

仇娜,张高健,李光,等. 城市化进程中西安市降水的响应特征[J]. 陕西气象,2025(5):69-75.

文章编号:1006-4354(2025)05-0069-07

城市化进程中西安市降水的响应特征

仇娜^{1,2},张高健³,李光³,高羽茜¹

(1. 陕西省气象信息中心,西安 710014;

2. 中国气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点开放实验室,西安 710016;

3. 西安市气象局,西安 710016)

摘要:以 1971—2020 年为研究时段,从人口、经济、社会 3 个一级城市化指标中分别选取了城镇户籍人口比重、人均 GDP、不透水面积 3 个二级指标表征城市化水平,确定西安市城市化发展过程,并分析西安市降水变化对城市化进程的响应。结果表明:西安市自 20 世纪 90 年代初开始快速发展,2000 年后进入高速发展。近 50 a 降水量呈不明显的波动增加趋势,但具有明显的季节特征,7—9 月降水量占全年降水总量的 48.5%。在近 20 a 城市化进程背景下,西安城区降水量总体呈减少趋势,但降水强度加剧,表现出小—中雨雨量减少、大—暴雨雨量增加的典型特征。

关键词:西安市;城市化;降水量;响应

中图分类号:P426.6

文献标识码:A

中国的气候区域差异性较强^[1],自然变化和人类活动对气候变化的影响不可忽视^[2]。自然变化涵盖了自然界活动以及气候系统内部的相互作用和变率;而人类活动的影响,如人口增加、温室气体和气溶胶排放、土地利用的变化等,不断改变着气候的演变轨迹^[3]。随着社会经济的飞速发展,人类活动对自然环境的影响愈发明显,这不仅改变了区域的自然气候,还在城市化进程中带来了一系列复杂的问题,引发了城市与郊区气候之间的明显差异^[4]。在这一背景下,进一步分析城市化对降水等气象要素的影响,对于科学应对气候变化、改善人居环境等尤为重要^[5]。

西安是我国历史文化名城和重要的科研、教育、工业基地。西安城市化发展研究,对于进一步了解城市化发展过程中土地利用与覆被变化的空间动态信息、利用环境变化开展区域城市化生态效应分析、测算城市化水平和研究城市化发展战略等具有重要意义。先前的研究主要集中在西安

等西北城市的城市化对环境和资源的影响、气温与城市化关系的定量分析,以及对西安市降水时空变化特征的分析等方面。如卢新卫等^[6]讨论了西安和西北五市城市化对环境、资源的影响,田武文等^[7]、王建鹏等^[8]就气温这一要素的变化与城市化的关系做了定量分析,张高健等^[9]对西安市近 50 年降水时空变化特征进行了分析等;然而,有关城市化对降水格局影响的研究相对有限。因此,本文从城市化对西安市降水时空分布的影响出发,通过定量分析和机制解析,探讨城市化对降水格局的影响,旨在填补这一领域的研究空白,为西安的城市规划、城市防灾减灾和工业布局等方面提供科学依据,为促进城市环境与气候的协同发展贡献新见解^[10]。

1 资料和方法

1.1 研究区域概况

西安市地处关中平原中部,南依秦岭山脉,北靠渭北荆山黄土塬;境内河流密集,东部有灞河、

收稿日期:2024-04-25

作者简介:仇娜(1981—),女,汉族,陕西周至人,硕士,高工,主要从事气象教育培训工作。

基金项目:秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2023G-32)

泾河,西部有涝河、沔河,南部有浣河、漓河,北部有泾河、渭河;属暖温带半湿润大陆性季风气候^[11],四季分明,气候温和,雨量适中。西安市辖区涵盖 11 区(主城区的未央、新城、莲湖、碑林、雁塔、灞桥和远郊区的阎良、临潼、高陵、鄠邑、长安)和蓝田、周至 2 县^[10](图 1)。西安地势东南高、西北低,这种地势格局影响着水流的分布和城市的气候状况。文中西安市指西安 11 区 2 县的所有区域,考虑到西安行政区域的历史沿革,西安主城区指未央、新城、莲湖、碑林、雁塔、灞桥六区;在降水分析中,由于 2005 年西安气象站(图 1 中未央区附近站点)迁至相距 16 km 处的泾河站,本文参考均值订正法^[12]对西安站缺测时段进行插补订正,用西安观测站资料代表西安主城区情况,用西安市 7 个观测站的平均值代表西安市情况,这样可以保证研究主体长时间序列的一致性。通过主城区和西安市的对比,探讨主城区在城市化发展进程中局地气象要素所产生的变化。

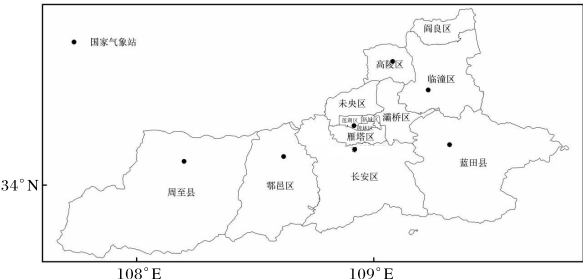


图 1 西安市 13 个区县和国家气象站分布图(以西安站代表主城区;审图号为陕 S(2021)023 号,下同)

1.2 资料说明

气象资料来源于气象大数据云平台·天擎业

务系统,提取西安市 7 个国家气象观测站 1971—2020 年逐日降水观测数据。

不透水数据来源于国家地球系统科学数据中心提供的全球陆地区域不透水面的详细分布信息,空间分辨率为 30 m。相较于国内外已有的同类产品,该数据在提取破碎细小的不透水面对象方面更具优越性。受平台数据限制,数据提取时段为 1972—2008 年。其他城市化数据来自《西安市统计年鉴》等公开发布的资料,提取平台为聚汇数据库。因 1985 年之前资料不完整,因此西安市区户籍人口数据和西安市 GDP、西安市人均 GDP 数据提取时段为 1985—2020 年。

1.3 统计方法

统计分析采用滑动 t 检验法、趋势线法、滑动平均法等方法^[12]。

2 结果分析

2.1 西安市城市化进程

城市化指标是对一个国家或地区的城市化发展程度量化测度的基础要素。城市化发展的测度指标繁多,在不同的指标体系下,得出的城市化发展水平各异,不同的城市化发展水平影响城市的发展阶段与发展类型^[13-14];因此,选择适宜的城市化发展水平测度指标,对于城市化发展程度评价结果的准确性具有重要意义^[15]。城市化发展评价指标体系有 4 个一级指标 18 个二级指标^[15-18](表 1),本文从人口、经济、社会 3 个一级城市化指标中分别选取了城镇户籍人口比重、人均 GDP、不透水面积 3 个二级指标进行分析。

表 1 城市化发展指数评价指标体系

一级指标	二级指标
人口城市化	城镇户籍人口比重、城镇人口规模、第三产业就业人口比重、二三产业就业人口比重、城市人口密度
经济城市化	人均 GDP、人均工业总产值、第三产业占 GDP 比例、二三产业占 GDP 比例、就业人员平均工资
社会城市化	(万人)拥有医生数、不透水面积、(万人)拥有公交车数、(万人)在校中学生数、(万人)在校大学生数、(万人)拥有公共厕所
生态环境城市化	建成区绿化覆盖率、人均公园绿地面积

2.1.1 户籍人口和 GDP 变化 人口城市化体现了政治、经济、生态等要素的聚集与优化配置^[19]。

城镇人口的增加,在促进城市经济发展的同时,也加快了城乡融合的速度^[20]。根据《西安市统计年

鉴》资料,自1985年以来,西安市区户籍人口从245.76万人上升至2020年的842.39万人,在这36 a间,人口城市化率呈现出显著增长趋势。特别是在1991年、1997年和2002年,西安市区户籍人口增幅超过多年以来的平均水平,其中,2002年的增幅为24.3%,为21世纪以来的最大值。

西安市GDP和西安市人均GDP在进入21世纪以后连续稳定增长(图2),最高增幅为2007、2008年,与上年度相比,增幅超过20%,这标志着西安经济发展进入快车道。户籍人口和GDP的明显增加,标志着西安市在这一时期进入城市化发展的高峰,而人口城市化和经济城市化指数较为稳定地长期增长,也基本符合经济带动人口增长的基本现状^[20]。这与城市基础设施、社会经济的不断提升等密切相关,反映了城市化对西安社会结构和人口分布的影响。

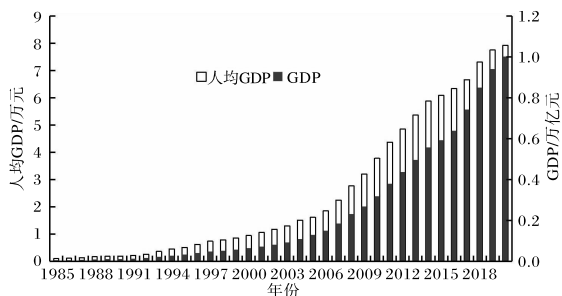


图2 1985—2020年西安市GDP和人均GDP变化趋势图

2.1.2 不透水面积变化 各时期城市区域范围内的不透水面积是城市扩张程度最基本的表征方式,城市空间扩张与城市化发展具有显著正相关关系^[15]。从西安行政区域看,西安城市化发展水平在1972—2008年的37 a间呈现空间差异性特征(图3),城市化带动西安城区不透水面积自1972年之后的37 a间激增135.8%,这表明,西安城区呈集聚发展趋势,而周边区县发展水平偏低,基本呈均质化趋势。整体来说,西安城市化发展在近年来保持不断增长的趋势,西安主城区城市空间扩张速度快速持续增长,周边区县扩张速度较城区缓慢。自20世纪90年代后期,西安市不透水面积明显增长,进入加速发展阶段。根据国家地球系统科学数据中心数据,西安主城区不

透水面积增加率(图4)在1973年、1990年、1992年、1999—2002年的增长率超过2.9%,表明1999年以来,西安城区不透水面积连续增幅较大,城市化建设进程明显。这一结果基本符合西安作为国家中心城市和关中平原城市群核心城市的定位。

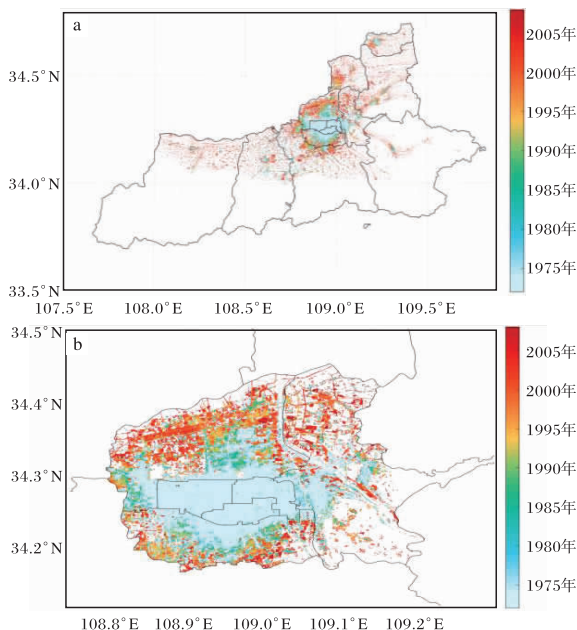


图3 西安市(a)和西安城区(b)1972—2008年不透水区域变化(图中彩色部分为不同年份不透水区域)

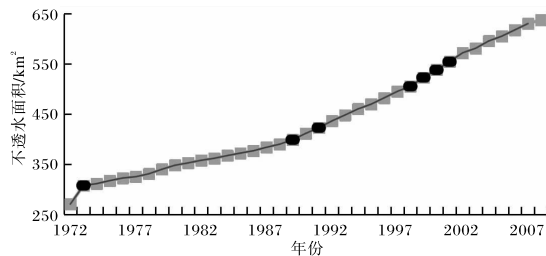


图4 西安城区1972—2008年不透水面积逐年演变曲线(黑色方块表示增长率超过2.9%)

通过对人口、经济和社会城市化三个重要指标的分析可知:2002年西安市区户籍人口增幅为24.3%,成为21世纪以来的最大值;西安市GDP和西安市人均GDP在进入21世纪以后连续稳定增长,平均增幅超过10%;西安城区不透水面积自21世纪以来平均增幅超过2.0%。以上分析说明西安市在2000年前后开始迅速发展,这与刘傲然^[15]对西安城市化发展情况分析结果(表2)接

近。刘傲然通过对 6 个研究年份的相关数据提取发现,1997 年以后,伴随着改革开放的渐次铺开,

西安城市化发展指数快速增长,城市化发展进入快车道。

表 2 各时期西安市城市化发展指数

年份	1992	1997	2002	2007	2012	2017
城市化发展指数	0.188 1	0.231 3	0.305 0	0.387 2	0.540 3	0.648 4

2.2 西安市降水变化特征及对城市化的响应

2.2.1 降水量年际变化特征 降水为表征气候变化的关键指标之一^[21]。由于全球气候不断变化^[22],降水的时空演变规律越来越复杂^[23]。西安市 1971—2020 年的年均降水量为 615.7 mm,1983 年最多为 989.1 mm,1995 年最少,仅 332.7 mm,年际变率较大且具有明显的年代际特征。同时,降水区域差异也较大,单站 50 a 平均最大降水量出现在西安市东南部的蓝田县,达 712.4 mm,最小出现在北部的高陵区,为 520.4 mm,两站相差近 200 mm。

从图 5 可以看出,西安市 1971—2020 年的降水量总体呈增加趋势,线性倾向率为 5.388 mm/10 a。年代际变化呈现“减少—增加—减少—增加”的波动增加特征,20 世纪 70 年代后期降水减少,80 年代前期急剧增加,80 年代后期至 90 年代末持续下降,到 90 年代之后则呈现出振荡上升的趋势。

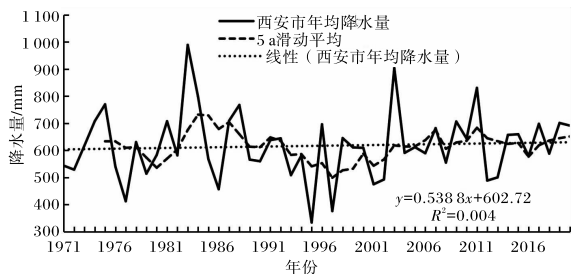


图 5 1971—2020 年西安市年平均降水量年际变化

2.2.2 降水量季节变化特征 按四季划分,西安市春季(3—5 月)降水量占全年降水量的 22.1%,夏季(6—8 月)占 42.2%,秋季(9—11 月)占 31.8%,冬季(12 月—次年 2 月)占 3.9%。降水主要集中在 7—9 月,这 3 个月的降水量占全年降水总量的 48.5%,其中以 9 月最为明显,占全年

降水的 17.5%。相比之下,12 月的降水最少,仅占全年的 0.9%。根据张高健等^[9]对西安市近 50 a 降水量分析,西安市汛期(5—10 月)的降水量占全年降水量 80.5%,西安市 7 个观测站汛期降水量分别占该站全年降水量比例在 79.6%~81.5%之间,其中,蓝田站汛期降水量最大,为 714.1 mm,高陵站最小,为 520.3 mm,说明西安市降水量具有明显的季节特征。

2.2.3 各等级降水的空间分布特征 根据降水量等级划分标准(24 h 降水量 0.1~9.9 mm 为小雨、10.0~24.9 mm 为中雨、25.0~49.9 mm 为大雨、50.0~99.9 mm 为暴雨、100.0~249.9 mm 为大暴雨),分析西安主城区及郊区各等级降水的年平均降水量及占比(表 3,表中西安站代表西安主城区)发现,对西安市降水量的贡献由大到小依次为中雨、小雨、大雨、暴雨和大暴雨。各等级降水的降水日数(表 4)中,小雨最多,占总降水日数的 77%以上。由表 3 和表 4 可见,中雨对西安市降水量贡献最大,但小雨日数最多。一是由于西安地处关中平原中部,南靠秦岭山脉,全区地形呈东西向狭长带,地形对降水的持续性影响较大^[24];二是气溶胶的增加抑制了降水,气溶胶抑制降水主要是减少了中小雨的日数^[25]。另外,秦岭的屏障作用对南支气流起到一定的阻挡^[26],但在一定天气形势下,秦岭北坡起到地形抬升、加强辐合上升气流的作用,有利于降水的发生^[27]。

2.3 西安主城区降水量的突变特征

2.3.1 突变点判断 用西安观测站资料代表西安主城区情况,采用滑动 t 检验进行判断。在多次比较后,选择了子序列长度 $n=2$ 。由图 6 可见, t 统计量在 1973 年和 2000 年分别超过了 0.05 显著性水平临界线,说明西安主城区年降水

表 3 1971—2020 年西安各站各等级降水年平均降水量及占比

单位:mm(%)

站名	小雨	中雨	大雨	暴雨	大暴雨
西安	182.3(32.67)	208.8(37.41)	130.0(23.29)	34.8(6.23)	2.2(0.40)
长安	193.0(29.25)	243.6(36.92)	161.3(24.45)	57.5(8.71)	4.5(0.67)
临潼	169.6(28.78)	215.1(36.50)	147.9(25.08)	52.3(8.91)	4.3(0.73)
高陵	169.0(32.48)	205.9(39.57)	112.6(21.64)	30.1(5.78)	2.8(0.53)
周至	189.2(29.86)	215.8(34.04)	162.4(25.62)	66.5(10.48)	—
鄠邑	193.6(30.72)	225.9(35.84)	152.1(24.14)	56.0(8.89)	2.6(0.41)
蓝田	204.9(28.77)	255.2(35.83)	181.4(25.47)	64.3(9.03)	6.4(0.90)

注:—表示未出现,下同。

表 4 1971—2020 年西安各站各等级降水年平均降水日数及占比

单位:d(%)

站名	小雨	中雨	大雨	暴雨	大暴雨
西安	69.94(79.48)	13.48(15.32)	4.02(4.57)	0.54(0.61)	0.02(0.02)
长安	77.10(78.24)	15.62(15.85)	4.84(4.91)	0.94(0.95)	0.04(0.05)
临潼	67.72(78.07)	13.70(15.79)	4.42(5.10)	0.86(0.99)	0.04(0.05)
高陵	69.64(80.40)	13.06(15.08)	3.40(3.93)	0.50(0.58)	0.02(0.01)
周至	75.24(79.38)	13.70(14.46)	4.84(5.11)	1.00(1.05)	—
鄠邑	77.80(79.78)	14.30(14.66)	4.52(4.64)	0.88(0.90)	0.02(0.02)
蓝田	79.38(77.75)	16.12(15.79)	5.50(5.39)	1.04(1.02)	0.06(0.05)

量的突变主要发生在这两个时间点,2000 年正好对应西安城区快速城市化的时间节点。

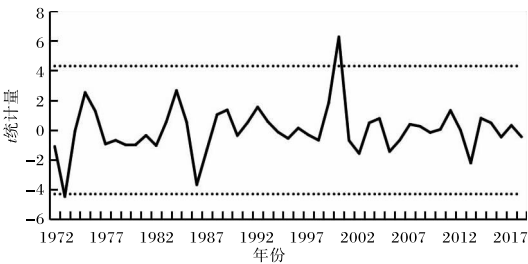


图 6 1971—2020 年西安站年降水量滑动 t 检验
(虚线为 0.05 显著性水平临界线)

2.3.2 城市化前后年际降水量的对比 结合前文对西安城市化进程的分析,对比分析西安市 7 个国家气象站 2000 年前后两个阶段降水变化趋势(图略),1971—2000 年,西安市各站降水均呈减少趋势,西安站的线性倾向率为 $-13.179\text{ mm}/10\text{ a}$,位列 7 站中的第 4 位。2001—2020 年,各站

的降水均呈增加趋势,西安站的线性倾向率为 $7.721\text{ mm}/10\text{ a}$,位列 7 站中的最后一位。分析发现,2000 年之后,西安站的降水增加趋势相比其他郊县站有所减弱,其原因是由于不透水面积的扩大和植被覆盖的减少导致蒸发蒸散量降低,影响到局部环流和降水的自然状态,进而使降水的分布和强度发生了变化。这对城市气候和环境的适应性以及水资源管理等方面提出了新的挑战。

2.3.3 城市化前后西安站各等级降水的对比

通过对西安站 1971—2000 年和 2001—2020 年两个时段降水资料分段分析发现(图 7),2000 年之后,西安站小雨、中雨的年均降水量分别由 184.9 mm 减少到 178.5 mm 、 215.2 mm 减少到 199.3 mm ,大雨、暴雨的年均降水量分别由 117.4 mm 增加到 148.8 mm 、 32.1 mm 增加到 38.8 mm 。相对应的,小雨、中雨的年均降水日数分别由 72 d 减少

到 67 d、14 d 减少到 13 d,大雨的降水日数仅增加 1 d,暴雨的降水日数持平。

综合来看,大雨的变化最为显著。突变后的 20 a 中,大雨在年均降水量提升 26.7%的同时,降水日数仅增加了 1 d。这表明,受到城市化影响,西安站大雨的雨强明显增加。大暴雨在前 30 a 仅出现了一次,具有偶然性,也凸显了其罕见性;但随着城市化的推进,未来对于这类极端降水事件需加强关注。

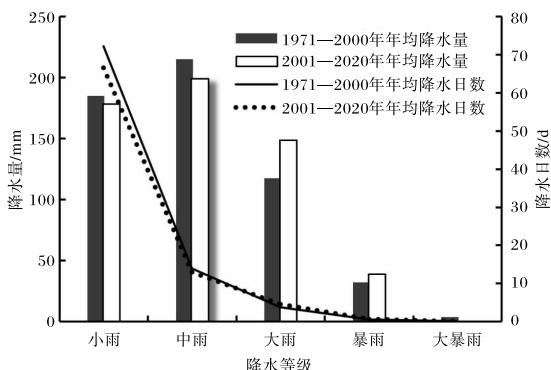


图7 1971—2000年、2001—2020年西安站各等级降水量、降水日数分布图

2.3.4 城市化前后西安站与郊县站降水年代际变化特征 以2000年为界,对西安市7个气象站1971—2020年的降水量进行年代际分析。由图8可见,1971—2000年,各站降水量均经历增加—减少的波动变化。2001—2020年,由于城市化等因素影响,西安站与郊县站的降水量变化有明显差异,除西安站外,其他6个郊县站的降水量均呈连续增加态势。其中:周至站表现突出,2011—2020年周至站年均降水量较2001—2010年增加6.9%;鄠邑最少,增加0.8%;而西安站后10a较前10a减少1.2%。

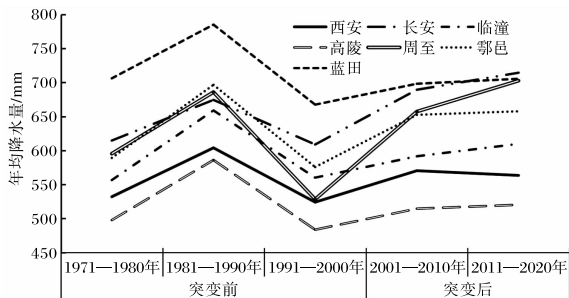


图8 西安各气象站1971—2020年降水年代际变化

3 结论与讨论

本文以1971—2020年为研究时段,综合运用滑动 t 检验法、趋势线法、滑动平均法等,从西安城市化进程和降水特征两方面客观分析了西安市降水变化对城市化进程的响应特征,得到以下主要结论。

(1)西安市自20世纪90年代初城市化进程加快,21世纪后进入高速发展阶段,城区发展较快,远郊区和蓝田、周至两县相对缓慢。城市化带动西安城区不透水面积自1972年之后的37 a间激增135.8%,尤其是在2000年后增长迅速。人口和经济增长也与城市化进程同步,2002年西安市区户籍人口显著增长,西安市GDP和西安市人均GDP稳定提升,表明经济进步有效推动了城市化发展。

(2)西安市降水具有明显的季节特征。降水主要集中在7—9月,这3个月的降水量占全年降水总量的48.5%,其中以9月最为明显,占全年降水的17.5%。

(3)西安站1971—2020年的降水呈波动增加趋势,线性倾向率为1.537 mm/10 a,降水趋势、降水等级分布与西安市降水的整体变化一致。

(4)城市化对西安站降水产生了一定影响。西安城区不透水面积的扩大和植被覆盖的减少导致蒸发蒸散量降低,影响到局部环流和降水的自然状态。2000年左右,西安站降水出现突变,城市化导致的局地气候变化使降水量呈逐步减少趋势,但这种影响相对于大尺度气候变化而言仍有限。

(5)城市化导致西安站大雨雨强增加。在2001—2020年间,西安站大雨降水量相较于1971—2000年提升了26.7%,而降水日数仅增加了1 d。这表明城市建筑结构导致局地对流云不易消散,增加了局部降水量,影响了自然降水的形成和分布。同时,雨强增大和不透水面积增加导致地表径流增多,给城市排水系统带来挑战。

(6)本研究初步分析了西安城市化对区域气候的影响,为未来西安的城市规划、气候适应和可持续发展提供了一定参考。进一步的研究需要考虑更多细节和复杂因素,以支持多角度分析城市

化对区域气候的影响。

参考文献:

- [1] 毛翠翠,左其亭. 新密市气候变化特征及人为驱动力分析[J]. 南水北调与水利科技,2013,11(3):21-26.
- [2] 夏军,左其亭. 国际水文科学研究的新进展[J]. 地球科学进展,2006,21(3):256-261.
- [3] 王喜全,王自发,齐彦斌,等. 城市化进程对北京地区冬季降水分布的影响[J]. 中国科学,2008,38(11):1438-1443.
- [4] 郑玉萍,李景林,赵书琴,等. 乌鲁木齐近 48 a 城市化进程对降水的影响[J]. 干旱区地理,2011,34(3):442-448.
- [5] 王文,张薇,蔡晓军. 近 50 a 来北京市气温和降水的变化[J]. 干旱气象,2009,27(4):350-353.
- [6] 卢新卫,陈鹏. 西安城市化进程与环境生态问题研究[J]. 干旱区资源与环境,2006,20(1):7-12.
- [7] 田武文,黄祖英,胡春娟. 西安市气候变暖与城市热岛效应问题研究[J]. 应用气象学报,2006,17(4):438-443.
- [8] 王建鹏,孙继松,杜继稳,等. 西安地区气温的年代际变化及其受城市化进程的影响[J]. 气候与环境研究,2009,14(4):434-444.
- [9] 张高健,曹梅,仇娜,等. 西安市近 50 年降水时空变化特征分析[J]. 江西农业学报,2022,34(6):126-130.
- [10] 王丽娟,查良松. 郑州市 50 年来的气候变化及城市化对其贡献率[D]. 芜湖:安徽师范大学,2010.
- [11] 蔡新玲,姜创业,王越. 西安市高温和夏季降水的气候特征分析[C]//2006 年中国气象学会年会:气候变化与其机理和模拟分会场论文集. 北京:中国气象学会,2006:1263-1268.
- [12] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,2007:82-135.
- [13] 汪丽,李九全. 新型城镇化背景下的西北省会城市化质量评价及其动力机制[J]. 经济地理,2014,34(12):55-61.
- [14] 张宇,张仲伍,李娜. 山西省新型城镇化质量评价及其空间格局分析[J]. 地理科学研究,2018,7(1):33-40.
- [15] 刘傲然. 城市化进程中的城市空间扩展响应模式、机理及策略:以关中平原城市群为例[D]. 西安:西北大学,2021.
- [16] 安晓亮,安瓦尔·买买提明. 新疆新型城镇化水平综合评价研究[J]. 城市规划,2013,37(7):23-27.
- [17] 徐杰佳,臧淑英,那晓东. 基于夜间灯光数据的东北三省城市空间格局演变研究[J]. 冰川冻土,2020,42(2):693-703.
- [18] 韩会然,杨成凤,宋金平. 北京市土地利用变化特征及驱动机制[J]. 经济地理,2015,35(5):148-154.
- [19] 齐本荣. 人口城市化进程中政府与市场作用探析:基于高质量发展的视角[J]. 广州社会主义学院学报,2023,2(81):87-92.
- [20] 崔燕明. 人口迁移及其对城市化进程的作用[D]. 哈尔滨:哈尔滨师范大学,2007.
- [21] 郭铭. 基于小波分析的朝阳市降水周期特征研究[J]. 水土保持应用技术,2017(4):41-43.
- [22] 宋连春. 西北干旱气候变化及其对全球变暖的响应研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2005.
- [23] 陆文秀,刘丙军,陈晓宏,等. 珠江流域降水周期特征分析[J]. 水文,2013,33(2):82-86.
- [24] 邓小丽,薛春芳,林杨,等. 西安市大降水的气候特征分析[J]. 陕西气象,2007(1):29-31.
- [25] 王晓玲,任燕. 秦岭山区近 50 年降水差异及可能局地成因探讨[J]. 气候与环境研究,2012,17(6):911-918.
- [26] 蔡新玲,程肖侠,张丽君. 1961—2021 年陕西省区域性暴雨过程特征及其变化[J]. 陕西气象,2024(4):20-25.
- [27] 周正朝,胡娜娜,周华,等. 西安市气温和降水变化趋势分析[J]. 干旱区研究,2012,29(1):27-34.