

1959–2008年黄土高原地区年内降水集中度和集中期时空变化特征

刘宪锋¹,任志远^{1,2},张 翀¹,林志慧¹

(1. 陕西师范大学旅游与环境学院,西安 710062; 2. 陕西师范大学西北国土资源研究中心,西安 710062)

摘 要:本文基于黄土高原地区1959–2008年51个地面气象台站的逐日降水资料,计算了降水集中度(PCD)和集中期(PCP),并结合EOF、趋势分析以及相关分析等方法对我国黄土高原地区年内降水不均匀性特征及其趋势进行了分析。结果表明:①黄土高原地区PCD在0.53–0.75之间,自东南向西北逐渐增加,而PCP变化不大,主要集中在7月中旬和下旬;②近50a黄土高原地区PCD主要以南北反向型分布为主;③从变化趋势来看,PCD增加趋势较明显的区域主要分布在宁夏的同心和山西的五台山等地,PCD减小比较明显的区域主要分布在山西的阳泉以及青海的门源等地区;而PCP整体上呈现提前趋势,只有青海的门源站附近有小幅推迟趋势;④年降水量与PCD有较好的相关性,大部分地区都通过了显著水平为0.05的检验;而年降水量与PCP的相关性并不显著,通过显著水平0.05检验的区域仅分布在山西的兴县、陕西的洛川以及宁夏的固原等地。

关 键 词:黄土高原;降水集中度(PCD);降水集中期(PCP);时空变化

1 引言

黄土高原地区是世界上最大的黄土沉淀区,同时也是世界上水土流失最严重的地区之一,除与其复杂的地形、土壤结构和生态环境有关外,年降水集中且暴雨多是主要原因之一^[1]。黄土高原地区是华北季风区向西北干旱区过渡地带,气候干旱,植被稀疏,年均温6~14℃,年降水稀少,且空间分布极不均匀^[2]。近年来,我国学者在降水量时空变化方面做了许多研究^[3–5],其中针对黄土高原地区降水量的时空变化和趋势分析也取得丰硕的成果。信忠保等^[6]分析了黄土高原侵蚀性降水的时空变化特征,段建军等^[7]对黄土高原地区50年降水时空动态与趋势变化进行了分析,林纾等^[8]分析了黄土高原地区降水的时空演变特征及周期变化,王麒翔等^[9]对黄土高原地区年降水量、侵蚀性降水量、汛期降

水量和暴雨量的时空变化特征进行了研究。但是,对该地区降水量的年内分配情况研究较少,且以往的研究通常用各候、各旬和各月等占全年降水量的百分比来表示,这种方法难以全面反映年内降水不均匀性特征^[10],而Zhang等^[11]定义的降水集中度(precipitation concentration degree, PCD)和集中期(precipitation concentration period, PCP)能够很好的反映年内降水分配情况。近年来许多学者利用此方法研究年内降水不均匀特征,并得出了有意义的结论,如杨玮等^[12]、张录军等^[13]、杨金虎等^[14]、张运福等^[10]、张天宇等^[15]分别对青藏高原、长江流域、中国西北地区、东北地区和华北地区的降水集中度和集中期时空特征进行了分析。鉴于此,本文采用该方法,并结合经验正交分解(Empirical Orthogonal Function, EOF)、趋势分析以及相关分析等方法对黄土高原地区年内降水集中度和集中期的时空变化特征及趋势进行分析,以期当地的植被建设与

收稿日期:2012-03; 修订日期:2012-05.

基金项目:国家自然科学基金项目(41071057);教育部人文社会科学重点研究基地重大项目(2009JJD770025);陕西省科学计划自然科学基金项目(2011JQ5014);陕西省社会科学基金项目(11E045);陕西师范大学中央高校基本科研专项基金项目(GK201101002)。

作者简介:刘宪锋(1986-),男,黑龙江省鹤岗市人,硕士研究生,主要从事资源环境遥感与GIS研究。

E-mail: liuxianfeng7987@163.com

通讯作者:任志远(1953-),陕西兴平人,教授,博士生导师,主要从事国土资源开发与生态环境评价研究。

E-mail: renzhy@snnu.edu.cn

生态恢复、水资源合理利用以及水土流失的防治提供参考依据。

2 资料与方法

2.1 资料

黄土高原地区是指太行山以西、青海省日月山以东,秦岭以北、阴山以南的广大地区。行政区划包括山西省和宁夏回族自治区的全部,陕西省秦岭以北,甘肃省的陇中和陇东地区,内蒙古自治区的鄂尔多斯高原与河套地区,青海省的东部地区以及河南省的豫西地区等7个省(区)^[9,16]。本文所用数据为1959-2008年51个地面气象站台的逐日降水资料,来自中国气象科学数据共享服务网。地面气象站台选取原则为:站台均匀分布在研究区中,并且测站具有一定的代表性,在保证较长时间序列的基础上,选取尽可能多的站点。

2.2 方法

为研究黄土高原地区年内降水分配不均匀性特征,本文采用Zhang等^[11]等定义的表征单站降水量时间分配特征的参数:降水集中度(PCD)和集中中期(PCP),其公式可表示为:

$$PCD_i = \sqrt{(\sum_{j=1}^N r_{ij} \times \sin \theta_j)^2 + (\sum_{j=1}^N r_{ij} \times \cos \theta_j)^2} / R_i \quad (1)$$

$$PCP_i = \arctan(\sum_{j=1}^N r_{ij} \times \sin \theta_j / \sum_{j=1}^N r_{ij} \times \cos \theta_j) \quad (2)$$

式中:PCD_i和PCP_i分别表示第*i*年的降水集中度 and 集中中期;*i*为年份;*j*为旬序;*R_i*为某测站第*i*年内总降水量(mm);*r_{ij}*为第*i*年第*j*旬内的降水量(mm); $\theta_j = 360^\circ \times (j - 1) / 36$,为研究时段内各旬所对

应的矢量角度。

本文以旬为研究单位,由式(1)可知,PCD_i取值为0~1之间,反映的是年降水量在各旬的集中程度,PCD_i越接近于1,则表示年降水量集中在某一旬内,PCD_i越接近于0,则表示年降水量均匀分布在全年的每个旬内;PCP_i为合成向量的方位角,反映的是最大的旬降水量出现在哪一句内。

另外,文中还用到经验正交函数^[17]、相关分析^[18]以及气候趋势系数^[19]等常用统计分析方法。

3 黄土高原地区年降水量的基本特征

为了更好地揭示黄土高原地区降水的不均匀性,首先对该地区年降水量及其变异系数等基本气候特征进行了分析。图1a给出了黄土高原地区1959-2008年平均降水量的空间分布图,可以看出该地区降水量空间差异十分明显,年降水量在50~850 mm之间,空间上从东南向西北逐渐减少。低值区出现在内蒙古的临河站附近,最低年降水量不足50 mm,而两个高值区分别位于山西省的五台山和陕西省的秦岭北麓地区,年降水量均在850 mm左右。

图1b可以看出黄土高原地区年降水量的变异系数在0.10~0.41之间,大部分地区变异系数相差不大,高值区主要出现在内蒙古的鄂托克站及宁夏的银川和惠农站等地区,最大值出现在宁夏的惠农站,变异系数在0.4以上;而低值区主要分布在青海的门源站,变异系数在0.1左右。可见,变异系数较大的地区主要分布在降水量较少的西北部地区,说明这些地区年际间降水量变化较大,青海的门源站附近降水则相对稳定。

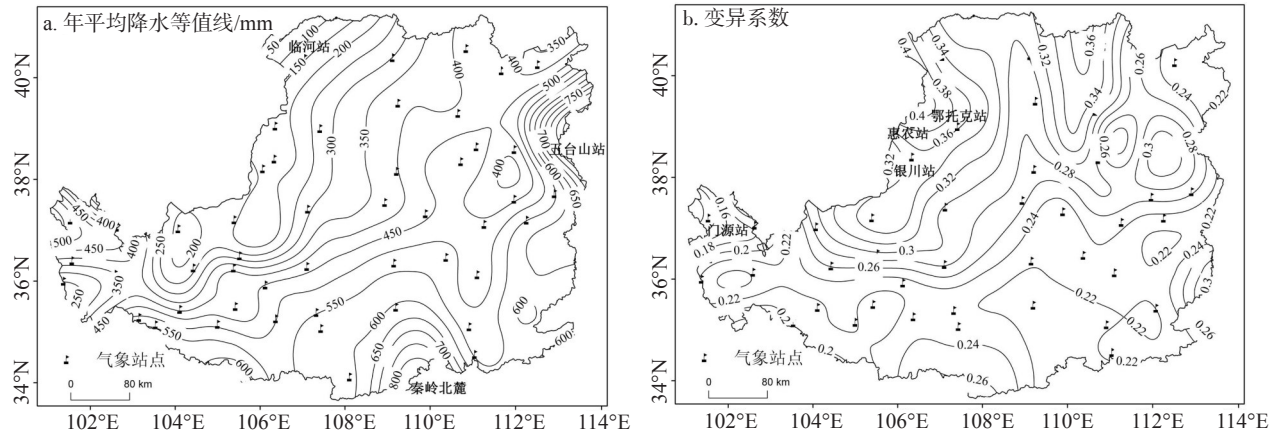


图1 黄土高原地区年降水量(a)及其变异系数(b)

Fig.1 Spatial distribution of precipitation (a) and its variation coefficient (b) on the Loess Plateau

4 黄土高原地区降水PCD和PCP的时空变化特征

4.1 PCD和PCP的时间变化特征

图2a为黄土高原地区年内降水集中度的时间变化特征,可以看出降水集中度在0.53~0.75之间,从整体上看,PCD在波动中趋于越加剧烈,1965年和1989-1997年波动较大,1989-1991年间PCD达到最低值,1995年则迅速上升到最大值,而后又迅速下降到1997年的较低值。由图2b可以看出,PCP在波动中呈下降趋势,其中1989-2003年间变动最为剧烈,变化年份与PCD变化年份相同,表明了20世纪90年代以来气候变化日益显著。

4.2 PCD和PCP的多年平均特征

图3为黄土高原地区降水集中度和集中期的空间分布特征,由图3a可以看出,PCD呈现出由东南向西北逐渐增加的趋势,这与该地区降水量分布特征相反,说明黄土高原地区年内降水由东南向西北方向越来越不均匀,即随着降水量的减少,降水

集中度增加。最大值出现在内蒙古的临河站附近,PCD在0.7以上,最小值位于陕西省的武功站,PCD在0.48以下。图3b可以看出,黄土高原地区降水集中期地区差异不大,均分布在第20或21旬(即7月中旬和下旬)左右。从总体上看,青海的西宁、甘肃的兰州以及山西的五台山等地降水主要集中在7月中旬,而其他地区主要集中在7月下旬。

4.3 PCD和PCP的主要空间分布型

为了分析黄土高原地区降水PCD和PCP的主要异常空间分布特征,分别对其进行经验正交分解(EOF),并对结果进行North^[20]检验,得出主要空间分布类型(图4)。图4a为PCD第1模态空间分布,该模态的方差贡献率为48.08%。由图可见,黄土高原地区降水PCD最主要的空间分布为南北反向型分布,即北部地区降水越集中(不集中),南部地区降水越不集中(集中),正的高值区位于内蒙古的临河站附近,负的高值区位于陕西省秦岭北麓地区,表明该分布类型在这些地区最为显著。从该模态的时间系数来看,除2007年为负值外,其余均为正

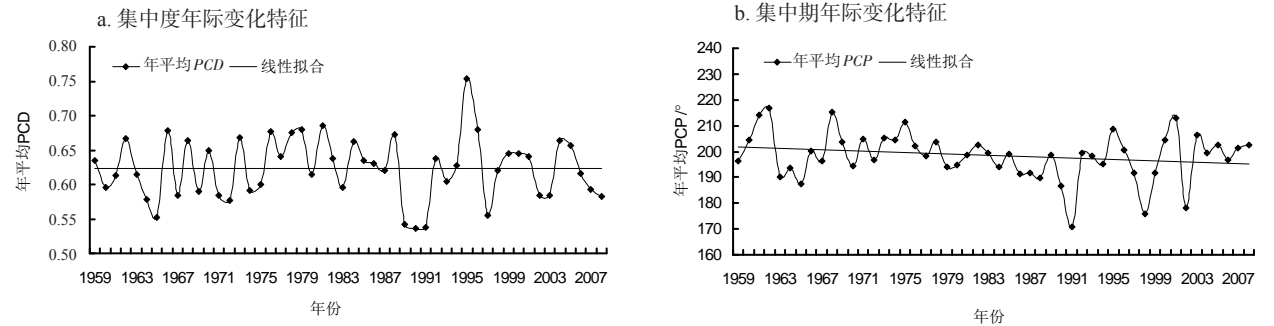


图2 黄土高原地区1959-2008年降水集中度(a)和集中期(b)的年际变化特征
Fig.2 Inter-annual change of PCD (a) and PCP (b) in Loess Platean during 1959-2008

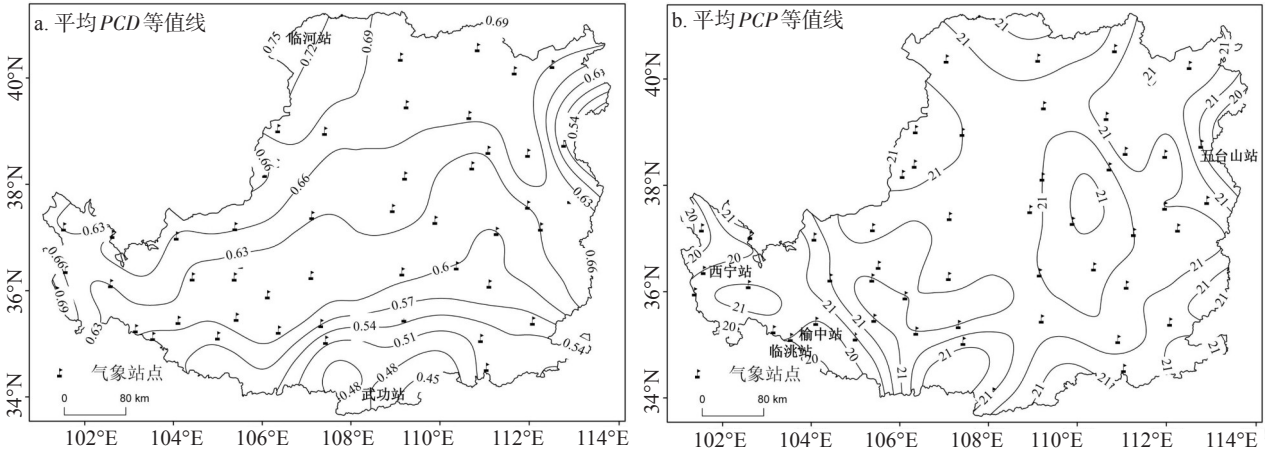


图3 黄土高原地区降水集中度和集中期的空间分布特征
Fig.3 Spatial changes of PCD (a) and PCP (b) in Loess Platean

值,表明黄土高原北部地区降水相对集中;从长期变化趋势看,该空间分布形式呈下降趋势。图4b为PCD第2模态空间分布,该模态的方差贡献率为9.4%,说明黄土高原地区降水PCD还存在东西反向型分布的空间分布特征,即黄土高原西部地区降水越集中(不集中),东部地区降水越不集中(集中),正的高值区位于青海省的民和站附近,负的高值区位于山西省的阳泉站附近。从该模态的时间系数来看,11年滑动平均值呈现由负值向正值变化趋势,其中1981-1982、1989、1992、1994-2002年均均为正值,表明黄土高原西部(东部)地区降水PCD有增大(减小)趋势。

从PCP第1模态(图4c)可以看出,东西反向型是黄土高原地区PCP主要的空间分布型式,该模态方差贡献率为16.14%,负的高值区位于山西省的太原市,正的高值区位于青海省的民和附近,说明这些地区降水集中期变化较显著。从该模态的时间系数来看,各年时间系数正负交替出现且变化较大,其中1965-1972年之间变化最为剧烈,11年滑动

平均值均为负值,表明黄土高原西部地区降水偏早,东部地区降水偏晚。从长期变化趋势看,1959-2008年这种分布呈上升趋势。图4d为PCP第2模态空间分布,方差贡献率是14.63%,该模态为西南部和东部与其他地区反向型的空间分布形式,也是黄土高原地区PCP的主要空间分布形式,正的高值区位于宁夏的银川和陶乐,负的高值区位于山西的阳城和河南的三门峡。从该模态的时间系数来看,11年滑动平均值除1986和1987年之外均为正值,表明东部和西南部(其他地区)降水PCP经历了偏早(晚),偏晚(早),偏早(晚)的演变规律。从长期变化趋势来看,该种分布形式呈下降趋势。

4.4 PCD和PCP的变化趋势分析

为了进一步了解黄土高原地区PCD和PCP的变化趋势,本文分别求出了黄土高原地区平均PCD和PCP以及各站点PCD和PCP近50a的气候趋势系数和气候倾向率。从研究区平均值来看,PCD趋势系数为0.005,倾向率为0.00015/10a,PCP趋势系数为-0.21,倾向率为-0.13旬/10a(即每10年提前

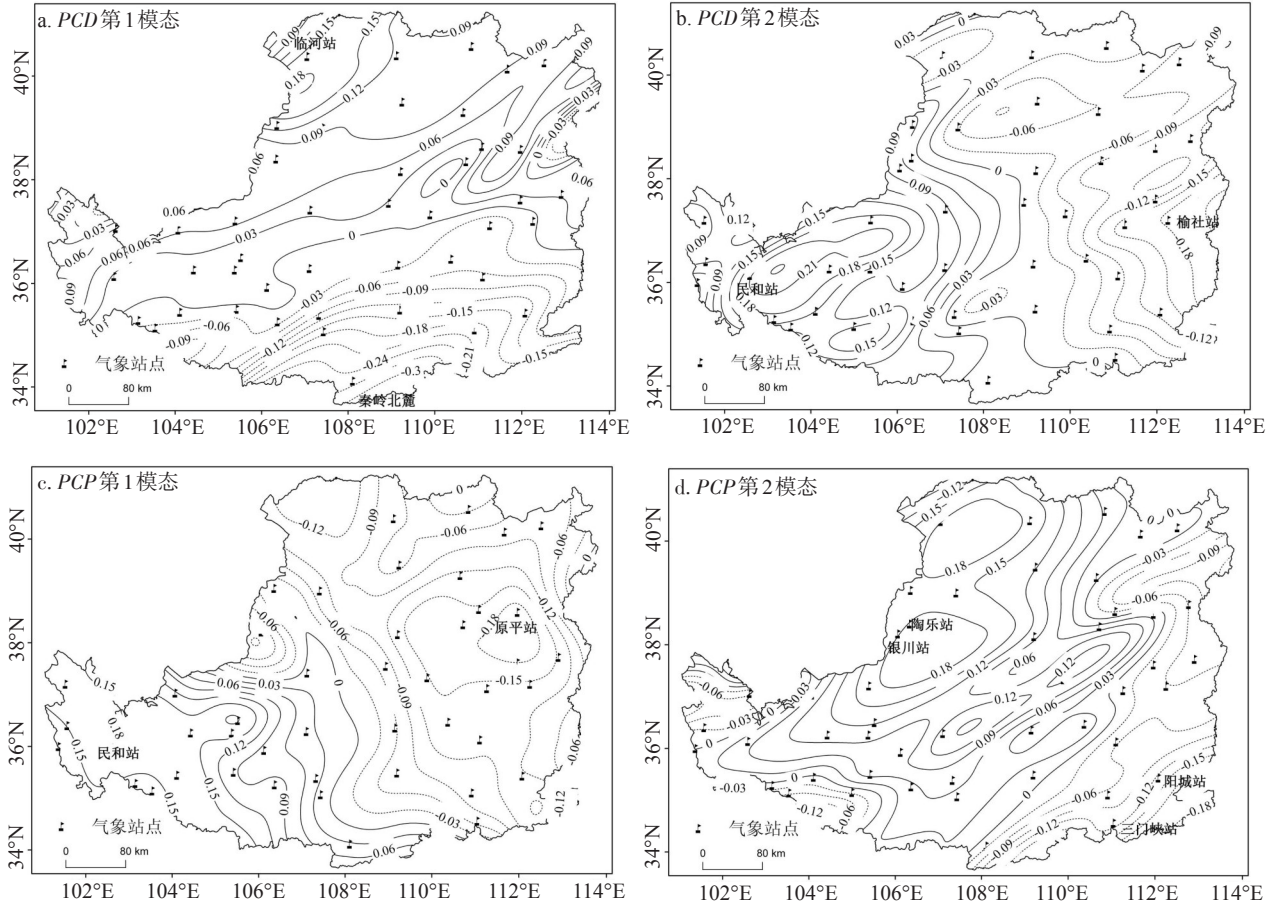


图4 黄土高原地区PCDEOF前2模态(a, b)和PCPEOF前2模态(c, d)空间分布
Fig.4 Spatial pattern of the first two EOF modes of PCD (a, b) and PCP (c, d) in Loess Plateau

0.13 旬),均未通过 0.05 显著水平检验。图 5 给出了 1959-2008 年黄土高原地区年内降水集中度和集中中期的趋势系数空间分布图。由图 5a 可以看出,PCD 增加趋势较明显的区域主要分布在宁夏的同心和山西的五台山等地,PCD 减小比较明显的区域主要分布在山西的阳泉以及青海的门源等地区。从图 5b 可以看出,PCP 在黄土高原地区整体上呈现减小趋势,只有青海的门源站附近有小幅增加趋势。PCP 减小比较明显的区域主要有山西的大同、阳泉和榆社,甘肃的靖远和华家岭,宁夏的银川和陶乐以及青海的贵德等地。

5 年降水量与 PCD 和 PCP 相关性分析

为讨论年降水量与 PCD 和 PCP 的相关性,图 6 给出了黄土高原地区年降水量与 PCD 和 PCP 的相

关系系数空间分布图。从图 6a 可以看出,除青海的贵德站和山西的五台县外,年降水量与 PCD 均呈正相关,相关系数在 -0.16~0.60 之间,说明降水集中度的变化在一定程度上可以代表年降水量的变化,其中通过显著水平 0.001 检验的区域主要有宁夏的西吉,山西的五寨、兴县、原平、阳泉、榆社和阳城等地区,相关系数均在 0.5 以上,通过显著水平 0.01 检验的区域主要分布在宁夏的固原、陕西的武功以及山西的部分地区,而通过显著水平 0.05 检验的区域均匀分布在研究区的东部、南部和北部地区。

图 6b 给出了年降水量与 PCP 相关系数空间分布图,除内蒙古的河套平原以及河南省的洛阳外,整体均呈正相关,但通过 0.05 显著水平检验的地区很少,主要分布在山西的兴县、陕西的洛川以及宁夏的固原等地。

从以上的分析可以看出,年降水量与 PCP 相关

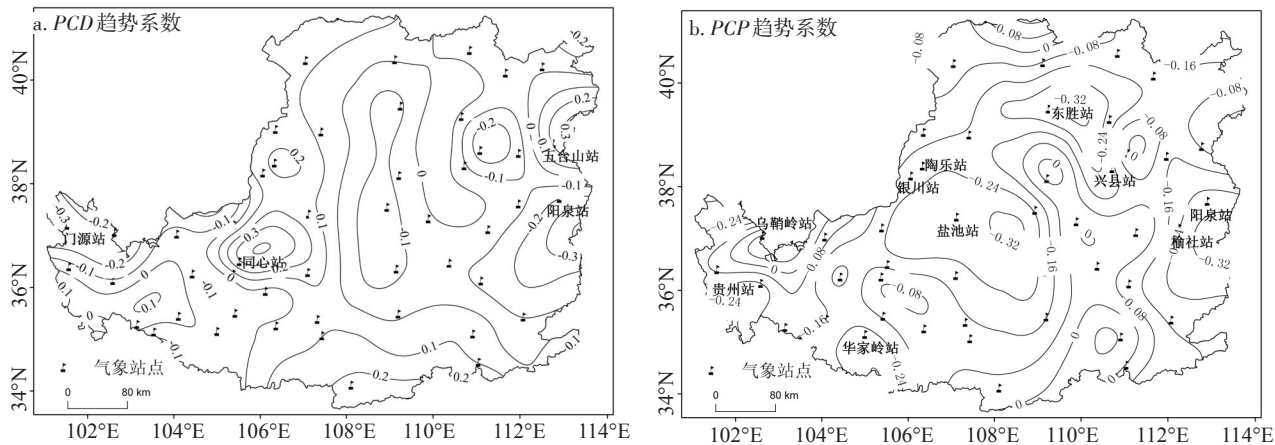


图 5 黄土高原地区 1959-2008 年 PCD (a) 和 PCP (b) 气候趋势系数空间分布图
Fig.5 Spatial distribution of climatic trend indexes of PCD (a) and PCP (b) on the Loess Plateau

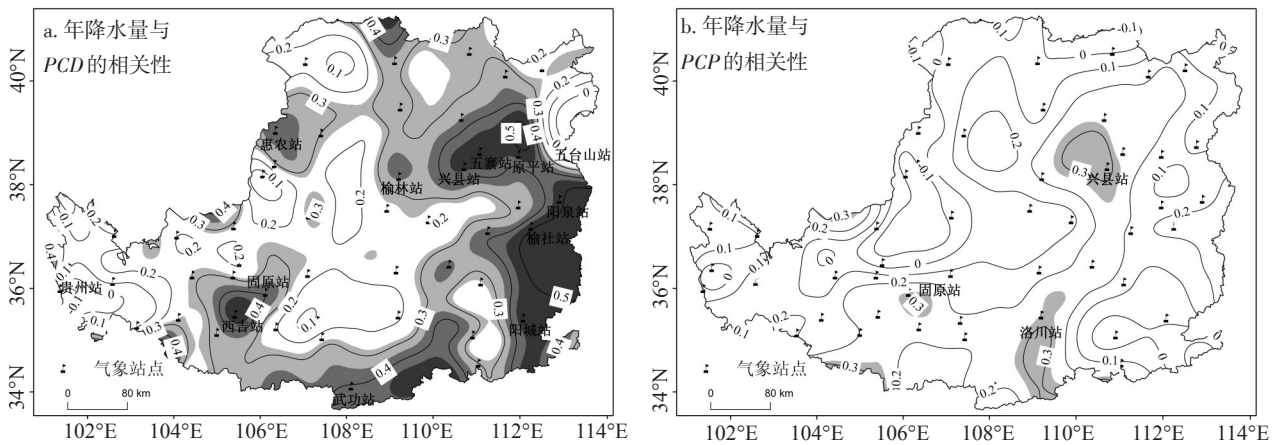


图 6 黄土高原地区 PCD 和 PCP 与降水量的相关系数分布
(注:浅灰色为通过显著水平 0.05 检验的区域,深灰色是通过显著水平 0.01 检验的区域,黑色是通过显著水平 0.001 检验的区域)
Fig.6 Spatial distribution of correlation coefficient between PCD (a), PCP (b) and precipitation on the Loess Plateau

性并不显著,而年降水量与 PCD 相关性显著,说明黄土高原地区年降水量越多,降水越集中。

6 讨论与结论

研究表明:青藏高原^[12]、东北地区^[10]以及华北地区^[15]的降水集中度与集中期均表现出减小趋势,而本研究中 PCD 并无明显的下降趋势。在空间上, PCD 减小区域大于增加区域,而 PCP 则表现出提前趋势。本研究与前人研究存在差异的原因可能是:不同地区自然条件和地带性存在差异,并且不同区域影响降水的大气环流等因素也存在差异。另外,由于研究区内的站点稀疏程度不同,且降水在时空尺度上具有较强的不确定性^[21],因此,对于地形变异较大或站点稀少的地区进行空间插值分析,其结果反应能力有限,仍需补充更多站点数据进行更精确的分析。

水土流失是黄土高原地区社会经济发展的主要限制因素。本文通过对黄土高原地区近50年降水 PCD 和 PCP 时空变化及趋势特征分析,旨在为当地水土保持工作提供一定的参考依据。黄土高原地区水热条件差的西北部, PCD 反而更高,这可能会加剧当地生态环境的恶化;而研究区 PCP 空间分布较为复杂,并没有某一模态贡献率占有绝对优势,而是两种主要分布型共同构成 PCP 空间特征。从趋势分析看,宁夏的同心和山西的五台山等地区降水 PCD 趋势增加明显。另有研究表明^[9],近50年黄土高原地区年降水量显著减少,但暴雨量却未显著减少,而暴雨多和年降水集中是诱发水土流失的最主要原因之一,按此趋势,黄土高原地区水土流失状况将会恶化,势必会对黄土高原地区生态建设与植被恢复工作造成严重影响。

基于以上分析,本文得出以下结论:

(1) 黄土高原地区年降水量在50~850 mm之间,空间上从东南向西北逐渐减少。该地区降水量的变异系数在0.10~0.41之间,最大值出现在宁夏的惠农站,变异系数在0.4以上,最小值分布在青海的门源站,变异系数在0.1左右。

(2) 黄土高原地区 PCD 在0.53~0.75之间,自东南向西北逐渐增加;而 PCP 变化不大,主要集中在7月中旬和下旬。

(3) 近50a黄土高原地区 PCD 主要以南北反向型分布为主,且该种分布型呈减弱趋势;而 PCP 由

东西反向型、西南部和东部与其他地区反向型2种主要空间分布形式。

(4) 从研究区平均值来看, PCD 趋势系数为0.005,倾向率为0.00015/10a, PCP 趋势系数为-0.21,倾向率为-0.13旬/10a。从空间来看, PCD 增加趋势较明显的区域主要分布在宁夏的同心和山西的五台山等地, PCD 减小比较明显的区域主要分布在山西的阳泉以及青海的门源等地区;而 PCP 整体上呈现提前趋势,只有青海的门源站附近有小幅推迟趋势。

(5) 年降水量与 PCD 相关性显著,表现为年降水量越多,降水越集中,相关系数在-0.16~0.60之间,大部分地区都通过了显著水平为0.05的检验;而年降水量与 PCP 的相关性并不显著,通过显著水平0.05检验的区域仅分布在山西的兴县、陕西的洛川以及宁夏的固原等地。

参考文献

- [1] 李志,郑粉莉,刘文兆. 1961-2007年黄土高原极端降水事件的时空变化分析. 自然资源学报, 2010, 25(2): 291-299.
- [2] 刘志红,郭伟玲,杨勤科,等. 近20年黄土高原不同地貌类型区植被覆盖变化及原因分析. 中国水土保持科学, 2011, 9(1): 16-23.
- [3] 郝成元,赵同谦. 中国气候变化敏感区降水量区域对比:以黑龙江、新疆和西藏三省区为例. 地理科学进展, 2011, 30(1): 73-79.
- [4] 张剑明,廖玉芳,段丽洁,等. 1960-2009年湖南省暴雨极端事件的气候特征. 地理科学进展, 2011, 30(11): 1395-1402.
- [5] 李斌,李丽娟,李海滨,等. 1960-2005年澜沧江流域极端降水变化特征. 地理科学进展, 2011, 30(3): 290-298.
- [6] 信忠保,许炯心,马元旭. 近50年黄土高原侵蚀性降水的时空变化特征. 地理科学, 2009, 29(1): 98-104.
- [7] 段建军,王小利,高照良,等. 黄土高原地区50年降水时空动态与趋势分析. 水土保持学报, 2009, 23(5): 143-146.
- [8] 林纾,王毅荣. 中国黄土高原地区降水时空演变. 中国沙漠, 2007, 27(3): 502-508.
- [9] 王麒麟,范晓辉,王孟本. 近50年黄土高原地区降水时空变化特征. 生态学报, 2011, 31(19): 5512-5523.
- [10] 张运福,胡春丽,赵春雨,等. 东北地区降水年内分配的不均匀性. 自然灾害学报, 2009, 18(2): 89-94.
- [11] Zhang L J, Qian Y F. Annual distribution features of the yearly precipitation in China and their interannual variations. Acta Meteor Sinica, 2003, 17(2): 146-163.
- [12] 杨玮,何金海,王盘兴,等. 近42年来青藏高原年内降水

- 时空不均匀性特征分析. 地理学报, 2011, 66(3): 376-384.
- [13] 张录军, 钱永甫. 长江流域雨季降水集中度和旱涝关系研究. 地球物理学报, 2003, 47(4): 622-630.
- [14] 杨金虎, 王鹏祥, 白虎志, 等. 中国西北降水年内非均匀性特征分析. 气候变化研究进展, 2007, 3(5): 276-281.
- [15] 张天宇, 程炳岩, 王记芳, 等. 华北雨季降水集中度和集中期的时空变化特征. 高原气象, 2007, 26(4): 843-852.
- [16] Li R, Yang W Z, Li B C, et al. Research and Prospect on the Loess Plateau of China. Beijing: Science Press, 2008.
- [17] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 2版. 北京: 气象出版社, 2007: 99-113.

- [18] 徐建华. 现代地理学中的数学方法. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2002: 419-426.
- [19] 施能, 陈家其, 屠其璞. 中国近100年来4个年代际的气候变化特征. 气象学报, 1995, 53(4): 431-439.
- [20] North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. Mon. Wea. Rev., 1982, 110(7): 699-706.
- [21] 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. 地理科学进展, 2011, 30(7): 811-818.

Inhomogeneity Characteristics of Intra-annual Precipitation on the Loess Plateau During 1959–2008

LIU Xianfeng¹, REN Zhiyuan^{1,2}, ZHANG Chong¹, LIN Zhihui¹

(1. College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China;

2. Center For Land Resources Research in Northwest China, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: This article aims to analyze the inhomogeneity characteristics of inter-annual precipitation on the Loess Plateau, and to provide reference for local vegetation construction and ecological recovery, rational use of water resources, and the prevention and control of soil and water loss. Precipitation concentration degree (*PCD*) and precipitation concentration period (*PCP*) were used to analyze the inhomogeneity characteristics of inter-annual precipitation and its trend in recent 50 years based on 51 meteorological stations of the Loess Plateau from 1959 to 2008, and EOF, correlation analysis and trend analysis were also employed. The results are shown as follows. (1) The annual precipitation of the Loess Plateau is between 50-850 mm, with a decreasing trend from southeast to northwest. (2) The *PCD* of the Loess Plateau region is between 0.53 and 0.75, which gradually increased from the southeast to the northwest, while the *PCP* is mainly observed in the mid- and late July. (3) In spatial distribution, *PCD* mainly manifests a north-south reverse pattern with a decreasing trend, while *PCP* consists of two main centers (east-west reverse and southwest and east-other areas reverse). (4) In terms of changing trend, the average trend coefficient of *PCD* on the Loess Plateau is 0.005, while that of *PCP* is -0.21. The regions with obviously increased *PCD* are mainly distributed in Ningxia and the Mount Wutai in Shanxi, and the areas with obviously decreased *PCD* include Yangquan of Shanxi and Menyuan of Qinghai, while *PCP* shows a decreasing trend in most parts of the Loess Plateau. (5) *PCD* shows a positive correlation with annual precipitation, most of which has passed the significant level 0.05, while *PCP* has a slight correlation with precipitation, the places that has passed the significant level 0.05 are only distributed in Xingxian of Shanxi, Luochuan of Shaanxi and Guyuan of Ningxia.

Key words: Loess Plateau; precipitation concentration degree(*PCD*); precipitation concentration period (*PCP*); spatiotemporal change

本文引用格式:

刘宪锋, 任志远, 张翀, 等. 1959-2008年黄土高原地区年内降水集中度和集中期时空变化特征. 地理科学进展, 2012, 31(9): 1157-1163.