

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.01.013.

安彬, 肖薇薇, 朱妮, 等. 1960—2017年黄土高原不同等级寒冷日数时空演变特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 327-335.

AN Bin, XIAO Weiwei, ZHU Ni, et al. Spatiotemporal Evolution Characteristics of Cold Days with Different Grades in the Loess Plateau During 1960—2017[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 327-335.

1960—2017年黄土高原不同等级 寒冷日数时空演变特征

安彬^{1,2}, 肖薇薇^{1,3}, 朱妮¹, 刘宇峰⁴, 单治彬¹

(1.安康学院 旅游与资源环境学院/陕西省院士专家工作站, 陕西 安康 725000;

2.安康市汉江水资源保护与利用工程技术研究中心, 陕西 安康 725000;

3.陕南乡村振兴研究中心, 陕西 安康 725000; 4.咸阳师范学院 地理与环境学院, 陕西 咸阳 712000)

摘 要:为正确认识全球气候变暖背景下黄土高原不同等级寒冷天气日数的变化特征,利用1960—2017年黄土高原58个站点的逐日最低气温数据,分析了不同等级寒冷(严寒、大寒、小寒、轻寒、微寒、凉)和总寒天气日数时空演变和波动特征,并探讨其对Hiatus现象的响应。结果表明:(1)随着寒冷等级的降低,1960—2017年黄土高原不同寒冷等级日数逐渐增加,且表现出明显空间差异特征,研究期黄土高原多数区域以大寒日数为主,其次是轻寒和凉日数。(2)黄土高原严寒、大寒、凉和总寒日数多呈减少趋势,小寒、轻寒和微寒日数均以增加趋势为主,且总寒日数减少主要是由大寒日数减少导致的;变暖停滞(Hiatus)现象发生后,严寒、大寒、微寒和凉天气日数变化趋势均以偏高为主,小寒和轻寒日数变化趋势均以偏低为主,总寒日数变化趋势偏高与偏低分布相当。(3)黄土高原寒冷日数的变异系数随着寒冷等级的升高逐渐变小,各等级寒冷日数的波动特征空间分布较为复杂;Hiatus现象发生后,小寒、轻寒和微寒日数波动变化以偏低为主,大寒日数以偏低为主,总寒、严寒和凉日数波动偏高和偏低大致相当。综上,未来需要提防黄土高原地区小寒、轻寒和微寒对农业造成的低温冻害。

关键词:寒冷等级;寒冷日数;时空演变;变暖停滞;黄土高原

中图分类号:P468

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)01-0327-09

Spatiotemporal Evolution Characteristics of Cold Days with Different Grades in the Loess Plateau During 1960—2017

AN Bin^{1,2}, XIAO Weiwei^{1,3}, ZHU Ni¹, LIU Yufeng⁴, SHAN Zhibin¹

(1.School of Tourism & Environment/Academician and Expert Workstation of Shaanxi Province, Ankang University, Ankang, Shaanxi 725000, China; 2.Engineering Technology Research Center for

Water Resource Protection and Utilization of Hanjiang River, Ankang, Shaanxi 725000, China;

3.Research Center for Rural Revitalization in Southern Shaanxi, Ankang, Shaanxi 725000, China;

4.School of Geography and Environment, Xianyang Normal University, Xianyang, Shaanxi 712000, China)

Abstract: In the context of global warming, a correct understanding of the spatial distribution and evolution of cold weather days with different grades in the Loess Plateau can provide a strong reference for disaster prevention and mitigation. Based on the daily minimum temperature data of 58 meteorological stations over the Loess Plateau from 1960 to 2017, we analyzed the spatiotemporal evolution and fluctuation characteristics of cold days (severe cold, major cold, minor cold, light cold, minor cold, cool) and total cold days, and explored their responses to Hiatus phenomenon. The results show that the number of days with different cold grades gradually increased with the decrease of cold grades in the Loess Plateau during 1960—2017, and

收稿日期:2021-10-17

修回日期:2021-11-13

资助项目:陕西省科技厅项目“关中平原人地经济系统环境适应性评价及社会多元主体参与治理机制研究”(2021KRM033);安康学院校级科研项目“汉江流域极端气候事件时空演变特征研究”(2021AYPT16)

第一作者:安彬(1988—),男,江西九江人,硕士,副教授,研究方向:区域环境评价与GIS应用。E-mail:leyang1007@126.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

there were obvious spatial differences; during the study period, the number of major cold days was dominant in most areas of the Loess Plateau, followed by the number of light cold days and cool days; the number of cold days, major cold days, cold days and total cold days showed a decreasing trend, while the number of minor cold days, light cold days and mild cold days showed an increasing trend; the decrease of total cold days was mainly caused by the decrease of major cold days; after the occurrence of Hiatus, the variation trend of cold days, major cold days, minor cold days and cold days was mainly on the high side, while the variation trend of minor cold days and light cold days was mainly on the low side, and the variation trend of total cold days was similar; the variation coefficient of cold days on the Loess Plateau decreased with the increase of cold grades, and the spatial distribution of cold days on the loess Plateau was complex; after the occurrence of Hiatus, the fluctuations of minor cold days, light cold days and mild cold days were mainly on the low side, while those of major cold days were mainly on the low side; the fluctuations of total cold days, cold days and cool days were on the high side and on the low side. In the future, we need to beware of minor cold, light cold and slight cold caused by low temperature and freezing damage to agriculture.

Keywords:cold grade; cold days; spatiotemporal evolution; Hiatus; Loess Plateau

IPCC 第一工作组第六次评估报告 (AR6) 指出: 人类活动导致地球变暖, 高温极端天气发生强度频率迅速增加, 如热浪和干旱事件的发生时间很接近、甚至是同时发生^[1], 而诸如寒潮、冷昼等极端低温冰冻事件将可能趋于减少^[2-4], 影响了区域社会经济发展和公众的健康^[5-6]。近年来, 类似于 2018 年初美国东部的“寒流炸弹”、2008 年初中国南方的低温雨雪等^[7]典型极端低温冰冻事件屡有发生, 对人身生命安全及交通、电力等基础设施造成了巨大损失。为此, 国内外学者对全球不同尺度的冰冻、寒潮等极端低温事件变化特征^[4,8-11]以及发生原因^[11-13]展开研究, 并取得丰富的研究成果。

黄土高原 (33°41′—41°16′N, 100°52′—114°33′E) 处于我国东部季风区向西北干旱区的过渡地带, 是全球生态环境脆弱带、气候变化敏感区之一。相关研究表明, 自 1960s 以来黄土高原地区的降水量、降水日数持续下降^[14], 冷昼、冷夜、冰冻和霜冻日数显著下降^[15], 气候呈明显暖干化趋势^[16]。然而, 1997—2013 年期间全球出现了温室气体浓度持续增长, 地面气温没有明显增加甚至出现变冷的全球变暖停滞 (Hiatus) 现象^[17], 黄土高原地区气温变化对 Hiatus 现象响应明显, 且表现出季节差异^[18]。当前学界多关注的是黄土高原极端高温事件, 而对不同等级寒冷天气日数研究鲜有报道。全球变暖停滞现象前后, 黄土高原地区极端气候如何变化, 尤其是寒冷天气日数如何变化? 藉此, 本文结合气象行业的“寒冷程度等级”标准, 利用黄土高原地区 1960—2017 年逐日最低气温资料, 分析不同等级寒冷天气日数时空演变特征, 并探讨其对 Hiatus 现象的响应, 为正确认识黄土高原地区寒冷天气变化规律及制定服务三农等措施提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 研究资料

本文采用的逐日最低气温 (T_{\min}) 数据均来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>), 通过经台站气温极值、气候界限值、缺失或错误数据低于 2% 等质量控制, 建立了黄土高原地区 (1960—2017 年) 均一、稳定的日最低气温序列, 58 个气象站点具体位置见图 1。

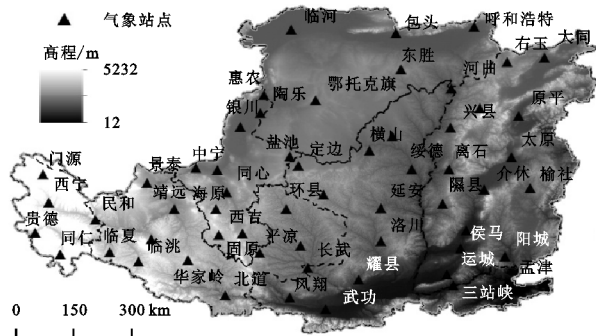


图 1 黄土高原地区气象站点分布

1.2 方法

参照气象学“寒冷程度等级”^[10,19], 结合黄土高原实际情况, 本文研究的寒冷等级从高到低有: 严寒 ($T_{\min} < -20^{\circ}\text{C}$)、大寒 ($-20^{\circ}\text{C} \leq T_{\min} < -10^{\circ}\text{C}$)、小寒 ($-10^{\circ}\text{C} \leq T_{\min} < -5^{\circ}\text{C}$)、轻寒 ($-5^{\circ}\text{C} \leq T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$)、微寒 ($0^{\circ}\text{C} \leq T_{\min} < 5^{\circ}\text{C}$)、凉 ($5^{\circ}\text{C} \leq T_{\min} < 10^{\circ}\text{C}$)。在此基础上, 分别统计黄土高原 58 个气象站点 T_{\min} 相应寒冷等级日数, 总寒冷日数为 6 个等级寒冷日数总和。各等级寒冷天气日数的变化趋势和波动特征 (CV) 分别采用线性拟合法、变异系数法计算分析, 具体计算步骤参考文献^[20]; 基于计算结果, 利用 Arc GIS 10.2 中反距离权重插值法 (IDW) 表达空间变化特征。为了对比 1997 年 Hiatus 现象前后黄土高原不同等级寒冷天气变化差异, 采用 1997 年后 (1998—

2017 年)减去 1997 年前(1960—1997 年)各等级寒冷日数的变化趋势和波动特征。

2 结果与分析

2.1 不同等级寒冷日数空间分布特征

受地理位置、地势地形等因素综合影响,1960—2017 年黄土高原不同寒冷等级日数表现出明显的空间差异(图 2);整体上随着寒冷等级的降低而逐渐增加(表 1)。具体来看,黄土高原地区严寒日数自北向南逐渐减少,东北部和西北部局部地区的严寒日数超过了 40 d,大部分地区的严寒日数低于 5 d,其中黄土高原南部的甘肃北道至河南孟津一带未曾出现过严寒天气。山西北部、青海西部和内蒙古等地区的大寒日数均超过了 60 d,而汾渭河谷地南部和河南北部的大寒日数低于 15 d,与严寒天气日数的空间分布特征相似。对于小寒日数而言,在空间整体上表现出西高东低格局,黄土高原中部、东部等广大地区的小寒日数为 35~45 d,中宁至长武以西、山西太原周边等地区则介于 45~55 d,其中以甘肃华家岭站以 63 d 为最高。1960—2017 年黄土高原轻寒天气日数自北向南逐渐增加,表现出较为明显的纬向地带性特征;其中银川一定边一兴县以北地区的轻寒日数普遍低于 45 d,关中平原西南部的轻寒日数则高于 65 d。黄土高原微寒天气日数空间上呈北少南多、东少西多特征,以西部门源的 82.1 d 为最多;全区中部和北部广大地区的微寒日数均低于 45 d,自甘肃东北部、陕西中南部、山西与河南交界等地区形成了 45~50 d 带状分布区。黄土高原凉日数表现出西多东少空间特征,凉天气日数变化介于 45~50 d 是最主要的形式,较微寒日数相比其分布更广,集中在山西、陕西及内蒙古南部等区域,其中以青海同仁站的 82.6 d 为最多。对于总寒天气日数而言,空间上自东南向西北逐渐增多,与黄土高原极端最低气温空间格局基本一致^[21]。年均总寒日数在汾渭谷地普遍低于 210 d,在陕西北部、山西中部和宁夏西北部等地区普遍在 210~240 d,在黄土高原中部和东部其余地区变化介于 240~270 d,而在西部青海等局部地区超过了 300 d。结合表 1 可知,在黄土高原各等级寒冷日数中,多数区域以凉天气日数为主,其次是轻寒和微寒日数,分别占总寒日数的 21.59%,20.59%和 19.10%。

2.2 不同等级寒冷日数变化趋势的空间特征

除 1960—2017 年黄土高原总寒和大寒日数降幅高于 0.3 d/a 外,其他等级寒冷日数趋势变化幅度整体偏小,均低于 0.09 d/a。具体来看,严寒日数多呈

减少趋势(图 3),减少幅度以 0~0.1 d/a 分布最广,空间上表现出北部高于南部,最为明显的为青海门源(-0.64 d/a)。具体来看,除黄土高原东北、西北局地外,全区绝大部分地区大寒日数呈减少趋势,且以 0.2~0.4 d/a 的降幅分布最广,集中分布在陕西北部、山西中部和南部、内蒙古、甘肃陇东等地区;其中青海同仁(-0.91 d/a)降幅最为明显。相对于大寒日数,黄土高原地区的小寒、轻寒和微寒日数均以增加趋势为主。小寒日数变化趋势以固原、临汾一线为界,表现出东南局地减少、西北广大区域增加的空间特征,其中以河南孟津(-0.40 d/a)降幅、青海同仁(0.34 d/a)增幅最为明显。轻寒日数呈减少趋势的集中分布在内蒙古、山西、青海及宁夏北部地区,整体呈南增北减的空间特征,其中以青海门源(-0.30 d/a)降幅、甘肃西峰镇(0.22 d/a)增幅最为明显。微寒日数整体上表现自西北向东南递增空间特征,孟津增加幅度为全区最高(0.20 d/a);呈减少趋势仅分布在宁夏及其周边、山西东北部等少数区域。从黄土高原凉日数变化趋势来看,多数地区表现为减少趋势,减幅自东向西呈“低—高一低—最高”特征;关中平原、山西及河南交界、青海西北等局地的凉日数表现出增加趋势。除西宁、榆社和河曲等极少数地区外,黄土高原地区总寒日数呈显著减少趋势($p < 0.05$),减幅自东南向西北逐渐增加,青海同仁(-0.85 d/a)减幅最为明显。综上可知,1960—2017 年黄土高原总寒日数减少主要是由大寒日数减少导致的,其次是严寒日数和凉日数,而小寒、轻寒和微寒日数引起了总寒日数的增加(表 1)。

由表 1 可知,黄土高原发生 Hiatus 现象后,年均总寒冷日数减少了 14.05 d;其中严寒日数减少最为明显(10.22 d),对总寒冷日数贡献最为突出,达到 72.66%。从 Hiatus 现象前后不同等级寒冷日数变化趋势幅度方面看,轻寒(-0.43 d/a) > 大寒(0.33 d/a) > 凉(0.21 d/a) > 小寒(-0.19 d/a) > 严寒(0.05 d/a) > 微寒(0.02 d/a)。进一步分析黄土高原发生 Hiatus 现象前后不同等级寒冷日数变化趋势空间分布,结果见图 4。黄土高原发生 Hiatus 现象后的严寒日数变化趋势以偏高为主,集中分布在青海至内蒙古一带和山西东北部,尤其是北部鄂尔多斯高原地区偏高幅度超过了 0.2 d/a;趋势偏低地区集中在山西、陕西东部及陕甘宁交界处,说明 Hiatus 现象发生后并未改变上述地区严寒日数的变化趋势,即增减趋势低于 Hiatus 现象发生前。大寒、微寒和凉天气日数变化趋势在 Hiatus 现象后均以偏高为主,且偏高分

布面积凉天气>大寒>微寒。大寒日数趋势变化偏高分布区域表现出以临河—耀县一线向东北和西南方向对称的空间特征, 偏高幅度最明显超出了 0.6 d/a; 微寒日数趋势偏高分布在除汾渭谷地和甘青交界以外地区, 偏高幅度呈南少北多, 且最明显地区多达 0.4 d/a; 除甘青和晋蒙交界毗邻地区外, 其余广大地区的凉天气日数趋势呈偏高特征, 并在陕西中部至甘肃东北部形成了超过 0.45 d/a 的偏高幅度中心。在黄土高原发生 Hiatus 现象后, 小寒和轻寒日数变化趋势均以偏低为主, 且偏低分布面积轻寒>小寒。小寒

日数趋势偏低主要分布在除山西和陕西南部、太原至河曲一带以外地区, 偏低幅度呈东南少、西北多空间特征, 且最明显地区多达 0.6 d/a。自黄土高原的东南至西北方向, 轻寒日数偏低幅度表现出“次低—高—次低—低”空间规律, 其中以洛川、北道等局地 0.9 d/a 最明显。黄土高原发生 Hiatus 现象后, 总寒日数变化趋势自东向西呈“偏低—偏高—偏低”空间格局, 偏低幅度最多的集中分布在甘青交界、晋陕蒙交界至山西中部等地区, 而偏高幅度最明显的集中分布在临河至洛川一线及其毗邻地区。

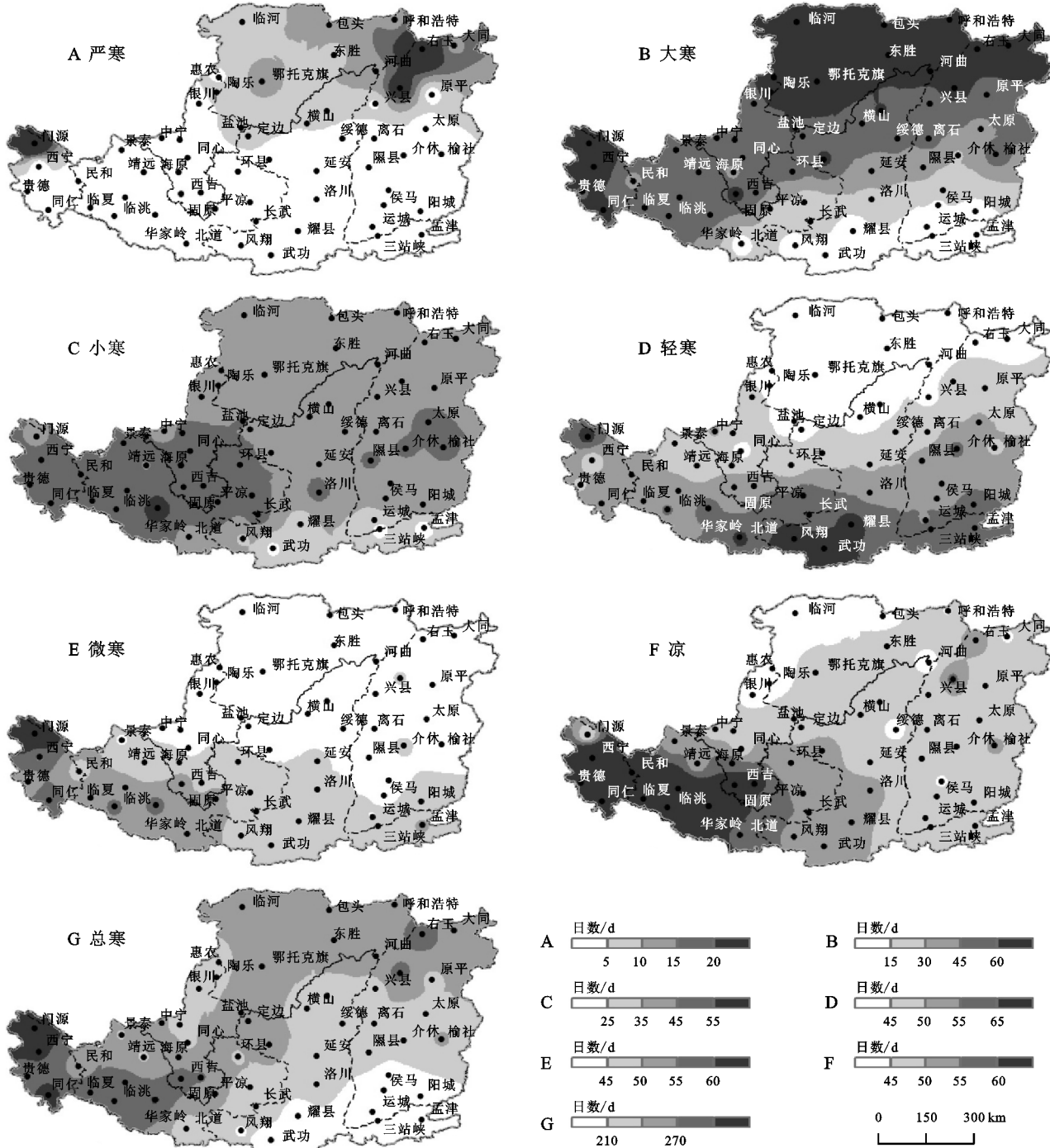


图 2 1960—2017 年黄土高原不同等级寒冷日数空间分布

表 1 1960—2017 年和 Hiatus 现象前后黄土高原不同等级寒冷日数及其变化趋势对比

寒冷等级	寒冷天气日数/d				寒冷日数变化趋势/(d·a ⁻¹)			
	1960—2017 年	Hiatus 现象前 (1960—1997 年)	Hiatus 现象后 (1998—2017 年)	Hiatus 现象 前后差异	1960—2017 年	Hiatus 现象前 (1960—1997 年)	Hiatus 现象后 (1998—2017 年)	Hiatus 现象 前后差异
严寒	5.009	5.723	3.653	-2.071	-0.081**	-0.108**	-0.059	0.049
大寒	46.035	49.556	39.345	-10.211	-0.301**	-0.236**	0.091	0.327
小寒	43.125	43.247	42.892	-0.355	0.019	0.109	-0.081	-0.190
轻寒	50.092	50.173	49.937	-0.236	0.009	0.100	-0.327*	-0.427
微寒	46.470	46.498	46.416	-0.082	0.029	0.094	0.113	0.019
凉	52.531	52.908	51.815	-1.094	-0.035	-0.058	0.156	0.213
总寒	243.265	248.111	234.058	-14.053	-0.361**	-0.099	-0.106	-0.006

注：*，** 分别表示变化趋势通过了 0.05,0.01 显著性水平检验。

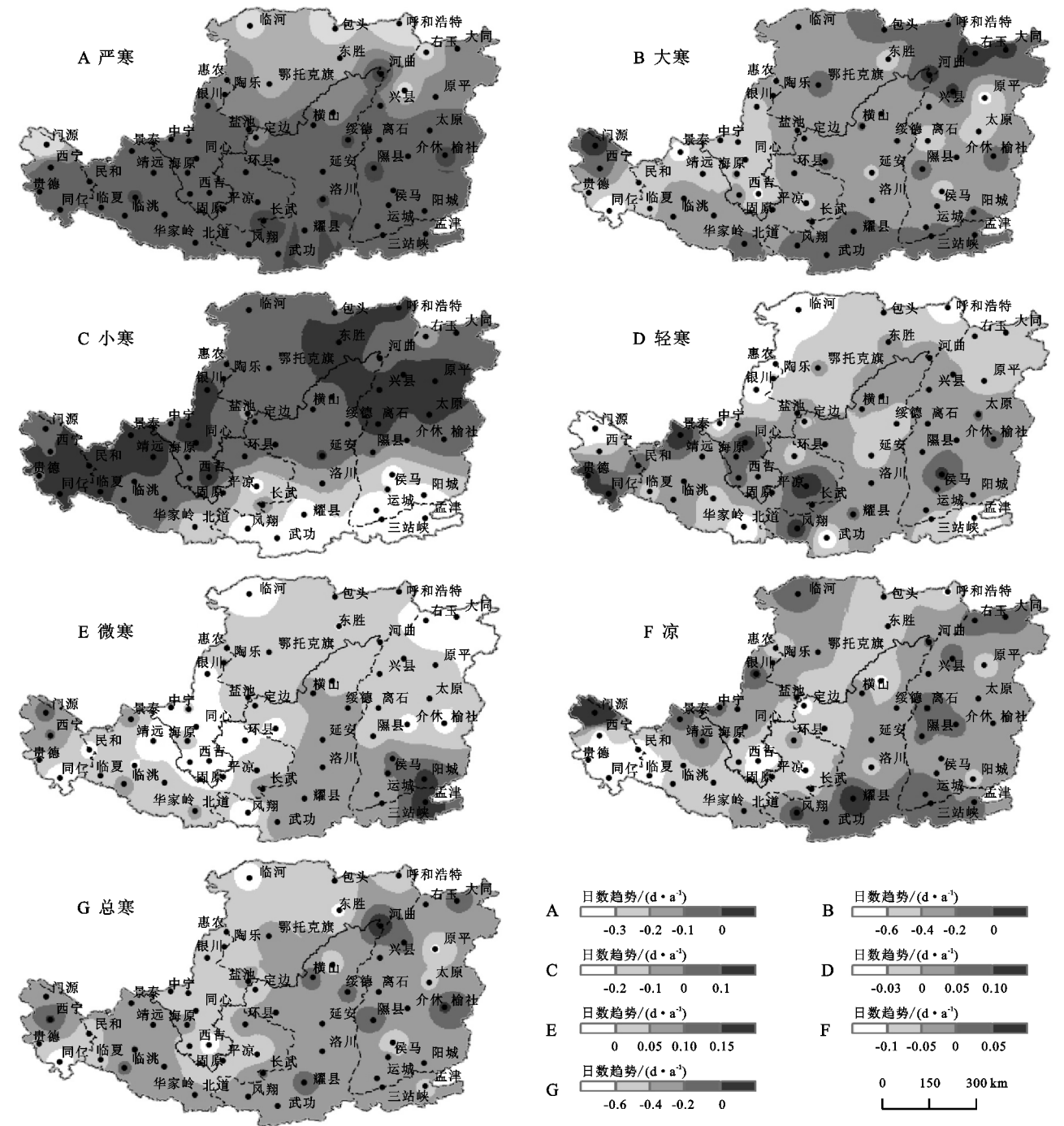


图 3 1960—2017 年黄土高原不同等级寒冷日数变化趋势空间分布

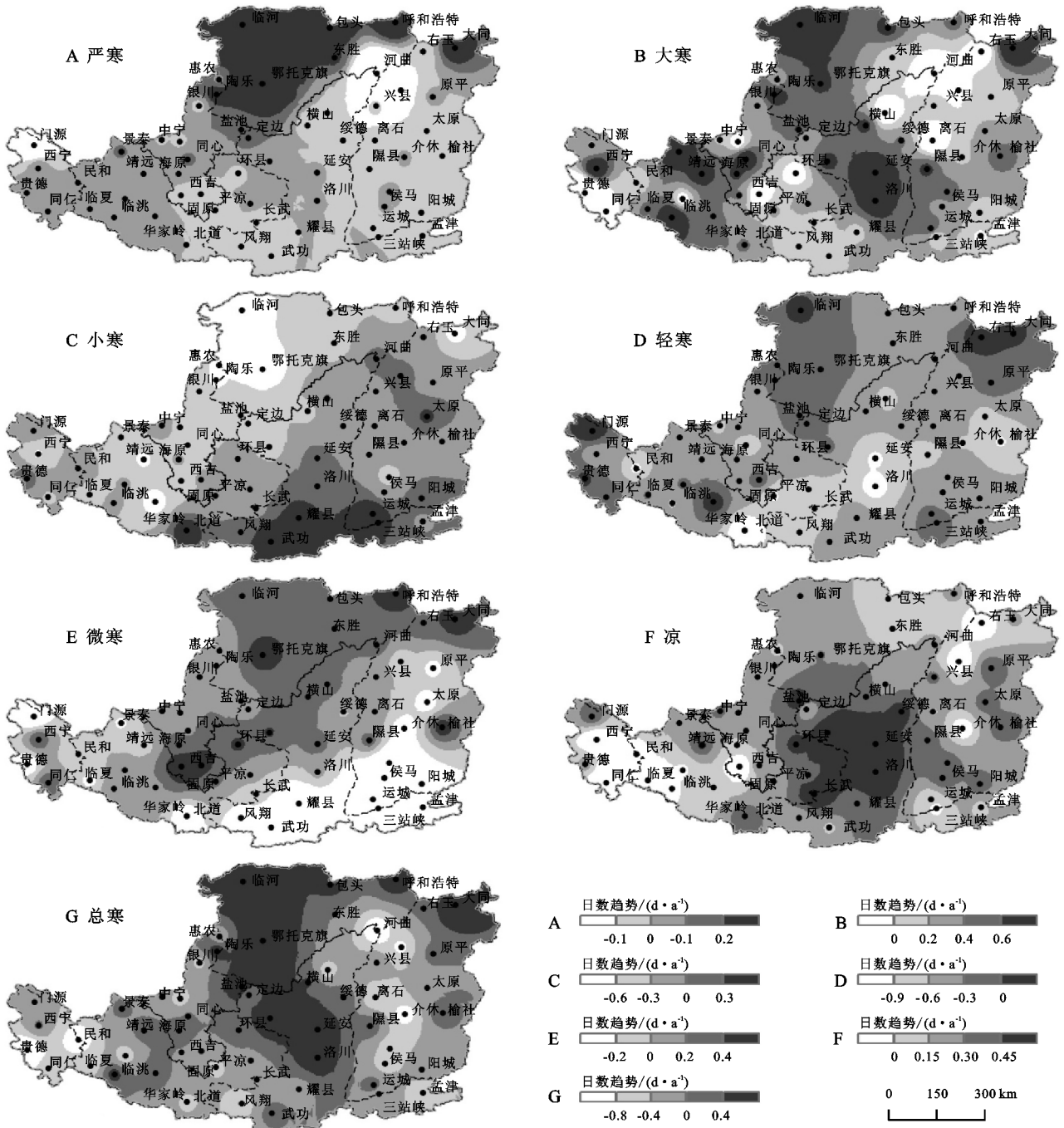


图 4 Hiatus 现象前后黄土高原不同等级寒冷日数变化趋势空间分布

2.3 不同等级寒冷日数的波动特征

随着寒冷等级的降低,黄土高原寒冷日数的变异系数逐渐降低,即严寒日数的波动最大,远比其他寒冷等级的大,而总寒日数反而波动最小(表 2)。具体从空间分布来看,黄土高原严寒日数波动特征呈自中部偏南向南北向逐渐减少空间规律,南部的关中平原、晋豫交界处的波动为 0,波动特征较大的集中在青海南部、陇东高原东部及山西临汾毗邻区域(图 5)。大寒日数波动特征自东南向西北逐渐降低,表现出纬向地带性规律。小寒日数波动特征在青海、甘肃西南至宁夏南部最小,上述地区以外的小寒日数波动特征空间上表现出大寒日数

相似规律。对于轻寒日数而言,在黄土高原中部偏西零星区域其波动特征较大,且自东南向西北方向呈“小—大—小—大”交替空间分布。整体上,黄土高原的微寒和凉日数的波动特征空间上自西向东逐渐增加,其中微寒日数波动以 0.14~0.16 为主,集中分布在陕西、山西及内蒙古北部地区;凉日数波动以 0.12~0.14 为主,集中陇东高原中部以东的广大地区。对于总寒日数而言,波动特征较大的地区集中分布在汾河谷底南部、黄土高原西北角以及河曲、同仁等零星区域,自东南至西北方向、东向西均表现出“大—小—大”交替空间分布特征。综上所述,虽然 1960—2017 年黄土高

原严寒日数等 6 类寒冷日数波动特征较大,并没有导致总寒日数波动出现较大幅度变化。

表 2 1960—2017 年和 Hiatus 现象前后黄土高原不同等级寒冷日数波动变化特征对比

时段	严寒	大寒	小寒	轻寒	微寒	凉	总寒
1960—2017 年	0.5200	0.1582	0.0915	0.0861	0.0804	0.0691	0.0321
Hiatus 现象前(1960—1997 年)	0.4630	0.1138	0.1017	0.0874	0.0843	0.0622	0.0161
Hiatus 现象后(1998—2017 年)	0.5289	0.1279	0.0696	0.0858	0.0744	0.0812	0.0169
Hiatus 现象前后差异	0.0659	0.0141	−0.0321	−0.0016	−0.0099	0.0190	0.0008

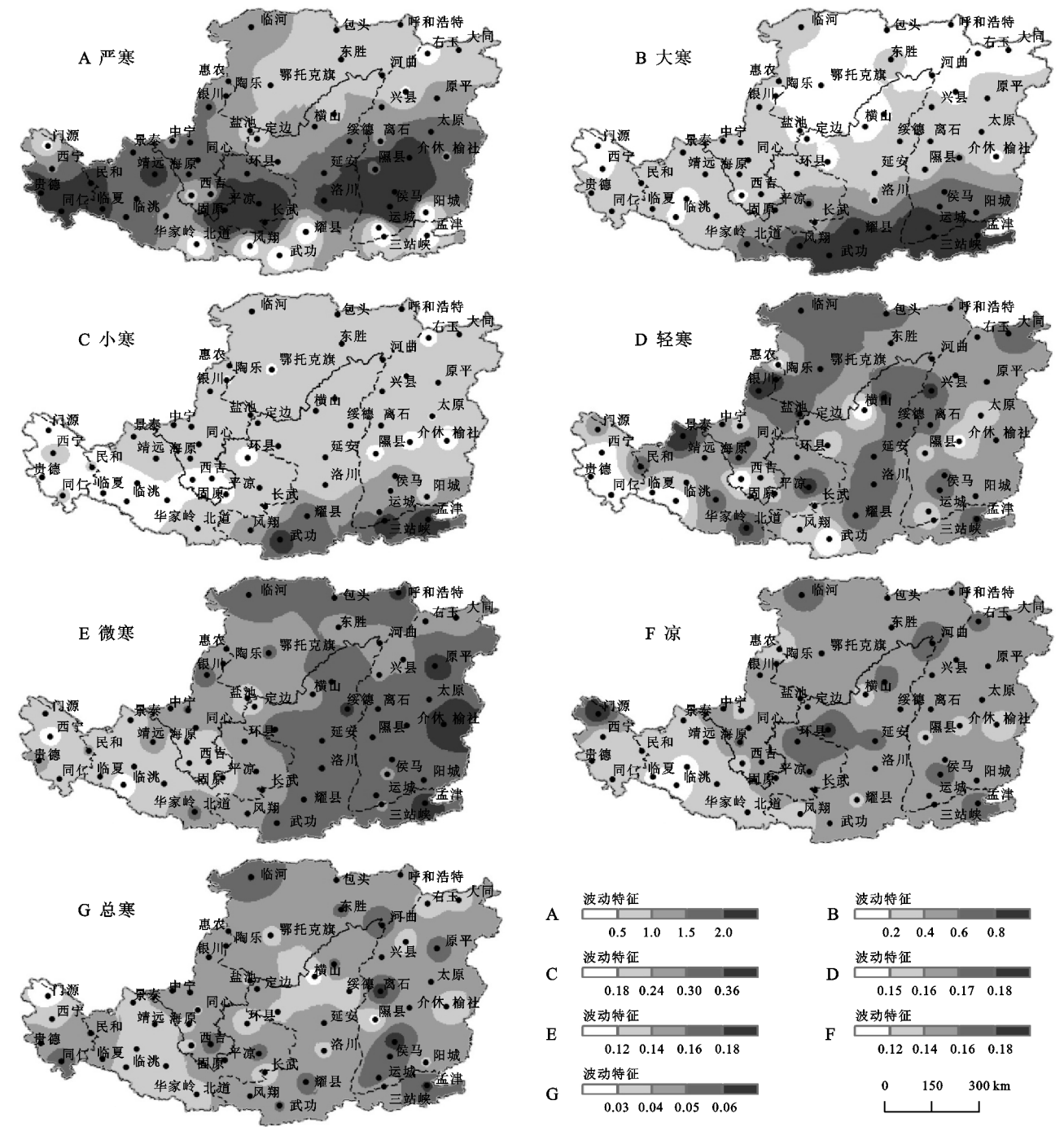


图 5 1960—2017 年黄土高原不同等级寒冷日数波动特征空间分布

由表 2 可知,不同等级寒冷日数在黄土高原发生 Hiatus 现象前后两个时段呈微小的波动变化特征,整体上波动变化幅度表现出严寒日数最大(0.065 9),其次是小寒(−0.032 1)、凉(0.019 0)、大寒(0.014 1),而轻寒、微寒和总寒日数均低于 0.01。黄土高原严寒日数波动偏高和偏低的分布面积大致相当,偏高的地区集中分布在山西中北部、鄂尔多斯高原中部以西广大地区(图 6)。Hiatus 现象发生后,黄土高原大寒日

数波动变化以偏高为主,且表现出西低东高空间分布,偏低集中分布在黄土高原东南部和青海等区域。整体上,黄土高原小寒、轻寒和微寒日数的波动变化主要表现为偏低,其中小寒日数波动变化偏低集中分布以黄土高原东北至西南的较宽带状地区,波动变化偏高的仅分布在晋豫交界处。轻寒日数波动变化差异自东南至西北表现出“偏低—偏高—偏低—偏高”交替的空间分布特征,其中山西北部、内蒙古东北和西北角等局地的偏高程度最为明显。微寒日数波动变化偏高集中分布在青海和宁夏及其毗邻区、关中平原至晋豫交界一带。黄土高原 Hiatus

现象发生后,凉日数波动变化呈东部偏高、西部偏低空间格局,其中山西中北部偏东、晋陕和晋豫交界处的偏高程度最为明显。对于总寒日数而言,波动偏高集中分布在黄土高原南部、东北角和西部局地,偏低程度较为明显的地区零星分布在晋陕蒙毗邻、山西离石和陕西武功等地区。综上可知,随着寒冷等级的升高,黄土高原寒冷日数的波特变化差异逐渐降低。值得注意的是,在黄土高原 Hiatus 现象发生后,尽管严寒和大寒日数波动变化偏高,但其日数占总寒日数比例较低,并未导致总寒日数波动差异发生明显变化。

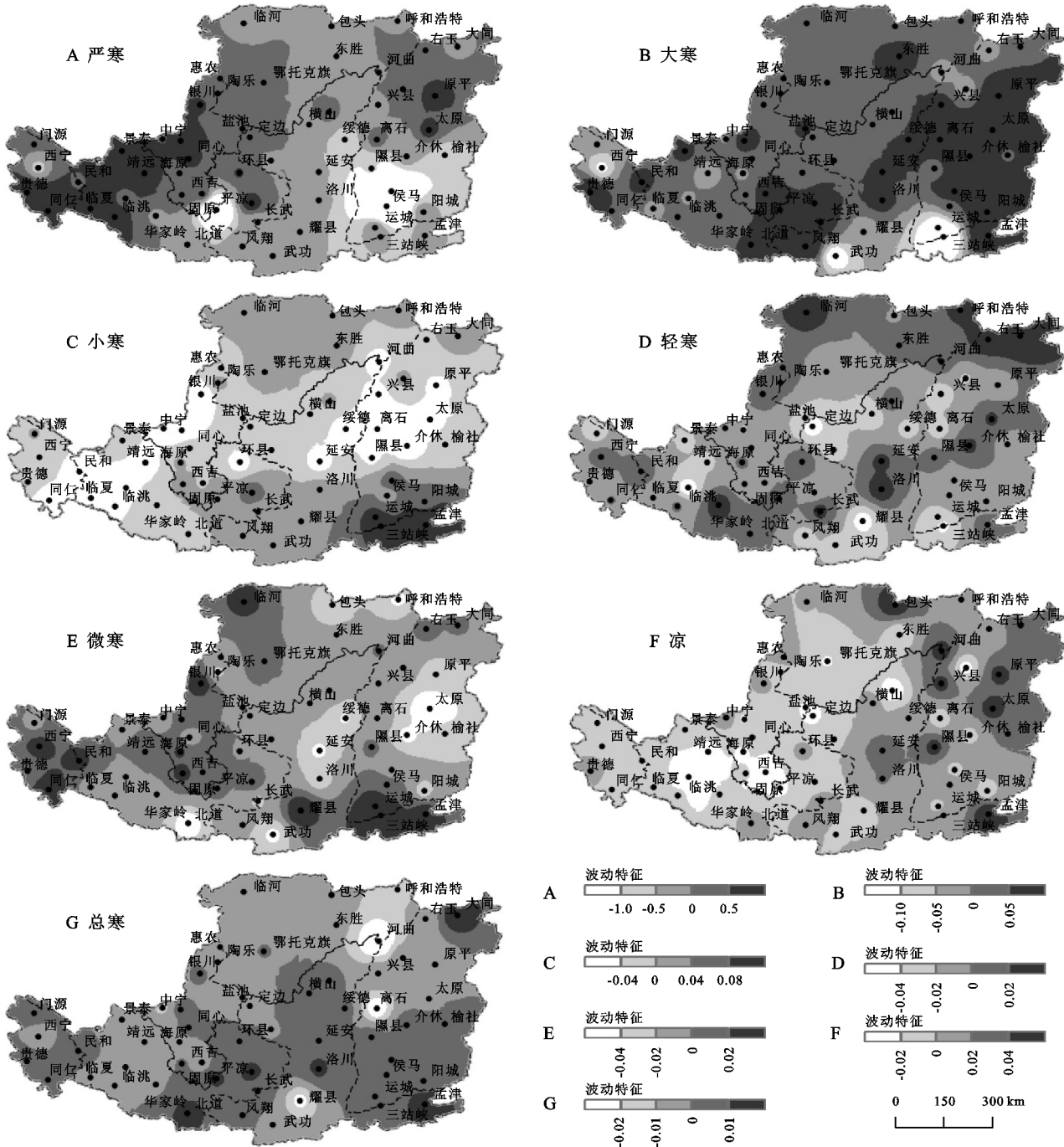


图 6 Hiatus 现象前后黄土高原不同等级寒冷日数波动特征变化空间分布

3 结 论

(1) 随着寒冷等级的降低,1960—2017 年黄土高原不同寒冷等级日数逐渐增加,且表现出明显空间差异特征。严寒和大寒日数自北向南逐渐减少,但微寒和轻寒日数则自北向南逐渐增加;小寒和凉日数呈西高东低格局,但微寒日数呈西低东高格局;总寒日数自东南向西北逐渐增多。研究期黄土高原多数区域以大寒日数为主,其次是轻寒和凉日数。

(2) 在寒冷日数变化趋势特征方面,1960—2017 年黄土高原严寒、大寒、凉和总寒日数多呈减少趋势,小寒、轻寒和微寒日数均以增加趋势为主,且总寒日数减少主要是由大寒日数减少导致的。Hiatus 现象发生后,严寒、大寒、微寒和凉天气日数变化趋势均以偏高为主,且偏高分布面积凉天气>大寒>微寒>严寒;小寒和轻寒日数变化趋势均以偏低为主,且偏低分布面积轻寒>小寒;总寒日数变化趋势偏高与偏低分布相当。

(3) 在寒冷日数波动特征方面,1960—2017 年黄土高原寒冷日数的变异系数随着寒冷等级的降低逐渐变小,各等级寒冷日数的波动特征空间分布较为复杂。Hiatus 现象发生后,各寒冷等级波动变化总体差别不大;小寒、轻寒和微寒日数波动变化以偏低为主,大寒日数以偏低为主,总寒、严寒和凉日数波动偏高和偏低大致相当的空间分布格局。

参考文献:

[1] IPCC. Climate Change 2021: The physical science basis, the Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report[R]. London: Cambridge University Press, 2021.

[2] IPCC. Intergovernmental panel on climate change 2013 fifth assessment report(AR5)[R]. London: Cambridge University Press, 2013.

[3] 胡伟伟.中国北方地区极端低温的变化特征及其全球增暖 1.5/2℃下的预估[D].南京:南京信息工程大学,2019.

[4] 乔雪梅,刘普幸.中国北方地区寒潮时空特征及其成因分析[J].冰川冻土,2020,42(2):357-367.

[5] 孔锋.基于时空分异的中国 1961—2018 年不同极端气温指数演变特征[J].水利水电技术,2020,51(4):67-80.

[6] Ohba M, Sugimoto S. Differences in climate change impacts

between weather patters: Possible effects on spatial heterogeneous change in future extreme rainfall [J]. Climate Dynamics, 2018,50(7/8):4177-4191.

[7] 李双双,杨赛霓,刘宪锋,等.2008 年中国南方低温雨雪冰冻灾害网络建模及演化机制研究[J].地理研究,2015,34(10):1887-1896.

[8] 艾雅雯,孙建奇,韩双泽,等.1961—2016 年中国春季极端低温事件的时空特征分析[J].大气科学,2020,44(6):1305-1319.

[9] 张克新,董小刚,廖空太,等.1960—2017 年黄河流域极端气温的季节变化特征及其与 ENSO 的相关性分析[J].水土保持研究,2020,27(2):185-192.

[10] 孔锋.1961—2017 年中国不同等级寒冷天气日数时空演变特征[J].长江流域资源与环境,2020,29(1):150-163.

[11] 刘明歆,李艳,吕春艳.中国冬季两类极端低温事件特征及其大气环流成因分析[J].高原气象,2021,40(3):603-620.

[12] Woodward A. Heat, cold and climate change[J]. Journal of Epidemiol Community Health, 2014,68(7):595-596.

[13] 陶云,陈艳,任菊章,等.1961—2014 年云南冬季寒潮活动规律及其与大气环流异常的关系[J].云南大学学报:自然科学版,2021,43(1):68-77.

[14] 安彬,肖薇薇,张淑兰,等.1960—2017 年黄土高原不同等级降水日数和强度时空变化特征[J].干旱区研究,2021,38(3):714-723.

[15] 赵安周,刘宪锋,朱秀芳,等.1965—2013 年黄土高原地区极端气温趋势变化及空间差异[J].地理研究,2016,35(4):639-652.

[16] 顾朝军,穆兴民,高鹏,等.1961—2014 年黄土高原地区降水和气温时间变化特征研究[J].干旱区资源与环境,2017,31(3):136-143.

[17] 徐一丹,李建平,汪秋云,等.全球变暖停滞的研究进展回顾[J].地球科学进展,2019,34(2):175-190.

[18] 张耀宗,张勃,刘艳艳,等.1960—2013 年黄土高原地区气温变化对 Hiatus 现象的响应[J].水土保持研究,2020,27(4):213-219.

[19] 佚名.寒冷也分等级[J].云南农业,1998,13(11):34.

[20] 徐建华.计量地理学[M].2 版.北京:高等教育出版社,2014.

[21] 任志艳,延军平,张立伟.黄土高原地区年极端气温的变化特征[J].中国农业气象,2013,34(3):289-293.