

# “南水北调”中线水源区可利用降水量时序分析 ——以十堰市为例

蔡晓雨<sup>1</sup> 赵茂钦<sup>1</sup> 李卫朋<sup>1</sup> 陈忠升<sup>1</sup> 税攀恒<sup>1, 1</sup>

王瑞芳<sup>1, 2</sup> 唐梦滴<sup>1, 3</sup> 敬楠<sup>1</sup> 高艺琳<sup>1</sup>

(1. 西华师范大学 a. 国土资源学院;

b. 区域环境演变与保护研究中心, 四川 南充 637009;

2. 云南大学 地球科学学院, 云南 昆明 650500;

3. 天津工业大学 环境科学与工程学院, 天津 300380)

**【摘要】:** 可利用降水量的盈亏程度对于“南水北调”输水工程水源区和受水区的水资源、水环境和社会发展具有重要意义。基于4个气象站逐日数据计算地处“南水北调”水源区的十堰市1980~2019年可利用降水量, 并利用Mann-Kendall方法和小波分析探讨40年间可利用降水量变化特点。研究表明: 受十堰市40年间降水量减少和潜在蒸散发增多的影响, 可利用降水量呈减少趋势, 变化倾向率为42.796mm/10a; 年均和各季节可利用降水量均发生过突变, 年可利用降水量突变发生在1991年前后; 十堰市全年和各季节可利用降水量的显著变化周期均在5年以内。十堰市可利用降水资源日趋紧张, 应充分利用好客水资源, 提高水资源利用效率, 保障“南水北调”输水工程平稳运行。

**【关键词】:** 南水北调 可利用降水量 Mann-Kendall法 小波分析

**【中图分类号】:** P426.6 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)06-1356-10

在漫长的社会发展的历程中, 水与人类文明的兴衰息息相关, 水资源对保持社会稳定起着基础性作用。当前, 人类社会已发展到空前文明的高度, 不合理的人类活动给水环境造成了严重破坏, 使原本有限的水资源变得更加弥足珍贵, 水资源结构性矛盾已成为诸多地区社会动荡的重要原因, 严重阻碍了社会经济的可持续发展<sup>[1~3]</sup>。地表水资源主要来源于大气降水, 从降水量

**作者简介:** 蔡晓雨(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生态安全与生态水文. E-mail: 2300160914@qq.com  
李卫朋 E-mail: wpliwenli@163.com

**基金项目:** 四川省教育厅项目(18ZA0476); 西华师范大学英才科研基金项目(17YC112)、基本科研业务项目(15E002、16C003); 区域文化研究中心年度项目(CQYYJC2101); 国家级大学生创新创业项目(201810638054; 201810638055; 201910638025; S202010638090)

中扣除蒸散量之后可得到降蒸差,即可利用降水量<sup>[4~6]</sup>。可利用降水量可用于衡量区域水资源的收支情况,对缓解水资源供需矛盾具有重要借鉴意义<sup>[7,8]</sup>。伴随着全球气候变化加剧,大气降水和潜在蒸散量也在发生着变化。潜在蒸散量的精确计算,对于研究可利用降水量至关重要<sup>[9]</sup>。Penman-Monteith(P-M)公式由联合国粮农组织(FAO)提出,因其对气象因子考虑较为全面,已被广泛应用于潜在蒸散量的估算中,国内外关于 P-M 公式的研究仍在不断发展中,Valiantzas 认为引入平均风速时,P-M 公式计算精度会更高<sup>[10]</sup>,魏榕等<sup>[11]</sup>、毕彦杰等<sup>[12]</sup>、曲学斌等<sup>[13]</sup>和张国宏等<sup>[14]</sup>分别利用 P-M 公式在不同区域开展了潜在蒸散量的相关研究。基于水量平衡原理的可利用降水量正成为当前研究的热点。徐盼盼等<sup>[15]</sup>分析了西安市 65 年间的大气降水与可利用降水量变化规律,并对未来 10 年的可利用降水量进行了预测;彭嘉栋等<sup>[16]</sup>探讨了洞庭湖近百年来可利用降水量变化特征,为洞庭湖地区的农业活动和抵抗旱涝灾害提供了借鉴依据;阮翠冰等<sup>[17]</sup>基于桑斯维特法分析了闽东地区可利用降水量的时空分布特征。

当前,国内学者由于气象数据的来源渠道等原因影响,利用 P-M 公式计算“南水北调”输水工程水源区可利用降水量的研究还较为有限<sup>[18,19]</sup>。十堰市地处秦巴山区,下辖区县大部分是国家级重点扶贫开发县,近年来,经济社会发展迅猛,对水资源的需求显著增加。十堰市是“南水北调”中线输水工程的起点,丹江口水库重要的水源涵养区,水资源丰富程度对自身的高质量发展和受水地区社会稳定具有十分重要的意义。本文通过十堰市内外气象站点(郧阳、郧西、房县、老河口)1980~2019 年的实测逐日气象数据计算可利用降水量,分析其时序变化特征,以期为十堰市经济社会可持续发展和“南水北调”中线输水工程发挥最大价值提供参考。

## 1 研究区概况

十堰市是鄂西北地区的中心城市(图 1),东北与河南省交界,北、西与陕西省接壤,南与重庆市毗邻,东与湖北省襄阳市接壤,介于 31° 30' N~33° 16' N 和 109° 29' E~111° 16' E 之间,总面积 23680km<sup>2</sup>,下辖 8 个县市区。截至 2019 年末,十堰市国内生产总值达到 2012.7 亿元,常住人口 339.8 万人。十堰市全部位于季风气候区,年均降水量 834mm,平均气温 15.2℃,2019 年水资源总量达到 57.8 亿 m<sup>3</sup>,人均水资源量为 1701m<sup>3</sup>,水能资源蕴藏量达 5×10<sup>6</sup>kw。汽车工业和水电产业是其主导产业,近年来,旅游已逐渐成为十堰市新兴支柱产业。



图 1 研究区域图

## 2 数据来源与研究方法

## 2.1 数据来源与处理

本文选取十堰市内 4 个气象站点 1980~2019 年的日尺度数据, 包含降水量、平均气温、相对湿度、10m 高处风速、日照时数、蒸发量等, 数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>), 可利用降水量与潜在蒸散量在 Excel 中计算, Mann-Kendall 检验与小波分析利用 Matlab2019b 完成。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 可利用降水量

可利用降水量是表示区域水分盈余程度的重要指标<sup>[20]</sup>, 可定义为:

$$F = P - ET_0 \quad (1)$$

式中:  $F$  为可利用降水量(mm);  $P$  为降水量(mm);  $ET_0$  为潜在蒸散量(mm)。

### 2.2.2 Penman-Monteith(P-M)法

修正的 Penman-Monteith(P-M)法于 1998 年提出, 该方法考虑到了当地的气候和海拔因素<sup>[21]</sup>。计算公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (2)$$

式中:  $\Delta$  为饱和水汽压与温度关系曲线的斜率值(kPa/°C);  $R_n$  代表地面净辐射量(MJ/m<sup>2</sup>);  $G$  代表土壤热通量(MJ/(m<sup>2</sup>·d)), 其值很小, 可忽略不计;  $\gamma$  代表湿度比常数(kPa/°C);  $T$  代表日平均温度(°C);  $U_2$  代表 2m 高度处风速(m/s);  $e_s$  代表饱和水汽压(kPa);  $e_a$  代表实际水汽压(kPa/°C), 式中各参数计算如下:

$$\gamma = \frac{CP}{\varepsilon \lambda} \quad (3)$$

式中:  $C$  为空气定压比热, 取值为  $1.013 \times 10^{-3}$  MJ/kg·°C;  $P$  为平均气压(kPa);  $\varepsilon$  为水与空气的分子量之比, 其值为 0.622;  $\lambda$  为蒸发潜热, 其值为 2.45 MJ/kg。

$$e_s = 0.6108 \times \exp\left[\frac{17.27T}{T + 237.3}\right] \quad (4)$$

$$e_a = RH \times e_s \quad (5)$$

式中:  $RH$  为平均相对湿度(%)。

$$\Delta = \frac{4\,098 \times es}{(T + 237.3)^2} \quad (6)$$

$$u_z = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)} \quad (7)$$

式中,  $u_z$  为  $z$  米高处测量的风速 (m/s);  $z$  为风速计仪器安放高度 (m), 在本文  $z=10\text{m}$ 。

$$Rn = (1 - \alpha) \left( 0.25 + 0.5 \frac{n}{N} \right) R_s - \left( 0.9 \frac{n}{N} + 0.1 \right) (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) \sigma (T + 27.15)^4 \quad (8)$$

式中:  $\alpha$  为反照率 ( $\alpha=0.23$ );  $N$  为昼长 (h);  $n$  为日照时数 (h);  $\sigma$  为斯蒂芬-波尔兹曼常数 ( $4.903 \times 10^{-9} \text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ );  $R_s$  为太阳总辐射 ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ )。

### 2.2.3 Mann-Kendall 非参数统计检验法和小波分析

Mann-Kendall 非参数统计方法是常应用于气象等长时间序列趋势、突变分析的方法<sup>[22]</sup>, 受少数极值的影响干扰较少, 且不要求数据符合一定的正态分布<sup>[23]</sup>。小波分析法能揭示时间序列的变化特征, 常用来分析长时间序列中所包含的周期性规律<sup>[24]</sup>。通过该方法来分析十堰市 1980~2019 年可利用降水量的周期特征。

## 3 结果分析

### 3.1 降水量与潜在蒸散量变化趋势

#### 3.1.1 降水量变化特征分析

十堰市 1980~2019 年降水量年际波动明显, Mann-Kendall 趋势检验和线性倾向估计的结果 (表 1、图 2) 表明, 40 年间十堰市的降水量总体上呈减少趋势, 但减少趋势不显著 ( $|Z|=0.8056 < 1.28$ ) ( $|Z|=0.8056 < 1.28$ ), 减少速率约为  $10.10\text{mm}/10\text{a}$ 。1980s、1990s、2000s 和 2010s 的年均降水量分别为 868.05、755.71、852.48 和 805.49mm。从各季节降水量变化趋势来看, 40a 间十堰市四季降水量均未通过 0.05 的显著性水平检验, 说明同一季节降水量变化趋势不显著。春季降水量总体上呈线性增加趋势, 速率为  $2.86\text{mm}/10\text{a}$ , 夏季、秋季和冬季降水量呈线性减少趋势, 其中夏季减少速率最大, 为  $13.48\text{mm}/10\text{a}$ , 其次为秋季 ( $2.70\text{mm}/10\text{a}$ ), 冬季减少得最慢 ( $2.53\text{mm}/10\text{a}$ ), 因此夏季降水量减少是造成十堰市全年降水量减少的直接原因。

表 1 十堰市 1980~2019 年降水量显著性检验结果

| 时段 | Z 值 | 变化趋势 | 变化速率 (mm/10a) | 显著性 | 置信度 |
|----|-----|------|---------------|-----|-----|
|----|-----|------|---------------|-----|-----|

|    |         |    |       |     |   |
|----|---------|----|-------|-----|---|
| 全年 | -0.8056 | 减少 | 10.10 | 不显著 | - |
| 春季 | 0.4603  | 增加 | 2.86  | 不显著 | - |
| 夏季 | -1.1278 | 减少 | 13.48 | 不显著 | - |
| 秋季 | -0.4948 | 减少 | 2.70  | 不显著 | - |
| 冬季 | -0.0575 | 减少 | 2.53  | 不显著 | - |

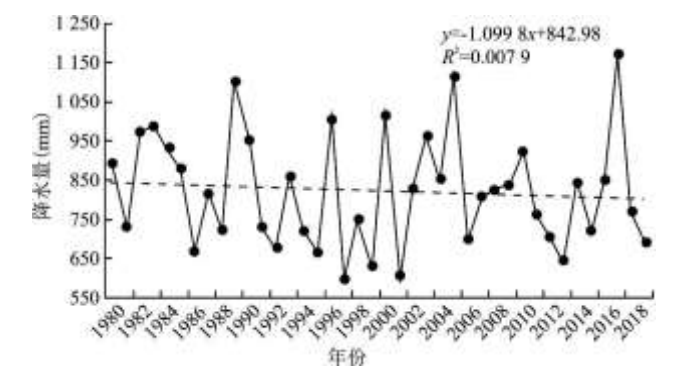


图 2 十堰市 1980~2019 年降水量变化趋势

3. 1. 2 潜在蒸散量变化特征分析

如表 2、图 3 所示，十堰市 1980~2019 年全年与各季节的潜在蒸散量均呈波动性上升趋势，Mann-Kendall 趋势检验和线性倾向估计的结果显示，40 年间研究区年和各季节潜在蒸散量上升趋势显著。年潜在蒸散量的最大值和最小值分别出现在 2016 年 (488.36mm) 和 1989 年 (325.72mm)，各阶段年均潜在蒸散量分别是：1980s 为 359.03mm,1990s 为 393.53mm,2000s 为 437.97mm,2010s 为 452.42mm, 研究时段总体增加速率为 31.80mm/10a。进一步分析得知，十堰市潜在蒸散量变化趋势阶段性特征明显，1980~1990 年潜在蒸散量总体上以 28.17mm/10a 的速率减少，1991~2000 年以 103.68mm/10a 的速率增加，21 世纪以来，潜在蒸散量增加速度趋缓，速率为 18.3mm/10a。春、夏、秋、冬四季的潜在蒸散量变化趋势与年潜在蒸散量较相似。

3. 2 可利用降水量变化趋势分析

如表 3 和图 4 所示，十堰市 1980~2019 年可利用降水量年际波动明显，研究年份可利用降水量呈线性减少趋势，且通过了信度 95%显著性检验 ( $|Z|=2.0484$ ) ( $|Z|=2.0484$ )，表明减少趋势较为显著，这与十堰市研究时段的降水量减少和潜在蒸散量增加密切相关。各时段可利用降水量分别是：1980s 为 509.02mm,1990s 为 362.17mm,2000s 为 414.52mm,2010s 为 353.06mm, 最大值与最小值分别为 1989 年 (772.93mm) 和 2001 年 (158.20mm)，40 年间可利用降水量总体的减少速率为 42.796mm/10a。1980~2019 年四季的可利用降水量均呈减少趋势，夏、秋两季可利用降水量通过信度 95%的显著性检验，春、冬两季减少趋势不显著。春、夏、秋三季可利用降水量较丰富，多年平均值分别为 72.44、209.84、126.28mm, 冬季则年均蒸发量超过降水量 (-0.54mm)。夏季减少速率最快，达到 24.132mm/10a, 冬季其次，为 8.583mm/10a, 表明十堰市夏季水资源盈余有减少趋势，冬季水资源供需结构矛盾将进一步加大。

表 2 十堰市 1980~2019 年潜在蒸散量显著性检验结果

| 时段 | Z 值    | 变化趋势 | 变化速率(mm/10a) | 显著性 | 置信度 |
|----|--------|------|--------------|-----|-----|
| 全年 | 5.6965 | 增加   | 31.80        | 显著  | 99% |
| 春  | 4.9255 | 增加   | 8.96         | 显著  | 99% |
| 夏  | 5.5929 | 增加   | 10.86        | 显著  | 99% |
| 秋  | 5.6850 | 增加   | 7.16         | 显著  | 99% |
| 冬  | 4.8564 | 增加   | 4.75         | 显著  | 99% |

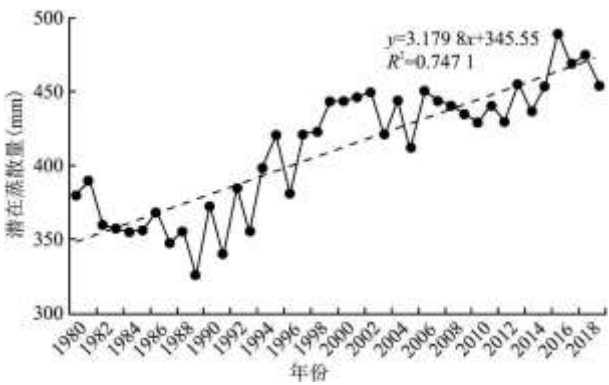


图 3 十堰市 1980～2019 年潜在蒸散量变化趋势

表 3 十堰市 1980～2019 年可利用降水量显著性检验结果

| 时段 | Z 值     | 变化趋势 | 变化速率(mm/10a) | 显著性 | 置信度 |
|----|---------|------|--------------|-----|-----|
| 全年 | -2.0484 | 减少   | 42.796       | 显著  | 95% |
| 春  | -0.5179 | 减少   | 5.267        | 不显著 | —   |
| 夏  | -1.7492 | 减少   | 24.132       | 显著  | 95% |
| 秋  | -1.2083 | 减少   | 4.4458       | 不显著 | —   |
| 冬  | -1.8413 | 减少   | 8.583        | 显著  | 95% |

3.3 可利用降水量突变检验

1980～2019 年十堰市年际和各季节可利用降水量均发生了突变(图 5),年可利用降水量突变年份在 1991 年前后,1991 年前十堰市可利用降水量呈增加趋势,变化幅度为 2.13mm/10a,极大值出现在 1989 年(772.92mm),年均可利用降水量为 515.28mm,1991 年后呈减少趋势,减少幅度为 1.57mm/10a,2001 年为 40 年间的最小值(158.2mm),年均值为 369.04mm。从各季节可利用降水量年际变化来看,十堰市 1980～2019 年春、夏、冬三季可利用降水量在 Mann-Kendall 突变检验中反映出有多个突变点。十堰市春季可利用降水量发生了 6 次突变,分别为 1981、1982、1984、1985、1994 和 2017 年,通过对比这 6 年前后时

段可利用降水量的年均值变化量发现,1981年前后变化量为11.81mm,1982年为8.32mm,1984年为2.66mm,1985年为4.83mm,1994年为30.11mm,2017年为9.41mm,表明1994年为这40年间的真正突变点。夏季可利用降水量发生了6次突变,经过验证后发现真正突变点在2011年前后,突变前年均值为231.53mm,突变后为135.04mm。1987年为秋季可利用降水量的突变点,突变后的年均值相比发生突变前减少71.1mm。冬季可利用降水量大致发生4次突变,其真正突变点大致发生在1999年,突变前时段年均值为10.44mm,突变后为-10.05mm。

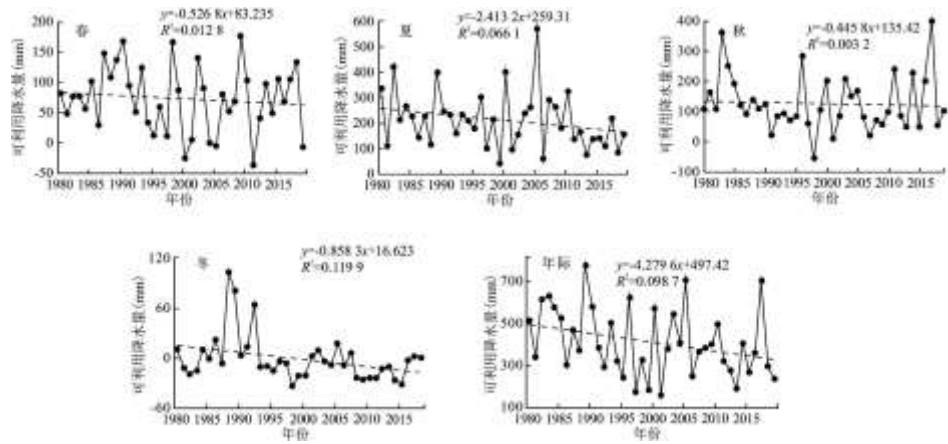


图4 十堰市1980~2019年各季节及全年可利用降水量变化趋势

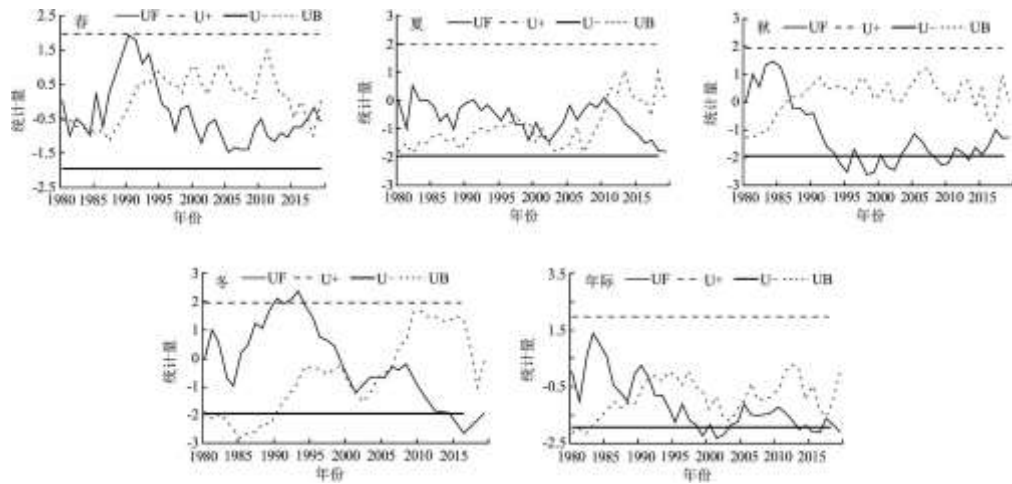


图5 十堰市1980~2019年各季节及全年可利用降水量突变检验结果

### 3.4 可利用降水量周期性分析

如图6、图7所示,40年间年十堰市全年和各季节的可利用降水量均存在多个周期变化,为进一步明确变化周期,利用小波全谱进行周期变化的显著性检验。从图8可知,全年和各季节的可利用降水量通过95%的显著性检验的均为较短的周期,因此,1980~2019年间,十堰市可利用降水量是以较短周期变化为主。具体来说,全年和春夏秋冬可利用降水量最为显著的变化周期分别为2.5年左右、4年左右、2.5年左右、3年左右和4年左右。

## 4 讨论与结论

#### 4.1 讨论

本文研究结果显示十堰市降水量呈减少趋势，这与赵美静等<sup>[25]</sup>对整个“南水北调”中线工程水源区降水量变化趋势的研究在相应年份基本相符。从现有研究来看，我国大部分地区降水量均为减少趋势<sup>[26~28]</sup>，并且普遍是夏季降水减少造成的，这与太阳活动、下垫面状况和人类活动有一定关系<sup>[29]</sup>，降水量变化的影响因素是一个值得探讨的问题。十堰市年降水量下降速率是全国平均水平(3.93mm/10a)的三倍<sup>[30]</sup>，相关学者预测汉江流域降水量到本世纪中叶还有持续减少的可能<sup>[31]</sup>，这无疑将加大十堰市生产、生活、生态用水和“南水北调”中线工程输水压力。如何科学、平稳运行“南水北调”输水工程，发挥丹江口水库最大社会、生态、经济效益，将是水利工程管理者和地方行政管理者的考验。

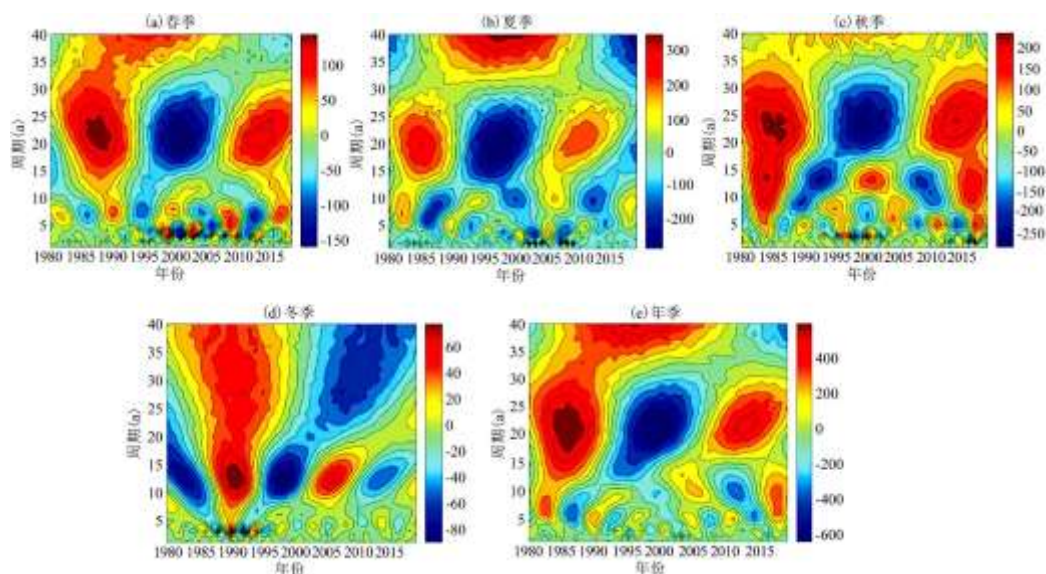


图6 小波系数实部等值线

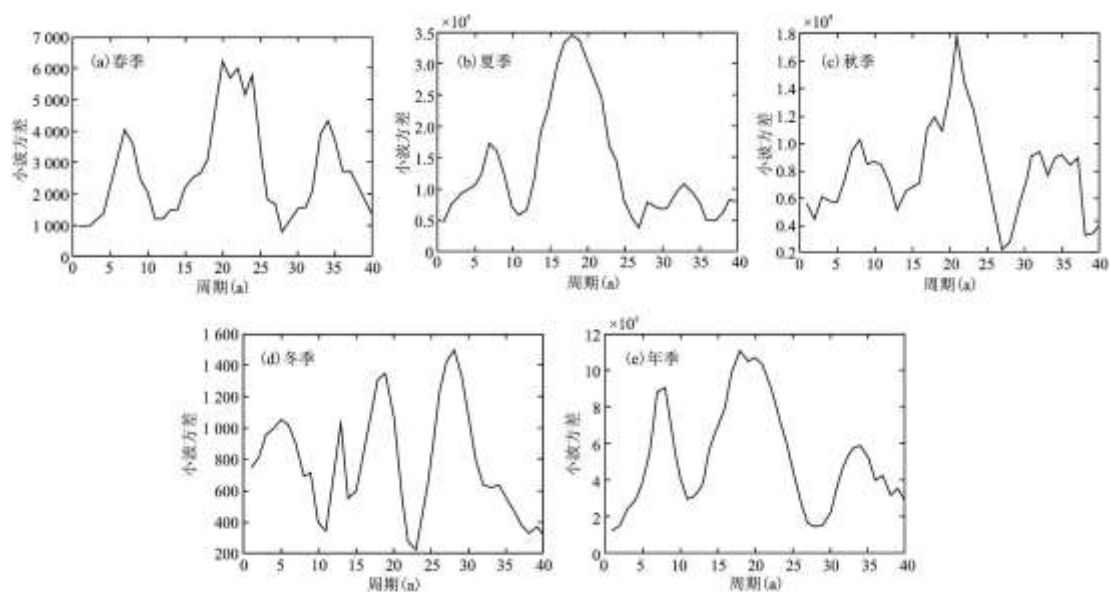


图7 小波方差图

蒸散发已成为研究分析区域水生态安全的重要研究内容，因此，蒸发量结果的精度高低至关重要。本文结合现有数据，分析 1984~2001 年 P-M 公式计算的十堰市潜在蒸散量与水面蒸发量实测值之间的关系，结果表明，18 年间十堰市潜在蒸散量与水面蒸发量具有显著的线性相关关系 ( $P=0.000$ ,  $R=0.791$ )，与有关学者对于二者的研究结论一致<sup>[32,33]</sup>。同时发现，十堰市水面蒸发量与潜在蒸散量之间的经验系数偏小，约为 0.3182，这可能与 P-M 公式主要考虑植被的蒸散发有一定的关系<sup>[34]</sup>，在未来研究中，可借助考虑植被与土壤表层等的双源蒸散发模型去进一步探究。

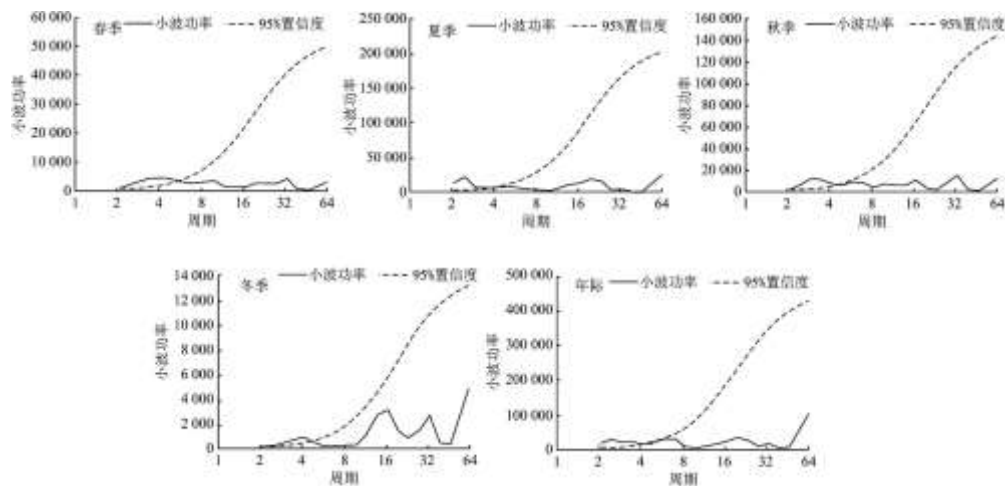


图 8 小波全谱

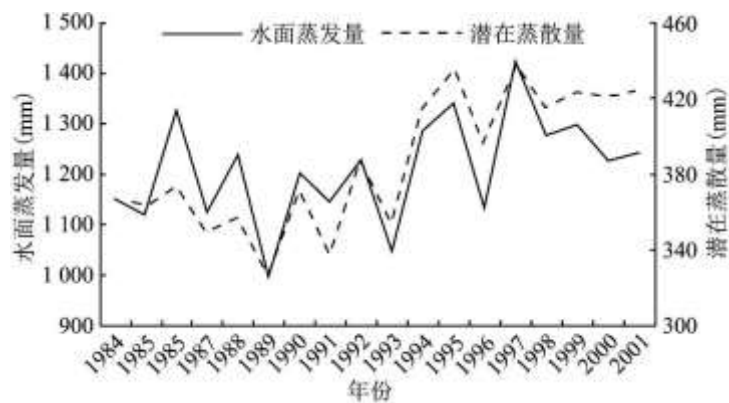


图 9 水面蒸发量与潜在蒸散量年际变化趋势

当前，全球气候持续变化，各种气象要素变化不稳定性加剧，利用 P-M 公式计算的潜在蒸散量考虑的气象因子较多，现有研究表明，潜在蒸散量的影响因子在不同区域存在着一定差别，但主要是气温和风速<sup>[35~37]</sup>。经分析可知，在本文的研究时段内，十堰市气温 ( $|Z|=4.085$ ) ( $|Z|=4.085$ ) 和风速 ( $|Z|=5.731$ ) ( $|Z|=5.731$ ) 均有较明显的上升，与潜在蒸散量呈显著的正相关关系 (表 4)。十堰市可利用降水量减少速率达到 42.796mm/10a，其中潜在蒸散量的变化幅度远大于降水量的变化幅度，可见，可利用降水量的减少主要与潜在蒸散量增加有直接关系。因此，加强潜在蒸散量的归因分析研究对扭转十堰市可利用降水量不断减少的趋势有积极的促进作用。

表 4 潜在蒸散量与其主要因子相关关系

| 因子 | P    | R     |
|----|------|-------|
| 气温 | 0.00 | 0.827 |
| 风速 | 0.00 | 0.967 |

本文在计算十堰市可利用降水量时，总共利用 4 个气象站点共计 40 年的数据，包含十堰市域内 3 个和市域外(临近)1 个，尚不足以全面反映十堰市的气象状况，在一定程度上影响了十堰市可利用降水量的结果的精度，同时本文暂未涉及十堰市可利用降水量的空间分析。在后续研究中，应加强与相关部门合作，积极拓宽数据获取渠道，全面分析长时间尺度下十堰市可利用降水量时空演变特征，为“南水北调”中线输水工程发挥应有价值提供借鉴。

## 4.2 结论

(1) 1980~2019 年十堰市降水量总体减少速率为 10.10mm/10a, 其中夏季降水减少量最多，是全年降水量减少的主要原因。

(2) 年均潜在蒸散量总体增加速率为 31.8mm/10a, 总体上呈先减少再增加的特征，春夏季潜在蒸散量增加较明显。

(3) 1980~2019 年十堰市可利用降水量整体减少速率为 42.796mm/10a。夏季减少速度相对较快，速率为 24.132mm/10a, 冬季可利用降水量在大部分年份为负值，潜在蒸散发增强是可利用降水量减少的直接原因。

(4) 年可利用降水量大致在 1991 年发生突变，突变后比突变前减少 146.24mm。四季可利用降水量分别在 1994 年、2011 年、1987 年和 1999 年发生突变。

(5) 年和各季节可利用降水量存在着多个变化周期，但以较短周期(小于 5a)变化为主。

## 参考文献:

- [1]刘录三, 黄国鲜, 王璠, 等. 长江流域水生态环境安全主要问题、形势与对策[J]. 环境科学研究, 2020, 33(5):1081-1090.
- [2]李梦娣, 范俊韬, 孔维静, 等. 河流山区段水生态安全评估——以太子河为例[J]. 应用生态学报, 2018, 29(8):2685-2694.
- [3]LEI O, SHIYU L, JINGPING Y, et al. Quantitative assessment of surface runoff and base flow response to multiple factors in pengchongjian small watershed[J]. Forests, 2018, 9(9):553.
- [4]王平, 程清平, 张开平. 云南大围山地区 55 年来可利用降水量与干旱强度变化特征分析[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2018, 38(6):64-70.
- [5]张超, 何立新, 王琳. 布哈河流域水资源的气候演变特征[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(2):45-49, 57.
- [6]王海科, 李亚斌, 钱会. 西安市可利用降水量特征分析及预测[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(12):118-122.
- [7]李红瑛, 薛羽, 曹二佳, 等. 近 50 年来乌兰察布市水分盈亏量时空变化特征[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(12):145-151.

- 
- [8]张逸飞, 张中旺, 孙小舟, 等. 1964-2013 年汉江生态经济带干湿气候时空变化分析[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(10): 17-23, 30.
- [9]曹永强, 李维佳. 辽宁省潜在蒸散时空变化特征与成因[J]. 生态学报, 2018, 38(20): 7276-7287.
- [10]VALIANTZAS J D. Temperature-and humidity-based simplified Penman' s ETO formulae. Comparisons with temperature-based Hargreaves-Samani and other methodologies[J]. Agricultural Water Management, 2018, 208: 326- 334.
- [11]魏榕, 刘冀, 张特, 等. 雅砻江流域中上游径流变化归因分析[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(7): 1643-1652.
- [12]毕彦杰, 赵晶, 吴迪, 等. GFDL-ESM2M 气候模式下京津冀地区未来潜在蒸散量时空变化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 141-149, 335.
- [13]曲学斌, 高绍鑫, 窦华山, 等. 基于 MOD16 的呼伦贝尔蒸散量变化分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(1): 101-107.
- [14]张国宏, 张冬峰, 赵永强, 等. 气候变暖背景下山西区域地表干湿状况变化[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 281-289.
- [15]徐盼盼, 林涛, 钱会, 等. 1951-2015 年西安市大气降水资源趋势分析及预测[J]. 水土保持研究, 2018, 25(5): 313-318, 336.
- [16]彭嘉栋, 李钢, 吴芳. 近百年洞庭湖区可利用降水量变化特征[J]. 生态环境学报, 2017, 26(1): 104-110.
- [17]阮翠冰, 林忠, 林兆华. 闽东地区年可利用降水资源时空特征分析[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(10): 181-187.
- [18]路中, 雷国平, 张露洋. 1961-2016 年松嫩平原月尺度下水分盈亏态势时空分异特征[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(4): 459-469.
- [19]徐冬平, 卜金洋, 杨军辉. 黄河流域水分盈亏量时空变化及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2016, 33(4): 739-746.
- [20]王琳, 王芳. 鄂尔多斯市水资源的气候特征演变[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(5): 132-136, 141.
- [21]贾艳青, 张勃. 1960-2016 年中国北方地区极端干湿事件演变特征[J]. 自然资源学报, 2019, 34(7): 1543-1554.
- [22]陈忠升, 高翊富, 赵仕梅. 1960-2017 年成渝经济区气候变化时空特征分析[J]. 西华师范大学学报(自然科学版), 2019, 40(3): 296-303.
- [23]周平, 陈刚, 刘智勇, 等. 东江流域降水与径流演变趋势及周期特征分析[J]. 生态科学, 2016, 35(2): 44-51.
- [24]杨丹. 四川升钟水库 1983-2011 年降水变化特征分析[J]. 西华师范大学学报(自然科学版), 2019, 40(3): 304-309.
- [25]赵美静, 吴冬雨, 谭云燕, 等. 南水北调中线水源区降水量时空特征分析[J]. 南阳师范学院学报, 2019, 18(6): 1-6.
- [26]袁瑞强, 龙西亭, 王鹏, 等. 山西省降水量时空变化及预测[J]. 自然资源学报, 2015, 30(4): 651-663.

- 
- [27]陈青青, 汤志亚, 杨玲, 等. 四川气温和降水量特征分析[J]. 成都信息工程大学学报, 2017, 32(2):200-207.
- [28]高西宁, 蒋姗姗, 王耸, 等. 东北地区 1961-2014 年降水量变化分区及其区域特征[J]. 生态学杂志, 2016, 35(5):1301-1307.
- [29]孙朋, 金燕婷, 郭忠臣, 等. 1959-2017 年安徽省夏季降水的时空变化及其影响因素研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(2):99-106.
- [30]任国玉, 任玉玉, 战云健, 等. 中国大陆降水时空变异规律——II. 现代变化趋势[J]. 水科学进展, 2015, 26(4):451-465.
- [31]王润, 张奇谋, 李娜, 等. 1961~2049 年汉江流域降水量变化研究[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(11):2743-2752.
- [32]鞠彬, 胡丹. 参考作物蒸发蒸腾量计算方法在额尔齐斯河流域的适用性研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(5):106-111.
- [33]韩元元, 吴昊. 不同蒸发计算方法对水文过程模拟影响的分析[J]. 人民长江, 2012, 43(9):31-33.
- [34]马俊超, 李琼芳, 黄晓敏, 等. 不同蒸散发模型在湿润地区的适用性研究[J]. 人民长江, 2020, 51(10):105-109.
- [35]邢立文, 崔宁博, 关静, 等. 1961~2018 年山西省潜在蒸散量变化特征及成因[J]. 水电能源科学, 2020, 38(2):18-21, 35.
- [36]穆文彬, 孙素艳, 马伟希, 等. 若尔盖湿地潜在蒸散量演变特征及影响因素分析[J]. 高原气象, 2019, 38(4):716-724.
- [37]吉小芳, 马倩, 杨少敏, 等. 近 56 年来新疆策勒县潜在蒸散量变化及影响因子分析[J]. 西南农业学报, 2019, 32(2):416-421.