

康晓燕, 马学谦, 韩辉邦, 等. 1981—2015年黄河上游河曲地区大气可降水量变化特征[J]. 干旱气象, 2017, 35(6): 975–983. [KANG Xiaoyan, MA Xueqian, HAN Huihang, et al. Variation Characteristics of Precipitable Water over Hequ Region of the Upper Reaches of the Yellow River During 1981–2015[J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(6): 975–983], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-06-0975

# 1981—2015年黄河上游河曲地区 大气可降水量变化特征

康晓燕<sup>1,2</sup>, 马学谦<sup>1,2</sup>, 韩辉邦<sup>1,2</sup>, 张博越<sup>1,2</sup>, 王黎俊<sup>1,2</sup>

(1. 青海省人工影响天气办公室, 青海 西宁 810001; 2. 青海省防灾减灾重点实验室, 青海 西宁 810001)

**摘要:**利用1981—2015年黄河上游河曲地区5个气象站的水汽压和降水量月资料, 运用整层大气可降水量经验公式, 计算黄河上游河曲地区大气可降水量和降水转化率, 并对大气可降水量的变化特征进行分析。结果表明, 黄河上游河曲地区大气可降水量呈单峰形态分布, 而降水转化率呈双峰分布。1981—2015年黄河上游河曲地区平均大气可降水量为3 315.5 mm, 其间呈显著增加趋势, 而降水和降水转化率则呈相反的变化趋势。根据突变检验, 黄河上游河曲地区春、夏季和年大气可降水量发生突变, 突变时间分别为1985年、1995年和1996年。气温是影响黄河上游河曲地区大气可降水量变化的主要因素, 其次为相对湿度。

**关键词:**大气可降水量; 降水转化率; 气候突变; 黄河上游河曲地区

**文章编号:**1006-7639(2017)06-0975-09 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-06-0975

**中图分类号:**P426

**文献标志码:**A

## 引言

水汽是大气中较为活跃的成分, 其含量与地表蒸散发和大气环流关系密切, 直接影响全球水资源的重新分配。水汽变化是全球能量和水分循环中非常重要的一个环节<sup>[1]</sup>。大气可降水量(又称大气水汽含量)是指单位面积上空的整层大气水汽全部凝结并降至地面的降水量<sup>[2]</sup>, 可用来表征大气中的水汽含量, 即降水的潜力, 是评估空中水资源的重要依据<sup>[3]</sup>。开展空中水资源的评价研究, 不仅可促进对该地区水资源时空分布的进一步认识, 也可开辟和评估新的水资源利用途径、提高水资源的利用效率提供科学依据<sup>[4]</sup>。目前, 国内许多科学工作者对不同省份的大气可降水量进行了研究, 如林丹等<sup>[5]</sup>利用美国国家环境预报中心(NCEP)大气降水量的逐月再分析资料, 分析了西南地区大气降水量的时空分布特征和变化趋势, 发现西南地区大气可降水量分布有明显的季节变化和显著的地区性差异; 杨红梅等<sup>[6]</sup>利用北京地区常规探空资料计算北

京单站对流层气柱累积水汽量, 研究气柱水汽总量与降水的关系, 为预报降水量级、降水范围提供了依据; 校瑞香等<sup>[7]</sup>、张娟等<sup>[4]</sup>、李霞等<sup>[8]</sup>根据杨景梅等<sup>[9]</sup>的研究结果, 利用降水量和水汽压资料, 对青海省不同生态功能区、新疆天山等地区的大气可降水量和降水转化率进行了分析。

黄河自发源地沿阿尼玛卿山南麓东流, 在甘肃省玛曲附近沿山脚拐弯而折向西的这一区域称为河曲地区<sup>[10]</sup>。该地区是孟加拉湾水汽北上的天然通道, 水汽充沛、降水频繁、新生系统活跃<sup>[11]</sup>, 是青藏高原年降水量最多的区域, 黄河汇水量53%来自这一区域<sup>[12]</sup>。近年来黄河流域因严重干旱而导致的黄河断流、生态环境恶化等问题日益引起人们的关注。因此, 本文利用1981—2015年地面水汽压资料, 运用线性趋势、Mann-Kendall检验等方法对黄河上游河曲地区大气可降水量及降水转化率进行分析, 以期科学开发利用空中云水资源、更有效地实施人工增雨(雪)作业提供依据, 对缓解该地区水资源短缺和保护生态环境起到积极作用。

收稿日期: 2017-04-18; 改回日期: 2017-06-19

基金项目: 国家自然科学基金(41665008, 41565008)及国家重点研发计划项目(2016YFC0501903-4, 2016YFC0501906-5)共同资助

作者简介: 康晓燕(1980—), 女, 工程师, 主要从事人工影响天气相关技术研究。E-mail: kxy3155@163.com。

通信作者: 马学谦(1977—), 男, 高级工程师, 主要从事云和降水物理技术及雷达气象研究。E-mail: mobllfyqxm@126.com。

## 1 研究区域概况

黄河上游河曲地区位于  $33^{\circ}20'N-34^{\circ}40'N$ 、 $90^{\circ}40'E-102^{\circ}30'E$ (图1),为青海、甘肃、四川三省的交界区,平均海拔3500 m,属高寒草甸地带,具有高原亚寒带半湿润气候的自然地理特征<sup>[13]</sup>。因受地理位置、地形影响,黄河上游河曲地区处在多层、多源水汽交汇区。高空水汽主要来自孟加拉湾和印度洋的暖湿气流,低层水汽来自横断山脉的东南暖湿气流,低层暖湿气流的发展促进高层云层垂直发展,云层变厚;另外,东部和北部较冷水汽侵入西南或东南暖湿气流易形成多云多雨天气。鉴于该地区丰富的降水和较强的汇水能力,其在黄河上游水资源和补充下游水量方面占有重要地位<sup>[14]</sup>。

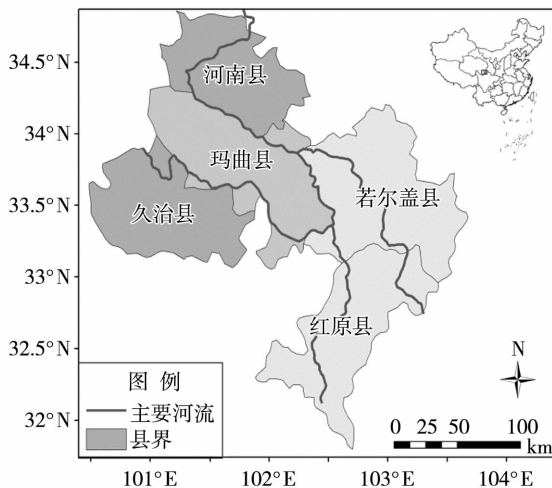


图1 黄河上游河曲地区示意图

Fig. 1 Location of Hequ region in the upper reaches of the Yellow River

## 2 资料与方法

### 2.1 资料

选取符合条件的久治、河南、红原、若尔盖、玛曲5个气象台站1981—2015年月平均水汽压和降水资料,季节划分:3—5月为春季,6—8月为夏季,9—11月为秋季,12月至次年2月为冬季。

### 2.2 方法

根据杨景梅等<sup>[9]</sup>的研究结果,利用地面水汽压计算整层大气可降水量。该方法是根据我国的地理特点和气候特征,利用全国28个台站地面及高空气象要素资料,并引进地理纬度和海拔高度2个参量,建立整层大气可降水量的经验计算模式。其拟合结果与对应探空资料计算的大气可降水量进行对比后发现具有较好的精度,平均相对误差普遍小于

20%。尤其在西北地区,其计算结果与探空计算结果的相关性普遍高于地面露点的计算结果。对于缺乏探空资料的地区,如黄河上游河曲地区,该方法具有非常实际的应用价值。

采用地面水汽压的经验公式,计算黄河上游河曲地区整层大气的可降水量,具体公式如下:

$$w = a'_0 + a'_1 e + a'_2 e^2 \quad (1)$$

式中: $w$ 为整层大气可降水量(cm); $e$ 为地面水汽压(hPa); $a'_0$ 、 $a'_1$ 、 $a'_2$ 为经验系数。青海高原地区 $a'_2 \approx 0$ ,则 $w$ 与 $e$ 呈线性关系,式(1)变为:

$$w = a'_0 + a'_1 e \quad (2)$$

其中:

$$a'_0 = \begin{cases} 0.03 \exp(-1.39H^2 + 2.74H + 0.15) & (\text{青藏高原以外}, \varphi \geq 33^{\circ}) \\ 0.04 \exp(0.6H) - d_1 + d_2 & (\text{青藏高原以外}, \varphi < 33^{\circ}) \\ -0.02 & (\text{青藏高原范围内}) \end{cases}$$

$$a'_1 = \begin{cases} 0.07 + d_3 & (\text{青藏高原以外}, \varphi \geq 33^{\circ}) \\ (0.2 - d_3)d_4 & (\text{青藏高原以外}, \varphi < 33^{\circ}) \\ 0.185 \exp(0.11H^2 - 0.955H + 1.98) & (\text{青藏高原范围内}) \end{cases}$$

$$\text{其中: } d_1 = \frac{0.05}{(\varphi - 25)^2 + 0.25}$$

$$d_2 = \begin{cases} 0 & (\varphi > 20^{\circ}) \\ -0.9 & (\varphi \leq 20^{\circ}) \end{cases}$$

$$d_3 = \frac{0.066}{(\varphi - 33)^2 + 4.41}$$

$$d_4 = \begin{cases} 1.0 & (a'_2 = 0) \\ 1.3 & (a'_2 \neq 0) \end{cases}$$

式中: $\varphi$ 为地理纬度( $^{\circ}$ ); $H$ 为海拔(km)。

得到青海高原地区整层大气可降水量计算公式为:

$$w = -0.02 + 0.185 \exp(0.110H^2 - 0.955H + 1.980) \times e \quad (3)$$

降水云体中产生的降水量与云体中凝结的水量的比值称为降水效率或降水转化率:

$$\text{降水转化率} = \frac{\text{降水量(年或季)}}{\text{可降水量(年或季)}} \times 100\% \quad (4)$$

降水转化率表明可降水总量能够转化成降水的比率,其可以大致衡量一个地区某一段时间水汽向降水转化的效率高低。利用计算的可降水量,采用线性趋势法、Mann-Kendall检验法<sup>[15]</sup>分别进行大气可降水量时间序列的趋势、突变分析。

利用完全相关系数法<sup>[16-17]</sup>分析大气可降水量与主要气象影响因子之间的关系。其计算公式如

下:

$$|QC| = C_1 \times C_2 \quad (5)$$

式中:|QC|为完全相关系数; $C_1$ 为气候要素与可降水量的相关系数; $C_2$ 为气候要素与时间的相关系数。只有当某气候要素与可降水量相关性较强且随时间发生显著变化时,它与可降水量的完全相关系数才比较大,且 $C_1$ 、 $C_2$ 必须通过95%的信度检验。

### 3 结果与分析

#### 3.1 黄河上游河曲地区大气可降水量变化

##### 3.1.1 大气降水量的年内变化

图2给出黄河上游河曲地区可降水量的月变化。可以看出,不同县站大气可降水量均呈单峰分布,2—4月增加不明显,5月开始明显增大,7月达到最大,8月略有回落,9月急剧下降,次年1月达到最低值。黄河上游河曲地区中红原县大气可降水量最大且7月达571.2 mm;河南县大气可降水量最小,7月可降水量为506.1 mm。

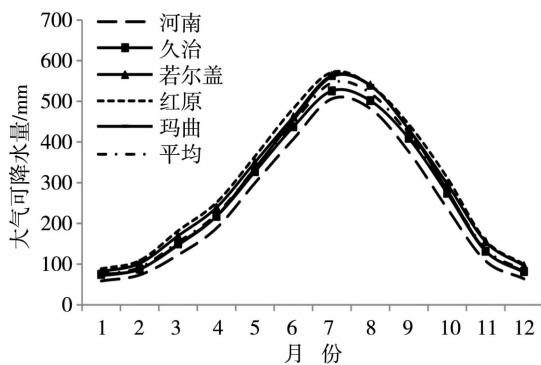


图2 黄河上游河曲地区大气可降水量的月变化  
Fig.2 The monthly change of precipitable water over Hequ region of the upper reaches of the Yellow River

表1列出黄河上游河曲地区大气可降水量的季节变化。可以看出,夏季大气可降水量最大,河南县为1 395.6 mm,久治县为1 464.9 mm,玛曲县为1 553.3 mm,若尔盖县和红原县分别为1 564.4 mm和1 593.4 mm,分别占全年大气可降水量的47.7%、45.6%、46.5%、44.9%和44.2%;冬季大气可降水量最小,在196.1~296.5 mm,占全年大气可降水量的6.7%~8.2%;秋季大气可降水量多于春季。大气环流对大气可降水量产生重要影响<sup>[1,18]</sup>,黄河上游地区地处中纬度青藏高原,其高空环流场具有显著的季节特征,冬季受西风带急流控制,水汽不足、大气可降水量少;而夏季随着印度洋季风气流入侵,副热带环流成为该地区主导环流,水汽增加、大气可降水量达到最大<sup>[14]</sup>。与青海省东部农业区和三江源地区相比,河曲的大气可降水量介于二者之间,青海省东部农业区年大气可降水量达6 239.4 mm,黄河上游河曲地区为3 314.1 mm,三江源地区为2 633.5 mm<sup>[7]</sup>。

图3为黄河上游河曲地区1981—2015年月、季平均大气可降水量。可以看出,1月是黄河上游河曲地区大气可降水量最少的月份,月平均值为74.8 mm,同时大气可降水量变化幅度最小,最大值(94.4 mm)与最小值(60.5 mm)之差仅为33.9 mm。7月是大气可降水量最多的月份,区域内平均大气可降水量为545.4 mm,同时大气可降水量变化幅度最大,最大值(610.4 mm)与最小值(458.0 mm)之差为152.4 mm。平均大气可降水量冬季最少,变化幅度最小,其最大值(283.1 mm)与最小值(208.0 mm)之差为75.1 mm;大气可降水量夏季最多,变化幅度最大,最大值(1 696.7 mm)与最小值(1 413.3 mm)之差为283.4 mm。

表1 黄河上游河曲地区大气可降水量的季节变化

Tab.1 The seasonal change of precipitable water over Hequ region of the upper reaches of the Yellow River

区域	单位:mm				年
	春季	夏季	秋季	冬季	
河南	610.7	1 395.6	721.7	196.1	2 924.1
久治	693.9	1 464.9	815.1	243.7	3 217.6
若尔盖	759.4	1 564.4	883.9	279.3	3 487.0
红原	798.3	1 593.4	914.5	296.5	3 602.7
玛曲	700.7	1 553.3	846.6	238.4	3 339.0
黄河上游河曲地区	712.6	1 514.3	836.4	250.8	3 314.1
三江源地区 <sup>[7]</sup>	517.5	1 268.0	657.9	190.1	2 633.5
青海东部农业区 <sup>[7]</sup>	1 274.8	2 950.4	1 570.5	443.7	6 239.4

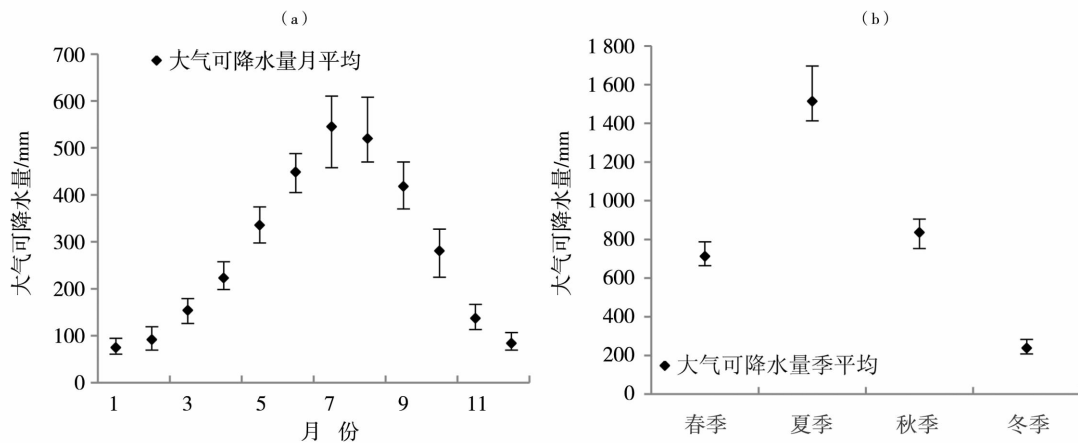


图3 黄河上游河曲地区 1981—2015 年平均大气可降水量的月(a)、季(b)变化  
 Fig. 3 The monthly (a) and seasonal (b) change of averaged precipitable water during 1981 – 2015 over Hequ region of the upper reaches of the Yellow River

3.1.2 大气可降水量的空间变化

黄河上游河曲地区各站与区域大气可降水量的气候倾向率并不完全一致。就各气象站点的年大气可降水量变化趋势(表2)而言,河南县年大气可降水量总体呈上升趋势,气候倾向率为  $36.2 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ , 通过  $\alpha = 0.1$  的显著性检验;春季大气可降水量呈下降趋势,气候倾向率为  $5.1 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ , 未通过显著性检验;夏、秋、冬季呈现上升趋势,气候倾向率分别为  $21.3$ 、 $19.2$ 、 $0.8 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ , 仅秋季通过  $\alpha = 0.1$  的显著性检验。久治县年、春、夏、秋、冬季大气可降水量均呈上升趋势,气候倾向率分别为  $42.4$ 、 $6.6$ 、 $16.1$ 、 $12.8$ 、 $6.9 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ , 其中仅年大气可降水量通过  $\alpha = 0.1$  的显著性检验。若尔盖县除冬季大气可降水量呈下降趋势外,年、春、夏、秋季的大气可降水量均呈上升趋势,气候倾向率为  $4.5 \sim 45.6 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ , 仅春季和年的大气可降水量通过  $\alpha = 0.1$  的显著性检验。红原县年、春、

夏、秋、冬季大气可降水量均呈上升趋势,气候倾向率分别为  $64.7$ 、 $20.9$ 、 $20.7$ 、 $13.2$ 、 $9.9 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ , 其中年、春、冬季通过  $\alpha = 0.1$  及以上的显著性检验。玛曲县年、春、夏、秋、冬季大气可降水量均呈上升趋势,气候倾向率分别为  $74.6$ 、 $6.7$ 、 $31.9$ 、 $24.0$ 、 $12.0 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ , 春季未通过显著性检验外,秋季通过  $\alpha = 0.1$  的显著性检验,夏、冬、年的大气可降水量趋势通过了  $\alpha = 0.05$  的显著性检验。总的来说,黄河上游河曲地区四季及年的大气可降水量都呈东南向西北的递减分布,与该地区地形、地势存在一定联系。

3.1.3 大气降水量的年际变化

图4为黄河上游河曲地区四季及年大气可降水量的变化趋势。可以看出,1981—2015年黄河上游河曲地区大气可降水量年平均为  $3315.5 \text{ mm}$ , 其间呈明显增加趋势,气候倾向率为  $54.1 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ , 通过  $\alpha = 0.05$  的显著性检验;2009年大气可降水量

表2 黄河上游河曲地区各站大气可降水量的气候倾向率和相关系数  
 Tab.2 The climatic tendency rates and correlation coefficients of precipitable water at each station over Hequ region of the upper reaches of the Yellow River

时段	气候倾向率/( $\text{mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ )					相关系数				
	河南	久治	若尔盖	红原	玛曲	河南	久治	若尔盖	红原	玛曲
春	5.1	6.6	17.3	20.9	6.7	-0.14	0.16	0.35*	0.41**	0.17
夏	21.3	16.1	19.3	20.7	31.9	0.28	0.22	0.20	0.25	0.36**
秋	19.2	12.8	13.3	13.2	24.0	0.31*	0.22	0.24	0.20	0.33*
冬	0.8	6.9	4.5	9.9	12.0	0.03	0.26	-0.07	0.31*	0.38**
年	36.2	42.4	45.6	64.7	74.6	0.32*	0.32*	0.35*	0.37**	0.45**

注: \* 和 \*\* 分别表示通过  $\alpha = 0.1$  和  $0.05$  的显著性检验。

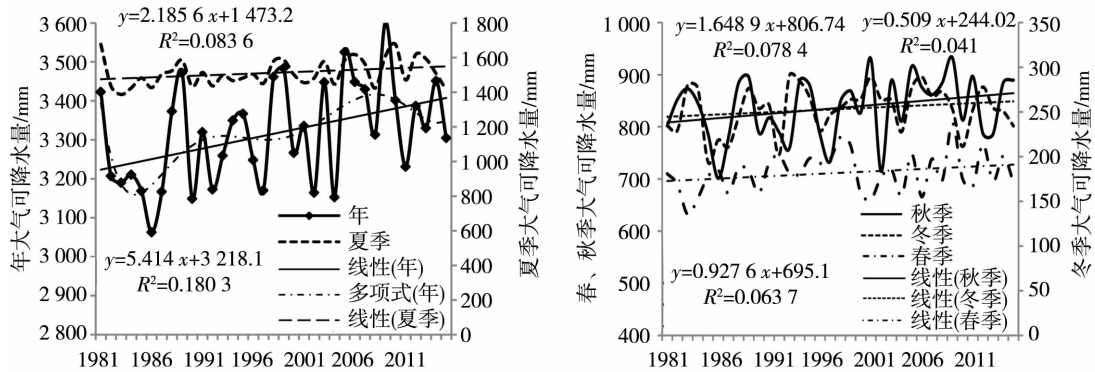


图4 1981—2015年黄河上游河曲地区年、季大气可降水量的变化趋势

Fig. 4 Variations of annual and seasonal precipitable water over Hequ region of the upper reaches of the Yellow River

最大(3 601.4 mm),1986年最小(3 062.8 mm);多项式拟合曲线反映出年大气可降水量1980年代初期减少,1980年代中期开始增加,1990年代初期又开始减少,到2000年以后逐渐增加,2007年后又出现减少,呈波动变化趋势。四季大气可降水量总体呈上升趋势,其变化倾向率和相关系数均为正值,春、夏、秋、冬季大气可降水量的气候倾向率分别为9.3、21.9、16.5、5.1 mm·(10 a)<sup>-1</sup>,但均未通过显著性检验。说明夏季对年大气可降水量的贡献最大,秋季次之,冬季最小。

### 3.2 大气可降水量的突变特征

利用 Mann-Kendall 突变检验法对黄河上游河曲地区1981—2015年的四季和年大气可降水量进行突变分析(图5),结果表明黄河上游河曲地区春、夏季和年大气可降水量存在较为明显的突变。由春季 UF 曲线可见,1980年代中期以后,黄河上游河曲地区春季大气可降水量有明显增加趋势,1990年代这种增加趋势超过0.05显著性水平临界线。根据 UF 和 UB 曲线交点的位置,确定河曲春季大气可降水量1980年代中期开始增加是一突变现象,具体从1985年开始。夏季的 UF 曲线则表明,1990年代中期以后,夏季大气可降水量呈明显增加趋势,2009年开始这种增加趋势超过0.05显著性水平临界线。根据 UF 和 UB 曲线交点的位置,确定黄河上游河曲地区夏季1990年代中期大气可降水量的增加是一突变现象,具体从1995年开始。秋季大气可降水量无明显突变现象(图略)。冬季的 UF 和 UB 曲线在1988年有一交点,UF 曲线仅在2008年超出了临界线,因此,冬季的突变还需进一步的分析检验。黄河上游河曲地区年大气可降水量在1990年代中期以后,有明显增加趋势,2008年以后这种增加趋势超

过0.05显著性水平临界线。根据 UF 和 UB 曲线交点的位置,确定黄河上游河曲地区年大气可降水量1990年代中期开始增加是一突变现象,具体从1994年开始。

### 3.3 大气可降水量与气候因子的相关分析

大气可降水量作为大气降水潜力的一个重要指标,其影响因素众多,为了准确揭示其主要影响因素,选取相对湿度、空气温度、日照时数等气象因子,采用完全相关系数方法分析影响大气可降水量的主要因子。

表3列出黄河上游河曲地区气象要素与大气可降水量及时间的相关系数和完全相关系数。可以看出,黄河上游河曲地区全年及四季的大气可降水量与气温、相对湿度呈正相关,其中除年平均气温、年相对湿度和冬季平均气温外,均为显著正相关;与日照时数呈显著负相关。说明气温高、相对湿度大、日照时数少则大气可降水量大。全年及四季气温与时间的相关系数为正,且通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,说明气温随时间变化呈显著上升趋势。年、春、夏和秋季相对湿度与时间的相关系数为负,且通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,说明相对湿度随时间变化呈显著下降趋势。日照时数除冬季外,其他均随时间呈增加趋势。春、夏和秋季大气可降水量与气温的完全相关系数最大,其次为相对湿度,说明气温是影响黄河上游河曲地区大气可降水量变化的最主要气候因子,其次为相对湿度。关于大气可降水量与温度的相关性,许多研究结果表明温度和在水汽含量存在一种正反馈效应,温度升高使得蒸发量增大,就会有更多的水汽进入到大气中,致使大气可降水量增加<sup>[1,4,19]</sup>。

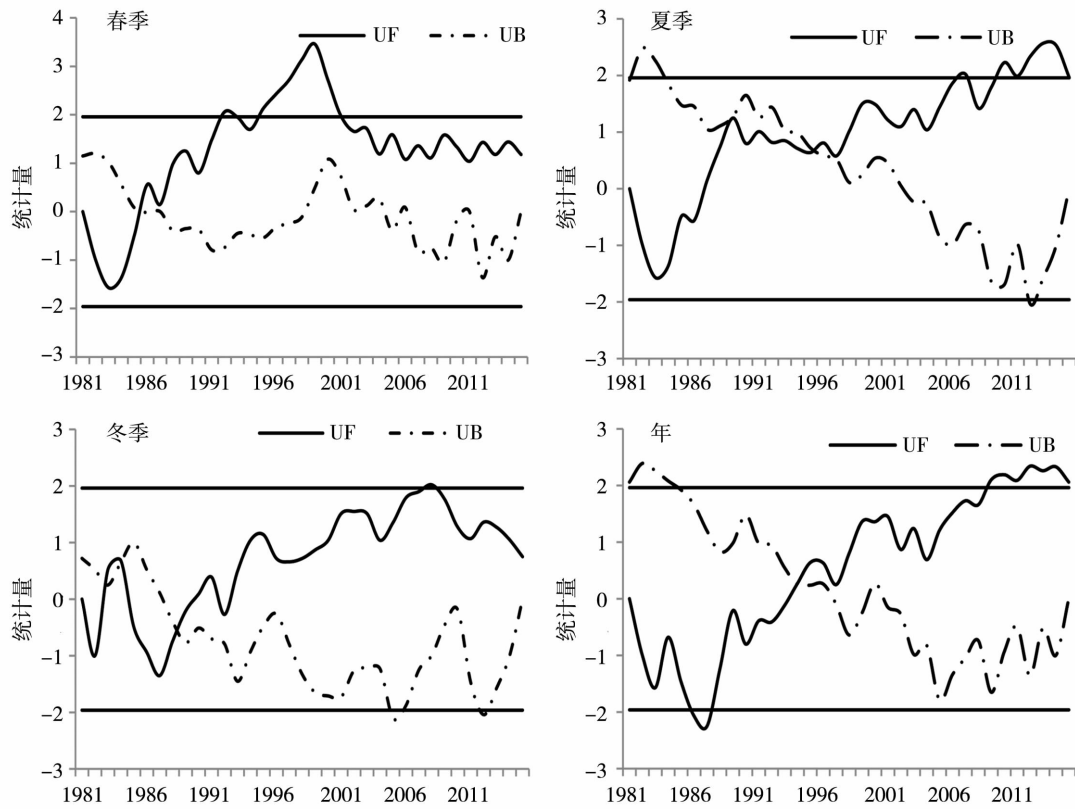


图5 黄河上游河曲地区季、年大气可降水量的 M-K 突变检验  
(直线为  $\alpha=0.05$  显著性水平临界值)

Fig.5 M-K mutation test of seasonal and annual precipitable water over Hequ region of the upper reaches of the Yellow River  
(The straight line is the critical level of 0.05)

表3 黄河上游河曲地区气象要素与大气可降水量及时间的相关系数和完全相关系数  
Tab.3 The correlation coefficients and full correlation coefficients between climate factors and precipitable water, time over Hequ region of the upper reaches of the Yellow River

	气象因子	春季	夏季	秋季	冬季	年
与大气可降水量相关系数	气温	0.49 **	0.84 **	0.78 **	0.17	0.24
	相对湿度	0.46 **	0.31 *	0.59 **	0.73 **	0.24
	日照时数	-0.41 **	-0.40 *	-0.44 *	-0.60 **	-0.46 **
与时间相关系数	气温	0.73 **	0.63 **	0.66 **	0.60 **	0.48 **
	相对湿度	-0.49 **	-0.59 **	-0.39 *	-0.21	-0.53 **
	日照时数	-0.10	0.01	0.22	-0.10	0.09
完全相关系数	气温	0.36	0.52	0.52	-	-
	相对湿度	0.23	0.18	0.23	-	-
	日照时数	-	-	-	-	-

注：\* 和 \*\* 分别表示通过  $\alpha=0.05$  和 0.01 的显著性检验；- 表示完全相关系数没有通过显著性检验。

### 3.4 黄河上游河曲地区降水转化率变化

降水转化率与水资源开发有直接关系,目前空中水资源开发主要手段是人工增雨。图6 给出黄河上游河曲地区降水转化率的月变化,可以看出,该地

区降水转化率呈双峰分布,第一峰值出现在5、6月,第二峰值出现在9月,且第一峰值明显高于第二峰值。降水转化率最大的是久治县,最大值出现在6月,达31.6%;最小的是玛曲县,6月最大降水转化

率为22.8%。河曲地区平均降水转化率最大值出现在6月,达25.7%,9月平均降水转化率为24.4%。

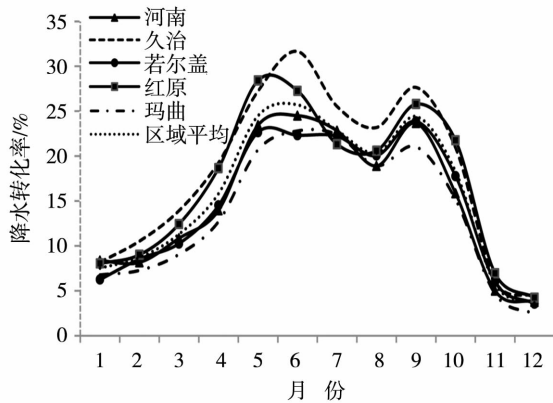


图6 黄河上游河曲地区降水转化率的月变化  
Fig. 6 Monthly variations of precipitation conversion efficiencies in Hequ region of the upper reaches of the Yellow River

表4 列出黄河上游河曲地区降水转化率的季节变化、气候倾向率和相关系数。区域内各县站降水

转化率均在夏季达到最大,冬季降水转化率最低。其中,久治县夏季降水转化率最大,为26.5%;玛曲县冬季降水转化率最低,仅为5.4%。这说明实际降水量占空中水汽总量的比例很小,空中水资源开发潜力巨大。因此通过人工影响天气可以提高自然降水效率,从而增加地面降水。

从黄河上游河曲地区降水转化率相关系数和气候倾向率可以看出,就全年来看,黄河上游河曲地区降水转化率均呈现减小趋势,其中年降水转化率通过 $\alpha = 0.1$ 的显著性检验,河南、久治、若尔盖、红原、玛曲的气候倾向率分别为 $0.50$ 、 $0.69$ 、 $0.43$ 、 $0.70$ 、 $0.51\% \cdot (10\text{ a})^{-1}$ ;春季河南、玛曲降水转化率呈减小趋势,其他三站呈上升趋势,其中仅红原通过显著性检验;夏季黄河上游河曲地区降水转化率整体呈减小趋势,且未通过显著性检验;秋季除河南县外,其他地区的降水转化率呈现显著下降趋势,其中仅久治、红原通过显著性检验;冬季黄河上游河曲地区降水转化率仅红原呈现减小趋势,但整体变化趋势不明显。

表4 黄河上游河曲地区降水转化率的季节变化趋势  
Tab. 4 Seasonal variations of precipitation conversion efficiencies in Hequ region of the upper reaches of the Yellow River

区域		春季	夏季	秋季	冬季	年
河南	降水转化率/%	18.0	22.0	18.1	6.7	19.2
	气候倾向率/(% · (10 a) <sup>-1</sup> )	0.40	1.15	0.42	0.24	0.50
	相关系数	-0.12	-0.25	0.09	0.08	-0.17
久治	降水转化率/%	21.8	26.5	21.8	7.5	22.9
	气候倾向率/(% · (10 a) <sup>-1</sup> )	0.31	0.88	1.47	0.43	0.69
	相关系数	0.09	-0.24	-0.31*	0.18	-0.27
若尔盖	降水转化率/%	17.4	21.6	18.6	6.0	18.6
	气候倾向率/(% · (10 a) <sup>-1</sup> )	0.33	0.73	1.17	0.45	0.43
	相关系数	0.09	-0.16	-0.27	0.19	-0.17
红原	降水转化率/%	21.7	22.9	21.1	7.1	20.9
	气候倾向率/(% · (10 a) <sup>-1</sup> )	1.11	1.07	1.73	0.17	0.70
	相关系数	0.32*	-0.25	-0.36**	-0.09	-0.25
玛曲	降水转化率/%	15.7	21.3	16.4	5.4	17.8
	气候倾向率/(% · (10 a) <sup>-1</sup> )	0.45	0.49	0.79	0.18	0.51
	相关系数	-0.15	-0.14	-0.21	0.08	-0.25
区域平均	降水转化率/%	19.0	22.8	19.3	6.5	19.9
	气候倾向率/(% · (10 a) <sup>-1</sup> )	0.23	0.87	0.12	0.26	0.58
	相关系数	0.10	-0.30	-0.27	0.13	-0.31*

注: \* 和 \*\* 分别表示通过  $\alpha = 0.1$  和  $0.05$  的显著性检验。

### 3.5 降水量、大气可降水量、降水转化率间的关系

图 7 给出黄河上游河曲地区降水、大气可降水、降水转化率间的相互关系。可以看出,从年内变化看,降水和大气可降水量呈现单峰分布,7 月达到最大值;降水转化率呈现双峰分布,第一高峰出现在 6 月,第二高峰出现在 9 月。年大气可降水量与年降水量呈现显著正相关,相关系数为 0.40 (通过  $\alpha = 0.05$  的显著性检验),但大气可降水量与实际降水量出现极值的时间并不完全对应,这表明大气可降水量在一定程度上可作为降水量预报的一个指标,但是实际降水的产生是很复杂的过程,还受到大

气中很多其他因素的影响。年大气可降水量与年降水转化率关系不明显,二者间基本不存在相关性。年降水转化率与年降水量呈极显著正相关,相关系数为 0.93 (通过  $\alpha = 0.001$  的显著性检验),年降水转化率与年降水量的变化趋势一致。总的来说,近 35 a 黄河上游河曲地区大气可降水量呈增加趋势,降水量与降水转化率呈现减少趋势。在全球变暖背景下,黄河上游河曲地区气候也趋于向“暖干化”发展<sup>[20-21]</sup>,温度升高,蒸发量加大,进入大气中的水汽含量增加,大气可降水量就增加,但实际降水量趋于减少,降水转化率就降低。

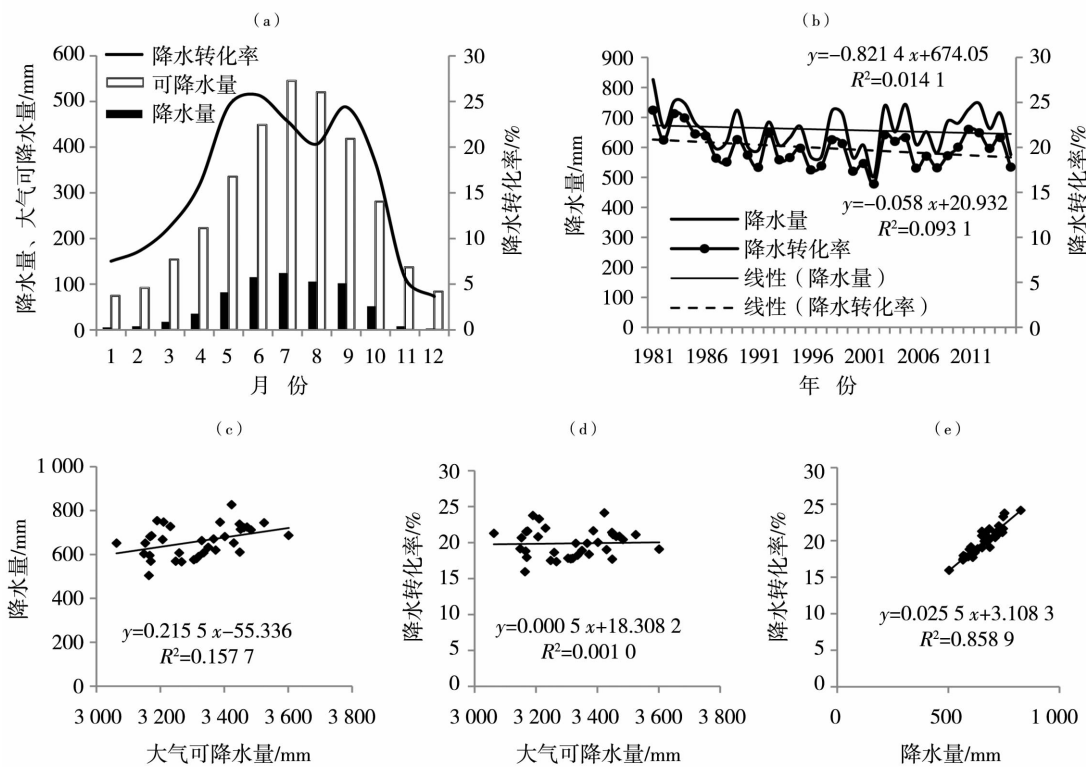


图 7 降水量、大气可降水量、降水转化率间相互关系

Fig. 7 Relation analysis of precipitation, precipitable water and precipitation conversion efficiency in Hequ region of the upper reaches of the Yellow River

## 4 结论与讨论

(1) 黄河上游河曲地区大气可降水量的峰值出现在夏季,为 1 514.3 mm,其余各季大气可降水量由大到小依次为秋季、春季和冬季。按照月分布而言,大气可降水量峰值出现在 7 月,为 545.4 mm,最低值出现在 1 月,仅为 74.8 mm。黄河上游河曲地区各站夏季大气可降水量最大为 1 395.6 ~ 1 593.4 mm,7 月大气可降水量为 506.1 ~ 571.2 mm;黄河上游河曲地区大气可降水量由西北至东南增加,即红原县最高而河南县最低。

(2) 1981—2015 年黄河上游河曲地区的年大气可降水量呈明显增加趋势,增加主要出现在 1980 年代中后期和 2000 年代前中期。季大气可降水量呈微弱增加趋势,但均未通过  $\alpha = 0.05$  的显著性检验。根据突变检验,黄河上游河曲地区春、夏季和年大气可降水量发生突变,突变时间分别为 1985 年、1995 年和 1996 年。

(3) 黄河上游河曲地区的季、年大气可降水量与气温、相对湿度呈正相关,与日照时数呈负相关;春、夏和秋季大气可降水量与气温的完全相关系数最大,其次为相对湿度。



(4)大气可降水量反映大气中水分含量的多寡,而降水转化率代表大气水分形成降水的效率,二者均与降水量有较强的相关性,但二者之间却无明显关联。近35 a来,黄河上游河曲地区大气可降水量呈现增加趋势,而降水量与降水转化率呈现减少趋势。这说明大气可降水量在一定程度上可以反映降水趋势,但实际降水是一个复杂的过程,受到诸多不确定因素影响。

#### 参考文献:

- [1] 姚宜斌,雷祥旭,张良,等. 青藏高原地区1979—2014年大气可降水量和地表温度时空变化特征分析[J]. 科学通报,2016,61(13):1462-1477.
- [2] 吴萍,吴裴裴,余忠水,等. 拉萨夏季大气降水量的演变特征及其与降水的关系[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版),2015,7(4):359-367.
- [3] 王维佳,陈碧辉. 四川上空大气可降水量时空分布特征[J]. 高原山地气象研究,2010,30(3):52-57.
- [4] 张娟,肖宏斌,徐维新,等. 1971—2010年柴达木盆地可降水量变化特征及其与气象条件分析[J]. 资源科学,2013,35(11):2289-2297.
- [5] 林丹,王维佳,李慧晶,等. 西南地区可降水量时空分布和变化特征[J]. 气象科技,2013,41(5):889-891.
- [6] 杨红梅,葛润生,徐宝祥. 用单站探空资料分析对流层气柱水汽总量[J]. 气象,1998,24(9):8-11.
- [7] 校瑞香,祁栋林,周万福,等. 1971—2010年青海高原不同功能区降水量的变化特征[J]. 冰川冻土,2014,36(6):1456-1464.
- [8] 李霞,张广兴. 天山可降水量和降水转化率的研究[J]. 中国沙漠,2003,23(5):509-512.
- [9] 杨景梅,邱金桓. 用地面湿度参量计算我国整层大气可降水量

- 及有效水汽含量方法的研究[J]. 大气科学,2002,26(1):9-22.
- [10] 王宏,雷恒池,德力格尔,等. 黄河上游河曲地区对流云催化增雨的数值模拟研究[J]. 气候与环境研究,2004,9(4):619-630.
- [11] 赵仕雄,德力格尔,涂多彬. 黄河上游降水云层对流特性及降水微结构机制研究[J]. 高原气象,2003,22(4):385-392.
- [12] 王宏,雷恒池,德力格尔,等. 黄河上游地区强对流云特征的模拟分析[J]. 气候与环境研究,2002,7(4):397-408.
- [13] 王黎俊,孙安平,靳少波. 黄河上游河曲地区人工增雨的基本条件和催化作业对策[J]. 西北水力发电,2007,23(2):67-70.
- [14] 德力格尔,陈万奎,李仓格. 黄河上游地区人工增雨试验与研究[M]. 北京:气象出版社,2012:1-8.
- [15] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 第2版. 北京:气象出版社,2007:36-69.
- [16] 韩军彩,张秉祥,高祺,等. 石家庄市蒸发皿蒸发量的变化特征及其影响因子分析[J]. 干旱气象,2009,27(4):340-345.
- [17] 祁栋林,肖宏斌,李晓东,等. 1964—2013年青海省不同生态功能区蒸发皿蒸发量的变化特征[J]. 干旱气象,2016,34(2):234-242.
- [18] 刘春蓁. 气候变化对陆地水循环影响研究的问题[J]. 地球科学进展,2004,19(1):115-119.
- [19] ZHANG T. Perspectives on environmental study of response to climatic and land cover/land use change over the Qinghai-Tibetan Plateau: An introduction [J]. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2007,39(4):631-634.
- [20] 马雪宁,张明军,黄小燕,等. 黄河上游流域近49 a气候变化特征和未来变化趋势分析[J]. 干旱区资源与环境,2012,26(6):17-23.
- [21] 万玮,肖鹏峰,冯学智,等. 卫星遥感监测近30年来青藏高原湖泊变化[J]. 科学通报,2014,8(8):701-714.

## Variation Characteristics of Precipitable Water over Hequ Region of the Upper Reaches of the Yellow River During 1981-2015

KANG Xiaoyan<sup>1,2</sup>, MA Xueqian<sup>1,2</sup>, HAN Huibang<sup>1,2</sup>, ZHANG Boyue<sup>1,2</sup>, WANG Lijun<sup>1,2</sup>

(1. Weather Modification Office of Qinghai Province, Xining 810001, China;  
2. Key Laboratory of Disaster Preventing and Reducing of Qinghai Province, Xining 810001, China)

**Abstract:** The monthly data of water vapor pressure and precipitation from 1981 to 2015 over Hequ region of the upper reaches of the Yellow River were used to calculate precipitable water (PW), precipitation conversion efficiency (PCE) by using an empirical formula of total atmospheric PW, and the change trend of precipitable water over there was analyzed. The results show that the PW over Hequ region of the upper reaches of the Yellow River presented a unimodal distribution, while the PCE presented a bimodal distribution. The PW over Hequ region of the upper reaches of the Yellow River increased significantly in recent 35 years, and the average of it was 3 309.5 mm, but precipitation and PCE there showed the opposite trend. According to the mutation test, the PW of spring, summer and annual mutated over Hequ region of the upper reaches of the Yellow River. The temperature was the main climatic factor affecting the variation of PW over Hequ region of the upper Yellow River, followed by relative humidity.

**Key words:** precipitable water; precipitation conversion efficiency; climate mutation; Hequ region of the upper reaches of the Yellow River