水量显著减少; 西北地区东部和西南地区东北部至江淮和黄淮等地降水量显著增加。年降水量最高的中国铁路广州、南昌和南宁集团有限公司(简称路局)辖区, 年降水量呈减少趋势变化; 郑州、济南和西安路局年降水量呈增加趋势变化。东亚夏季风增强, 副热带高压偏北是降水量变化的主要原因。(2) 全国降水强度变化分布不均, 其中沈阳路局降水强度增强最显著, 南宁路局降水强度减弱最显著。降水强度变化主要与台风和短时强降水的变化有关。(3) 从降水强度等级分布看, 近5年, 乌鲁木齐和兰州路局等西北地区路局的较大降水强度的出现频率有所减少; 南昌和成都路局等西南至江南地区路局的较大降水强度的出现频率有所增多。(4) 广东和海南、西南地区东部、华北东北部至东北东南部是铁路降水出巡风险时数最多的3个高值区; 限速风险时数的高值区位于西南地区东部; 封锁风险时数的高值区范围进一步缩小。综合来看, 在气候变暖的背景下, 中国江南南部和华南等地的降水量显著减少, 降水时数和铁路出巡风险时数有所减少, 铁路限速风险时数略有减少, 铁路降水防控警戒压力有所降低; 中国西南地区东部至东北东部一线铁路出巡风险时数明显增多, 西南地区东部限速和封锁风险时数明显增多, 铁路降水防控警戒压力有所增加, 其中成都路局降水防控警戒压力增加最显著。

关键词 气候变化; 降水分布; 铁路安全运营; 警戒阈值

收稿日期: 2023-06-21; 修回日期: 2023-08-17

基金项目: 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划重点课题(N2021G002)

作者简介: 江滢, 正高级工程师, 研究方向为气候变化、交通气象, 电子信箱: jiangy@cma.cn; 陈仲榆(通信作者), 高级工程师, 研究方向为交通气象, 电子信箱: pmsc_chenzhongyu@sina.com

引用格式: 江滢, 陈仲榆, 张晓美, 等. 气候变暖背景下降水变化对中国铁路安全运营秩序的影响[J]. 科技导报, 2023, 41(21): 58-68; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.21.006

中国地形地貌复杂,降雨分布极不均匀且特征各异。在气候变暖背景下,极端天气事件频发对铁路安全运营带来了极大的威胁。1981—2016年,全国共发生975起降水引发的铁路沿线灾害事故。铁路受降雨诱发的山洪地质灾害事故占所有铁路自然灾害事故的70%以上。2023年7月底受台风杜苏芮影响,河北井径石太铁路桥淹没垮塌,铁路K396、K1178和Z180列车被迫中断数十小时,大量旅客滞留。2021年7月20日,受河南省特大暴雨影响,陇海线30多千米路堤垮塌,大量列车停运。2020年雨季,中国南方地区发生多轮强降雨过程,多个铁路路局水害创历史之最,其中最严重的成都路局水害高达800多处。目前关于气候变化对铁路水害及安全运营影响方面的研究相对较少。Bubeck等^[1]研制了欧洲首个全球变暖影响铁路洪水损坏评估模型,研究发现气候变暖导致的洪水每年对欧洲铁路网造成约5.81亿欧元的损失。Jaiswal等^[2]研究显示,印度南部的尼尔吉里山1987—2007年铁路因降水导致的滑坡事件呈增加趋势变化。徐雨晴等^[3]分析了中国铁路泥石流灾害的分布特征及其变化规律,发现1951—1996年间中国铁路泥石流灾害略呈增加趋势;泥石流灾害是各种内外因素综合作用的结果,除了暴雨、不良地形及地质条件等客观原因之外,一些人为因素也是诱因。徐雨晴等^[4]还发现1951—1998年强降雨诱发的铁路洪水灾害事件有所增加。Zhang等^[5]研究认为,近40年川藏铁路沿线降水无显著变化;近20年,铁路沿线非常潮湿的日数逐渐减少。这些研究多从气候变暖背景下,降水导致的铁路灾害事实的角度进行分析。

中国铁路部门采用雨量警戒制度,用于指导汛期警戒,确保铁路沿线汛期行车安全^[6]。雨量警戒阈值是在对降水影响铁路运营安全的模拟研究基础上,结合国内外相关经验,铁路部门出台的对铁路线路进行出巡、限速和封锁的降水量警戒阈值。本文从降水量变化对达到各警戒阈值时数变化的角度,研究气候变暖对中国铁路安全运营秩序的影响。

1 数据与方法

1.1 降水数据

选取全国国家基本、基准和一般气象站2012年1月1日1时至2021年12月31日24时逐小时降水量数据。该数据符合世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)全球观测系统规范和中国气象局观测技术规范^[7-9],由国家气象信息中心提供。本研究用年降水量,即1年降水量的总和表示某地平均降水特征;用小时最大降水量表示某地降水强度。

1.2 警戒阈值

中国国家铁路集团有限公司采用的路段级铁路雨量警戒阈值中不仅包含了降水量的影响和铁路线路所处地的地质地貌特性,还与该段铁路线路的曲直、坡度和设计标准等线路信息有关。考虑到路段级线路信息的局地性强,其与气候变化的大尺度大气背景关联性较弱,为了既保留铁路线路的综合特点,又尽可能地减小局地信息在大尺度气候变化影响分析中的干扰,针对每个铁路集团有限公司(简称路局)辖区(表1)^[10-11],选取其内最多路段的警戒阈值为该路局的综合警戒阈值,使其在包含了路局线路特性的基础上,能更清楚地反映大尺度气候特征对铁路路局级的警戒阈值的影响。

1.3 降水强度等级分布

降水强度等级分布符合伽马(Γ)分布^[12]

$$f(x) = \frac{\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{x}{\beta}\right)}{\beta\Gamma(\alpha)} \quad x > 0, \alpha > 0, \beta > 0 \quad (1)$$

式中, α 和 β 分别为形状参数和尺度参数。 $\Gamma(\alpha)$ 为 Γ 函数,表达式为

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (2)$$

Γ 的概率密度分布函数为:

$$P(a \leq x \leq b) = \int_a^b f(x) dx \quad (3)$$

考虑到降水强度的等级分布中 α 一般较小,因此,选用Thom^[13]提出的最大似然估计法计算 α 和 β 参数,即首先得到样本算数平均和几何平均的自然

表1 中国铁路集团有限公司辖区范围表

序号	集团有限公司名称	辖区范围
1	哈尔滨	管辖黑龙江全境和内蒙古呼伦贝尔市
2	沈阳	管辖辽宁和吉林全境,内蒙古东南部,黑龙江南部,河北东北部分地区
3	北京	管辖北京、天津和河北的全境及山东、河南和山西省的部分地区
4	太原	管辖石太、京原、太焦、南同蒲、北同蒲、侯月、侯西、京包、大秦9条干线,西山、太古岚、上兰村、忻河、介西、礼垣、口泉、云岗、宁岢和平朔10条支线
5	呼和浩特	管辖北傍阴山,南沿黄河;由西向东穿越二盟(阿拉善、锡林郭勒)、六市(呼和浩特、包头、乌海、鄂尔多斯、巴彦淖尔、乌兰察布)
6	郑州	管辖京广、陇海、京九、焦柳、侯月、太焦、新焦、宁西等线路和郑州、洛阳、商丘、新乡、月山、南阳等铁路枢纽
7	武汉	管辖区铁路线路连接湖北、河南、湖南、江西、陕西、安徽6省
8	西安	管辖陕西全境,甘肃、宁夏、河南、山西、四川、湖北、重庆等省市部分地区
9	济南	管辖京沪铁路中段、京九铁路的北段、陇海铁路的东端
10	上海	管辖安徽、江苏、浙江和上海
11	南昌	管辖东至台湾海峡西岸,西至湘赣省界,北至湖北、安徽省界,南至赣粤省界
12	广州	管辖广东、湖南、海南3省境内铁路
13	南宁	管辖广西壮族自治区和广东、贵州、湖南3省的部分地区
14	成都	管辖四川、贵州、云南、重庆3省1市的部分地区
15	昆明	管辖云南、四川、贵州3省的部分地区
16	兰州	管辖甘肃、宁夏2省(区)
17	乌鲁木齐	管辖兰新线和南疆线2条干线
18	青藏集团	管辖甘肃、青海、西藏自治区3省,东至兰青线的海石湾站与兰州路局交界,西(南)抵拉萨

对数之差(式(4)),形状参数和尺度参数由式(5)(单位与统计物理量相同)和式(6)(无量纲)给出。式(4)中 n 为各个站点降水强度超过0.1 mm的总样本数。

$$T = \ln(\bar{x}) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i) \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{1}{4T} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4T}{3}} \right) \quad (5)$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad (6)$$

Γ 分布的具体形状受控于 α 和 β 。对于给定的尺度参数 β , α 越小,概率密度大值越靠左,较小量级的降水强度出现概率越大。 β 尺度参数控制着分布函数曲线的拉伸和收缩程度,即对于给定的 α , β 越大,表明各个等级降水强度概率密度分布越集中;而 β 越小,不同等级降水强度分布越分散。

2 降水量变化对铁路安全运营秩序的影响

2.1 降水量

中国年降水量呈东多西少,南多北少;从东南沿海向西北内陆呈逐渐减少的分布特征^[14-16](图1(a))。江南和华南地区年降水量超过1800 mm,内蒙古中部和新疆西部等地年降水量小于50 mm。与历史时期(2012—2016年)相比,近5年(2017—2021年),江南南部和华南等地年降水量显著减少,其中广东、广西、福建和浙江南部地区年降水量减少200 mm以上;中国北方大部地区年降水量略呈增加趋势变化,其中西北东部和西南东北部地区至江淮和黄淮等地年降水量增加200 mm以上(图1(b))。中国大部地区属于明显的季风气候区,降

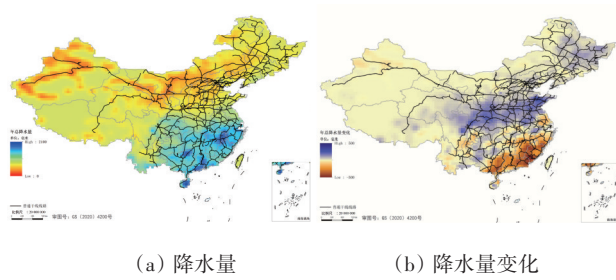


图1 年总降水量及其变化空间分布图

水主要来自东亚夏季风^[17-18]。近年来,东亚夏季风强度增强,副热带高压偏北^[19-20],副热带高压北缘区域降水增加,南缘区域降水量减少,即形成了中

国西北东部和西南东北部地区至江淮和黄淮等地年降水量增加,而江南和华南等地降水量减少的变化特征。

对于铁路路局,武汉、上海、南昌、广州、南宁、成都、昆明路局的年降水量超过1000 mm。全国多数路局年降水量呈增加趋势变化,其中郑州、济南和西安路局降水量增加显著,平均每年分别增加29.6、27.4和24.5 mm。对铁路安全运行有利的是,年降水量最多的广州、南昌和南宁路局年降水量呈减少趋势,平均每年分别减少33.7、15.3和9.6 mm(表2)。

表2 中国铁路集团有限公司年降水量和降水强度统计

序号	集团有限公 司名称	年降水量			降水强度		
		降水量/ mm	变化值/ mm	变化趋势/ (mm·a ⁻¹)	降水量/ mm	变化值/ mm	变化趋势/ (mm·a ⁻¹)
1	哈尔滨	578.6	95.9	14.4*	72.7	0.6	-4.2
2	沈阳	550.6	44.1	9.1*	88.7	2.4	16.7*
3	北京	537.4	53.2	13.4*	97.8	1.2	4.2
4	太原	499.0	69.3	13.4*	68.4	2.2	9.5*
5	呼和浩特	278.1	7.7	-1.3	42.6	-0.7	-2.8
6	郑州	719.9	150.0	29.6*	86.4	0.6	-1.4
7	武汉	1230.7	46.5	18.8	83.0	0.9	7.0
8	西安	650.3	170.3	24.5*	63.0	-0.4	-9.8
9	济南	672.6	164.3	27.4*	91.8	-0.2	-0.8
10	上海	1353.1	5.5	16.9	108.2	1.8	13.6
11	南昌	1643.2	-183.3	-15.3	94.8	3.1	11.6*
12	广州	1809.5	-262.8	-33.7*	113.5	0.7	-0.3
13	南宁	1532.5	-68.8	-9.6	104.4	-2.9	-18.8*
14	成都	1078.3	66.6	10.6*	97.5	1.7	5.6
15	昆明	1026.2	-10.6	-0.8	82.0	0.8	1.3
16	兰州	404.4	80.9	7.6*	52.3	-0.4	-1.3
17	乌鲁木齐	174.3	-25.0	-2.0	32.7	-1.1	-0.3
18	青藏集团	431.0	57.1	7.2*	40.1	0.6	5.9
19	全国	842.8	25.6	7.2*	78.9	0.6	2.0

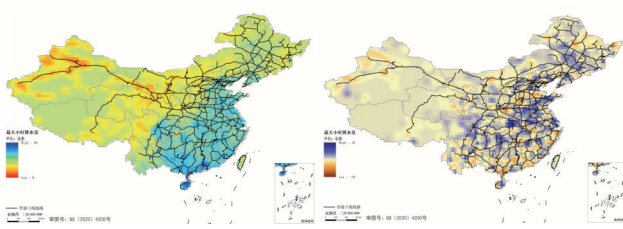
注:降水量的变化值为2017—2021年平均与2012—2016年平均的差值;*通过90%信度检验。

2.2 降水强度

降水强度的空间分布与年降水量的分布特征相似,均呈东南强(多)、西北弱(少);从辽东半岛至云南东南部是降水强度为35 mm的分界线,广西、广东和海南为降水强度的高值中心(图2(a))。与历史相比,近5年降水强度变化的区域性弱、局地性强;其中江淮、黄淮和江汉地区降水强度增强较

明显,超过6 mm(图2(b))。

降水量大的路局,其降水强度也强;但降水强度变化显著的区域与降水量变化显著区域并不一致。沈阳路局的降水强度增加最显著,其次是上海和南昌路局;南宁路局的降水强度减小最显著,其次是西安路局。降水强度的变化与台风和局地强对流的变化有关。



(a) 降水强度 (b) 降水强度变化
图2 降水强度及其变化空间分布

2.3 降水强度等级分布

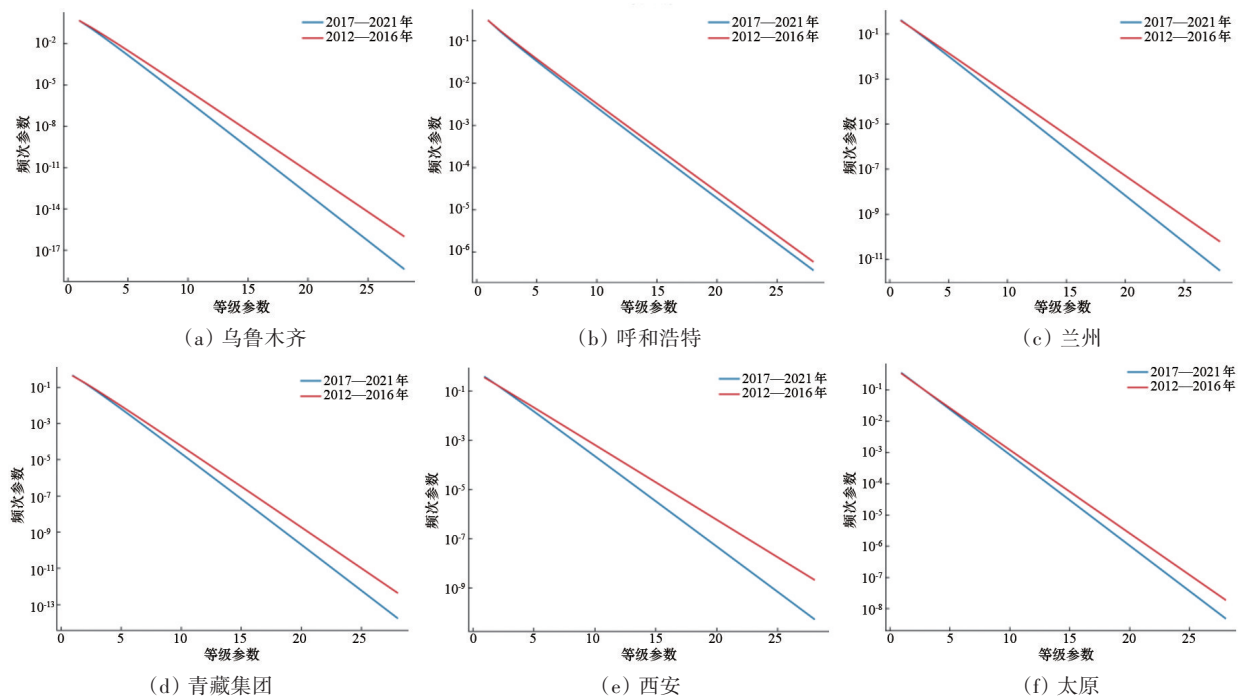
不仅降水量和降水强度的变化能影响到铁路的安全运营,不同等级的降水强度发生频次的变化亦可影响到铁路警戒或巡查策略,受到铁路部门和研究人员的关注。

从降水强度等级分布特征(图3)看,各路局均表现为较小的降水强度出现频次多;随着降水强度的增加,其出现频次快速减少;且各路局之间降水强度等级分布差异明显(图3(c))。相较于各路局间降水强度等级分布的差异,近5年各个路局降水强度等级分布变化较小(图3(a)和(b))。

为了更清楚地呈现各路局降水强度等级分布的变化特征,利用各路局降水强度 Γ 分布的形状参数 α 和尺度参数 β ,绘制以10为底的对数坐标的 Γ 分布图(图4)。从图4中可知,近5年,乌鲁木齐、兰州、青藏集团、西安、武汉等路局的较大降水强度的出现频率有所减少;南昌、成都、郑州、上海、沈阳等路局的较大降水强度的出现频率有所增加;呼和



(a) 南宁 (b) 沈阳 (c) 南宁、沈阳和武汉对比
图3 中国铁路南宁、沈阳和武汉集团有限公司降水强度等级分布



(a) 乌鲁木齐 (b) 呼和浩特 (c) 兰州 (d) 青藏集团 (e) 西安 (f) 太原
图4 中国铁路集团有限公司降水强度等级 Γ 分布变化

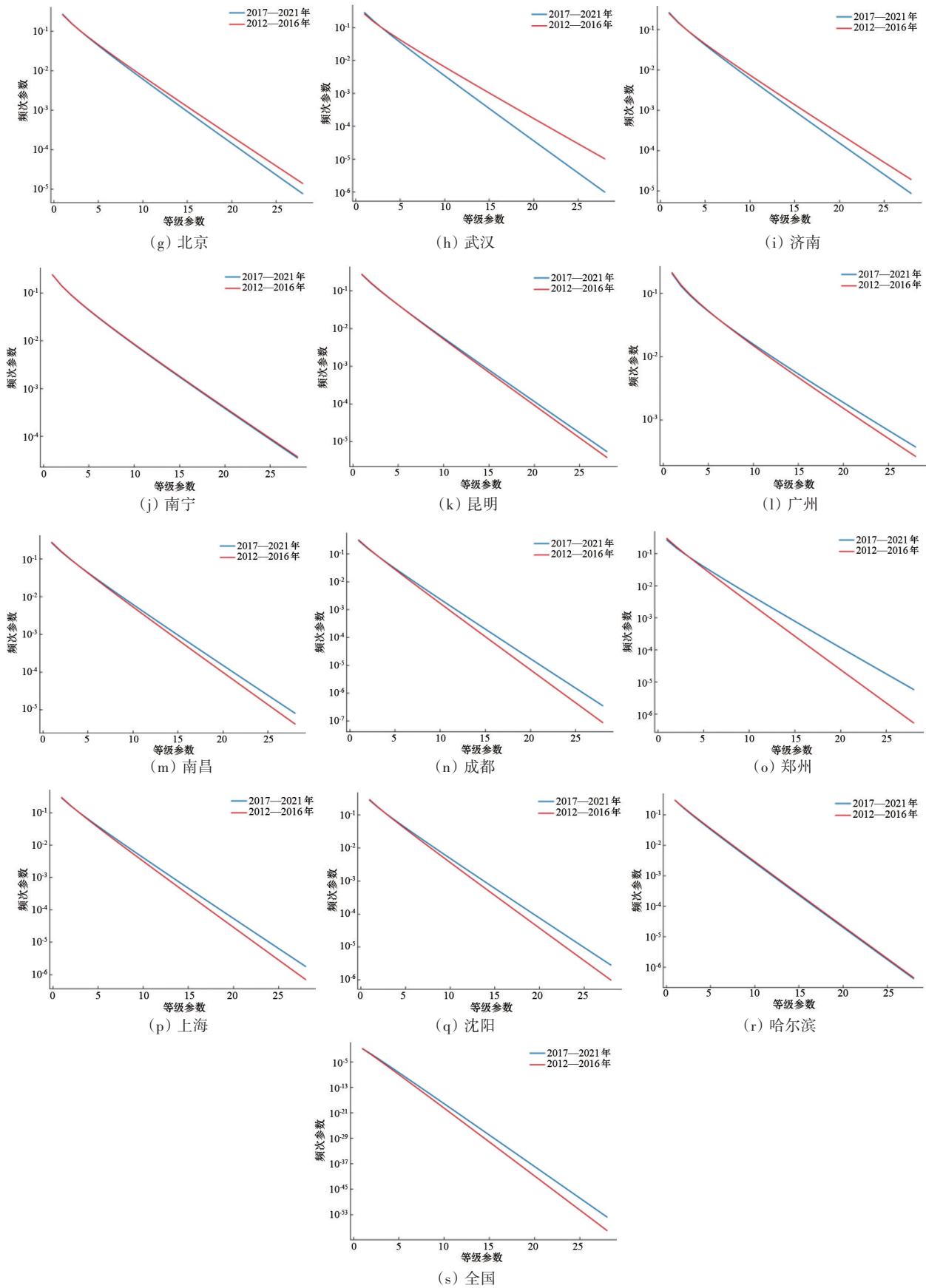


图4 中国铁路集团有限公司降水强度等级 Γ 分布变化(续)

浩特、太原、北京、济南、南宁、广州、昆明和哈尔滨等路局的降水强度等级分布无明显变化。特别值得注意的是,兰州和西安路局年降水量有所增加,但降水强度呈减弱趋势变化,较大降水强度出现的概率有所减少,降水防控警戒压力有所减小;南昌路局年降水量有所减少,但降水强度呈增强趋势变化,较大降水强度出现的概率有所增加,降水防控警戒压力有所增加(表2、图4)。

2.4 气候变化对铁路安全运营秩序的影响

从空间分布看,中国西南地区东部至江南和江淮地区降水时数最多(超过2000 h·a⁻¹),其次是西南大部、华南、西北的东南部、黄淮和东北东部,降水时数超过1500 h·a⁻¹(图5(a))。与历史相比,近

5年,江南和华南降水时数呈明显的减少趋势变化,其中华南大部地区降水时数减少超过300 h;中国其余绝大部分地区降水时数增加或无明显变化,其中西北东部和西南东北部至黄淮和江淮地区降水时数增加超过100 h,局部地区增加超过300 h(图5(b))。对于铁路路局,南昌路局降水时数最多(2746 h·a⁻¹),武汉、上海、广州、南宁和成都路局的降水时数超过2000 h·a⁻¹(表3)。与历史相比,近5年西安路局降水时数增加最多(433 h),其次是济南、郑州和兰州路局(超过200 h);广州路局降水时数减少最多(359 h),其次是南昌路局(280 h)(表4)。

表3 中国铁路集团有限公司降水警戒风险时数统计

(单位:h·a⁻¹)

序号	集团有限公司名称	降水时数	出巡风险时数	限速风险时数	封锁风险时数
1	哈尔滨	1159	20.6	2.9	0.6
2	沈阳	978	67.2	4.5	1.2
3	北京	863	41.1	4.2	1.6
4	太原	1009	24.1	1.4	1.6
5	呼和浩特	578	8.0	3.0	0.2
6	郑州	1317	46.4	4.7	1.0
7	武汉	2235	75.3	10.8	3.2
8	西安	1407	38.9	4.3	1.8
9	济南	1033	30.2	4.5	0.2
10	上海	2411	11.9	3.1	0.4
11	南昌	2746	55.3	0.3	0.6
12	广州	2180	201.8	4.7	1.7
13	南宁	2151	17.5	6.6	4.2
14	成都	2034	76.9	18.7	6.9
15	昆明	1801	16.5	14.8	1.3
16	兰州	984	6.5	1.9	0.4
17	乌鲁木齐	505	4.3	0.3	0.2
18	青藏集团	1172	22.3	1.5	0.6
19	全国	1476	42.5	5.1	1.5

表4 中国铁路集团有限公司警戒风险时数变化表

(单位:h)

序号	集团有限公司名称	降水时数	出巡风险时数	限速风险时数	封锁风险时数
1	哈尔滨	185	3.4	0.6	-0.1
2	沈阳	40	7.4	0.8	0.2
3	北京	110	-0.1	0.1	0.0
4	太原	182	0.1	0.0	-0.3
5	呼和浩特	69	-1.7	0.1	0.0
6	郑州	210	14.8	2.1	0.2
7	武汉	179	-3.2	1.2	0.8

表4 中国铁路集团有限公司警戒风险时数变化表(续)

(单位:h)

序号	集团有限公司名称	降水时数	出巡风险时数	限速风险时数	封锁风险时数
8	西安	433	5.2	0.3	-0.2
9	济南	257	6.9	0.5	0.0
10	上海	20	2.6	0.5	0.1
11	南昌	-280	-4.2	0.0	0.1
12	广州	-359	-25.9	-0.8	-0.1
13	南宁	-78	-1.4	-0.6	-0.4
14	成都	72	7.7	3.5	2.0
15	昆明	-24	0.7	0.5	0.2
16	兰州	207	1.4	-0.2	0.0
17	乌鲁木齐	-68	-0.7	0.0	-0.1
18	青藏集团	161	1.9	-0.1	-0.1
19	全国	73	0.8	0.5	0.1

注:警戒风险时数变化为2017—2021年平均与2012—2016年平均的差值。

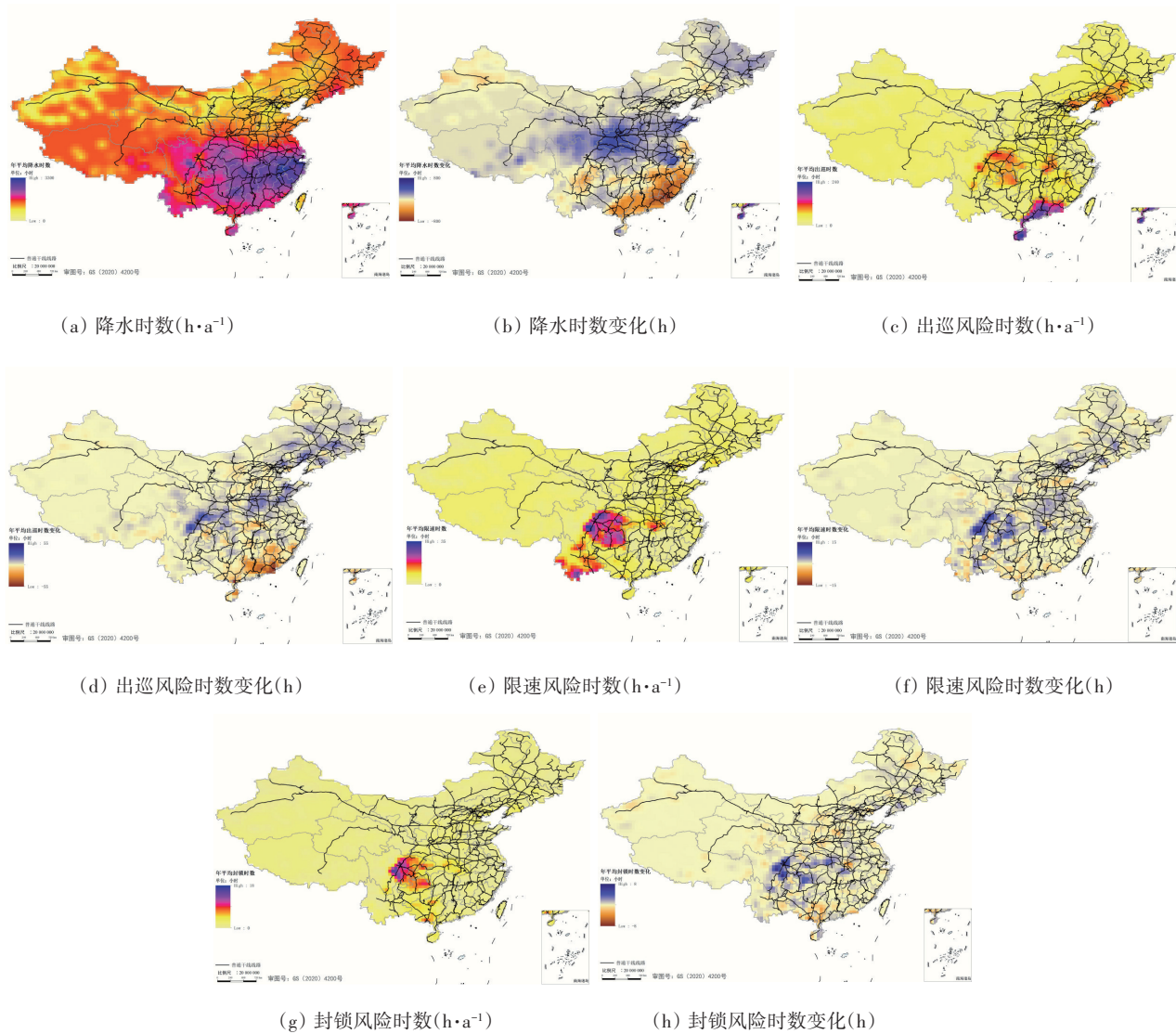


图5 年平均警戒风险时数及其变化空间分布

铁路安全出巡风险时数在广东和海南、西南地区东部、华北东北部至东北东南部地区为3个高值区,出巡风险时数超过 $70.0\text{ h}\cdot\text{a}^{-1}$,局部超过 $100.0\text{ h}\cdot\text{a}^{-1}$;全国其余大部地区出巡风险时数小于 $50.0\text{ h}\cdot\text{a}^{-1}$ (图5(c))。与历史时期相比,近5年华南部分地区出巡风险时数显著减少(超过 20.0 h),西南地区东部至东北东部一线出巡风险时数明显增加(局部增加超过 20.0 h ,图5(d))。广州路局出巡风险时数最多($201.8\text{ h}\cdot\text{a}^{-1}$);其次是成都、武汉、沈阳和南昌路局(超过 $50.0\text{ h}\cdot\text{a}^{-1}$)。近5年,广州路局出巡风险时数减少最多(25.9 h),其次是南昌路局(4.2 h);郑州路局出巡风险时数增加最多(14.8 h),其次是成都、沈阳、济南和西安路局(均超过 5.0 h)。

西南地区东部和南部是中国铁路限速风险时数的高值区,超过 $10.0\text{ h}\cdot\text{a}^{-1}$,局部超过 $15.0\text{ h}\cdot\text{a}^{-1}$;全国其余大部地区限速风险时数低于 $5.0\text{ h}\cdot\text{a}^{-1}$ (图5(e))。成都路局限速风险时数最多($18.7\text{ h}\cdot\text{a}^{-1}$),其次是昆明和武汉路局(超过 $10.0\text{ h}\cdot\text{a}^{-1}$)。近5年除了西南地区东部限速风险时数增加显著(5.0 h)外,全国其余大部地区限速风险时数变化不超过 2.0 h 。成都路局限速风险时数增加最显著(3.5 h),其次是郑州和武汉路局(分别增加 2.1 h 和 1.2 h);广州和南宁路局限速风险时数减少最显著(分别减少 0.8 h 和 0.6 h)。

封锁风险时数的高值区仅集中在西南地区东部地区,超过 $5.0\text{ h}\cdot\text{a}^{-1}$;局部超过 $8.0\text{ h}\cdot\text{a}^{-1}$ (图5(g))。成都路局封锁风险时数最多,其次是南宁和武汉路局。近5年,封锁风险时数变化较明显的区域集中在西南东部的部分地区,其中成都路局封锁风险时数增加最显著(2.0 h),其次是武汉路局(0.8 h)。

3 结论

1) 中国年降水量呈东多西少,南多北少;从东南沿海向西北内陆逐渐减少的空间分布。近5年,江南南部和华南等地的年降水量显著减少;西北东部和西南东北部区域至江淮和黄淮等地的年降水

量显著增加。位于年降水量高值区的广州、南昌和南宁路局年降水量呈减少趋势;位于降水量由多向少快速变化带上的郑州、济南和西安路局年降水量呈增加趋势。中国大部分地区属于明显的季风区,降水量变化与东亚夏季风强弱和副热带高压位置密切相关。

2) 中国年降水量大的区域降水强度也强,降水强度变化显著的区域与降水量显著变化区域并不一致。近5年,中国铁路沈阳路局的降水强度增加最显著,其次是上海和南昌路局;南宁路局的降水强度减小最明显,其次是西安路局。降水强度的变化与台风和局地强对流的变化有关。

3) 从降水强度等级分布特征看,近5年,中国铁路乌鲁木齐、兰州、青藏集团、西安、武汉路局的较大降水强度的出现频率有所减少;南昌、成都、郑州、上海、沈阳路局的较大降水强度的出现频率有所增加。值得注意的是,兰州和西安路局年降水量有所增加,而降水强度呈减小趋势;南昌路局年降水量有所减少,但降水强度呈增加趋势。

4) 广东和海南、西南地区东部、华北东北部至东北东南部区域为铁路出巡风险时数的3个高值区,高值区域内广州路局出巡风险时数最多($210.8\text{ h}\cdot\text{a}^{-1}$)。限速风险时数的高值区范围缩小至西南地区东部,高值区域内成都路局限速风险时数最多($18.7\text{ h}\cdot\text{a}^{-1}$)。封锁风险时数的高值区范围进一步缩小,其中成都路局封锁风险时数最多($6.9\text{ h}\cdot\text{a}^{-1}$)。与历史相比,近5年,广州路局的出巡风险时数减少最多(25.9 h),郑州路局增加最多(14.8 h);广州路局限速风险时数减少最多(0.8 h),成都路局增加最多(3.5 h);成都路局封锁风险时数增加最多(2.0 h)。

综合看,在气候变暖的背景下,中国江南南部和华南等地的降水量显著减少,降水时数和铁路出巡风险时数有所减少,铁路限速风险时数略有减少,铁路降水防控警戒压力有所降低;中国西南地区东部至东北东部一线铁路出巡风险时数明显增加,西南地区东部限速和封锁风险时数增加明显,铁路降水防控警戒压力有所增强;成都路局降水防控警戒压力增加最大。

参考文献(References)

- [1] Bubeck P, Dillenaar L, Alfieri L, et al. Global warming to increase flood risk on European railways[J]. *Climatic Change*, 2019, 155: 19–36.
- [2] Jaiswal P, Westen C J, Jetten V. Quantitative assessment of landslide hazard along transportation lines using historical records[J]. *Landslides*, 2011, 8: 279–291.
- [3] 徐雨晴, 何吉成. 1951—1996年中国铁路泥石流灾害的时空特征[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(1): 337–342.
- [4] 徐雨晴, 何吉成. 1951—1998年强降雨诱发的中国铁路洪水灾害分析[J]. *气候变化研究进展*, 2012, 8(1): 22–27.
- [5] Zhang J P, Zhao T B, Zhou L B, et al. Historical changes and future projections of extreme temperature and precipitation along the Sichuan-Tibet railway[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2021, 35(3): 402–415.
- [6] 中国铁路总公司. 铁路防洪工作管理办法(铁总运〔2017〕8号)[EB/OL]. (2021-04-23)[2022-08-18]. <http://www.guimei8.com/6352.html>.
- [7] 中国气象局. 地面观测[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 51–57.
- [8] World Meteorological Organization (WMO). Guidelines on quality control procedures for data from automatic weather stations[EB/OL]. (2004-01-01) [2023-06-16]. http://www.researchgate.net/publication/228826920_Guidelines_on_Quality_Control_Procedures_for_Data_from_Automatic_Weather_Stations.
- [9] Song F, Hu Q, Qian W H. Quality control of daily meteorological data in China, 1951–2000: A new dataset[J]. *International Journal of Climatology*, 2004, 24(7): 853–870.
- [10] 中国国家铁路集团有限公司. 中国国家铁路集团有限公司组织机构情况[EB/OL]. (2017-12-31)[2023-07-20]. <http://www.china-railway.com.cn/gsjz/zjzg.html>.
- [11] 交通百科网. 全国18个铁路局有哪些[EB/OL]. (2018-04-29)[2023-08-20]. <http://www.jiaotongbk.com/n8/863-51.html>.
- [12] 田付友, 郑永光, 毛冬艳, 等. 基于 Γ 函数的暖季小时降水概率分布[J]. *气象*, 2014: 787–795.
- [13] Thom H C S. A note on the gamma distribution[J]. *Monthly Weather Review*, 1958, 86: 117–122.
- [14] 丁一汇. 中国气候: 第1版[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 115–205.
- [15] 郑国光. 中国气候: 第1版[M]. 北京: 气象出版社, 2019: 54–61.
- [16] 崔丹阳. 东亚季风期极端降水事件与亚洲夏季风活动的关系[D]. 兰州: 兰州大学大气科学系, 2019.
- [17] 高国栋, 陆渝蓉. 气候学: 第1版[M]. 北京: 气象出版社, 1998: 222–248.
- [18] Zhou X X, Ding Y H, Wang P X. Moisture transport in the Asian Summer Monsoon region and its relationship with summer precipitation in China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2010, 24(1): 31–42.
- [19] Hu H B, Deng Y H, Fang J B. Mechanism of regional subseasonal precipitation in the strongest and weakest East Asian Summer Monsoon subseasonal variation years[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2022, 21: 1411–1427.
- [20] Zhang R H. Changes in East Asian summer monsoon and summer rainfall over eastern China during recent decades[J]. *Science Bulletin*, 2015, 60(13): 1222–1224.

Impact of precipitation changes on the safety of railway operations in China under global warming

JIANG Ying, CHEN Zhongyu*, ZHANG Xiaomei, WANG Yuhong, GAO Jingjing, HU Ruoyu, ZHANG Hui, WU Hao

Public Meteorological Service Centre of China Meteorological Administration, Beijing 100086, China

Abstract Complex topography along with unevenly distributed precipitation and changes in climate pattern make mountainous regions railway in China vulnerable to water-related geological hazards and rainfall-induced floods. This study investigates the impact of global warming on the safe operation of railways by analyzing the spatial and temporal variations of precipitation, changes in precipitation level distributions, and variations in the threshold hours for rainfall alert levels. The findings are as follows: (1) In recent years, there has been a significant decrease in annual precipitation in southern Jiangnan and south China, while there has been a significant increase in precipitation in the eastern parts of northwest and the northeastern parts of southwest. Management Areas of Guangzhou, Nanchang and Nanning Railway Bureaus have the highest annual precipitation which shows a decreasing trend, while areas of Zhengzhou, Jinan, and Xi'an Bureaus show an increasing trend in annual precipitation. The strong East Asian summer monsoon and the northward shift of the subtropical high are the main causes of precipitation changes. (2) Shenyang Bureau shows the most significant increase in precipitation intensity, while Nanning Bureau shows the most significant decrease. The changes in precipitation intensity are mainly related to variations in typhoons and short-duration heavy rainfall. (3) From the perspective of precipitation level distribution, in the past five years there has been a decrease in the frequency of heavy precipitation occurrence in bureaus such as Urumqi and Lanzhou in the northwest region, while there has been an increase in the frequency of heavy precipitation occurrence in bureaus such as Nanchang and Chengdu in the southwest to Jiangnan region. (4) Guangdong, Hainan, the eastern parts of the southwest region, and the northeastern parts of North China to the southeastern parts of Northeast China are the three high-value areas for railway alert hours due to precipitation. The high-value area for speed restriction hours has narrowed down to the eastern parts of the southwest region, and the high-value area for closure hours has further narrowed down. Overall, under the background of climate change, there has been a significant decrease in precipitation in southern Jiangnan and South China, leading to a reduction in rainfall hours and railway patrol hours, a slight decrease in speed restriction hours, and a decrease in the alert pressure for railway precipitation control. On the other hand, there has been a significant increase in railway patrol hours in the eastern parts of the southwest region to the northeastern parts of Northeast China, with a noticeable increase in speed restriction and closure hours in the eastern parts of the southwest region. This has resulted in an enhancement of alert pressure for railway precipitation control, with Chengdu Bureau showing a significant increase in patrol hours, speed restriction hours, and closure hours.

Keywords climate change; precipitation distribution; the safety of railway operations; alert threshold ●



(责任编辑 傅雪)