

东北地区可利用降水资源的初步分析

安刚 孙力 廉毅

吉林省气象科学研究所, 长春 130062

摘要 利用1961~2002年东北地区80个测站的月降水量和月平均气温资料, 采用陆面蒸发经验模型计算得到各测站的月蒸发量, 再根据水量平衡关系, 得到可利用降水量, 以此分析了东北地区大气降水资源的空间分布特征及其变化趋势。结果表明: 东北地区可利用降水资源为东多西少分布, 东西部区域降水资源差异显著, 西部地区可利用降水资源严重匮乏; 全区可利用降水资源呈下降趋势, 西部半干旱地区在已有水资源严重不足的情况下, 可利用降水量仍呈下降趋势, 在东部山区其下降趋势最为明显, 这将对整个东北地区水资源的开发利用产生不利影响。

关键词 可利用降水量 空间分布 变化趋势

文章编号 1006-9585 (2005) 01-0132-08 **中图分类号** P426 **文献标识码** A

A Primary Analysis of Utilizable Precipitation in Northeast China

AN Gang, SUN-Li, and LIAN-Yi

Institute of Meteorological Sciences of Jilin Province, Changchun 130062

Abstract Using data set of monthly precipitation and temperature from 1961 to 2002 at 80 stations in Northeast China, the utilizable precipitation were calculated based on Takahashi's evaporation equation and the relationship of water balance. The spatial distribution and change tendency of the utilizable precipitation were studied. The results show that there are high values of utilizable precipitation in the eastern region and the low values in the western. The change tendency has been downing in the whole period.

Key words utilizable precipitation, spatial distribution, change tendency

1 引言

东北地区地处中高纬度及欧亚大陆东端, 属温带大陆性季风气候区, 在作物生长期雨热同季, 有利于农业及种植业的生产和发展。但由于当地水资源主要靠大气降水补给, 受天气气候变化的影响极大, 特别是1999、2000和2001年连续3年的大范围持续性干旱, 给国民经济发展和生态环境造成了严重影响。随着社会和经济的发展, 水资源供需矛盾将日益突出, 水资源的匮乏

不但影响着当地工农业的发展, 而且因干旱化导致的荒漠化(沙漠化、盐渍化及草场退化)不断加剧, 生态环境问题已日益受到关注。在文献[1]中通过对东北地区西部进行实地考察和调研, 分析得到降水量减少是该地区干旱化的一种表现, 导致生态环境恶化。另有一些研究表明^[2~4], 20世纪90年代以来, 由于气温上升和降水量减少, 东北地区(特别是西部)暖干气候趋势明显, 地表干旱化特征发展。在文献[5]中, 分析了气候变化同东北地区水资源各分量之间的关系, 并建立了水资源各分量与气温和降水

收稿日期 2003-08-15 收到, 2004-11-12 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 G1999043400 和科技部社会公益研究专项资金

作者简介 安刚, 男, 1966年出生, 学士, 高级工程师, 主要从事天气气候的研究。

E-mail: tqqs@jlqxs.org.cn 或 angang8888@sina.com

的线性统计评估模型, 为研究东北地区水资源的变化奠定了基础。

可利用降水量是大气降水资源各分量中(降水量、蒸发量和可利用降水量)可被人们实际利用的降水资源。文献[6, 7]对华北地区水资源各分量的多时间尺度及时空变化特征进行了分析, 得到了许多有价值的结果。本文对东北地区可利用降水资源的空间分布和变化趋势做了初步分析, 并探讨了东北地区全区域、西部半干旱区及东部山区的差异。

2 资料和方法

文中所采用的资料为 1961~2002 年东北地区(包括黑龙江省、吉林省、辽宁省和内蒙古东四盟)均匀分布的 80 个测站月降水量和月平均气温, 根据高桥浩一郎^[8]的陆面蒸发经验模型计算得到各测站的月蒸发量:

$$E = \frac{3100P}{3100 + 1.8P^2 \exp\left(-\frac{34.4T}{235 + T}\right)}, \quad (1)$$

式中, E 为月蒸发量, P 和 T 分别为月降水量和月平均气温; E 和 P 的单位是 mm, T 的单位是 $^{\circ}\text{C}$ 。根据水量平衡关系:

$$H = P - E, \quad (2)$$

式中, H 为月可利用降水量, P 为月降水量, E 为月蒸发量, 单位均为 mm。(2) 式表示用月降水量减去月蒸发量, 即可得到可利用降水量。

在文献[6, 7]中, 基于此方法计算出华北地区水资源分量中的蒸发量, 得到了许多有价值的结果。文献[7]还讨论了由高桥公式计算地面蒸发量的可用性, 通过与地表热量平衡方法、水汽收支法等方法的对比分析表明, 此方法不但计算简便, 所得到的结果无论在定性和定量方面都有参考价值。由此方法计算得到的可利用降水系数与由水文实际观测推算的结果很接近, 以北京地区为例, 若考虑因利用地下水引起的蒸发订正, 其结果与实际更为相符。东北地区与华北地区地理位置接近, 除冬季月平均气温低于华北地区外, 其他季节的月降水量和月平均气温变化, 基本在华北地区的变化范围之内, 因此本文也采用这一方法计算东北地区的蒸发量。

文中计算得到了东北地区春季(3~5月)和夏季(6~8月)可利用降水资源的区域气候分布特征, 并选取泰来、白城、乾安、前郭、通榆、长岭、双辽、开鲁、通辽、乌丹和赤峰 11 个测站代表西部半干旱区域, 选取蛟河、敦化、松江、通化、临江、长白、清源、桓仁、宽甸和丹东 11 个测站代表较湿润的东部山区, 分析了东北地区全区、西部和东部区域 42 年间全年降水资源的变化趋势。

3 东北地区降水资源的分布特征

图 1 为东北地区春、夏季降水资源气候分布, 从图 1a、b 中可以看到, 东北地区春、夏季降水主要呈经向分布, 东部多西部少, 大值区域位于东部山区, 而小值区域在西部半干旱地区。春季东部山区的降水量是西部地区降水量的 2 倍以上, 夏季东部山区的降水量也比西部地区多将近 1 倍左右。再由图 1c、d 中看出, 东北地区春、夏季蒸发量的分布形式虽然与降水量的分布基本一致, 也是东多西少, 但在量值上的差异却较小, 春季蒸发量东部山区只比西部多 1 倍左右, 而夏季两者之间的差异已经不大。

图 1e、f 是用降水量减去蒸发量得到的东北地区春、夏季可利用降水量, 可以看到其量值在东、西部地区的差异进一步扩大。在春季东部山区有些测站的可利用降水量可达 50 mm 以上, 而西部测站的可利用降水量均不到 10 mm; 在夏季其差异也很明显, 东部山区所有测站的可利用降水量均在 200 mm 以上, 有的已超过了 400 mm, 而在西部多数测站可利用降水量还不到 100 mm。计算了各测站春、夏季蒸发量与降水量的比值(E/P , 文中称之为蒸发率), 结果由图 1g、h 给出。可以看到, 尽管春、夏季西部地区的蒸发量小于东部山区, 但因为降水量的明显差异, 西部地区的蒸发率却大于东部山区。在春季, 西部地区的蒸发率高达 80% 以上, 东部山区的蒸发率为 60% 左右; 夏季的蒸发率均有所下降, 但西部地区的蒸发率仍在 70% 附近, 而东部山区的蒸发率已到 50% 以下。为了进一步比较东北地区可利用降水量在降水量中所占的比重, 又计算了各测站春、夏季可利用降水量与降水量的比值(H/P ,

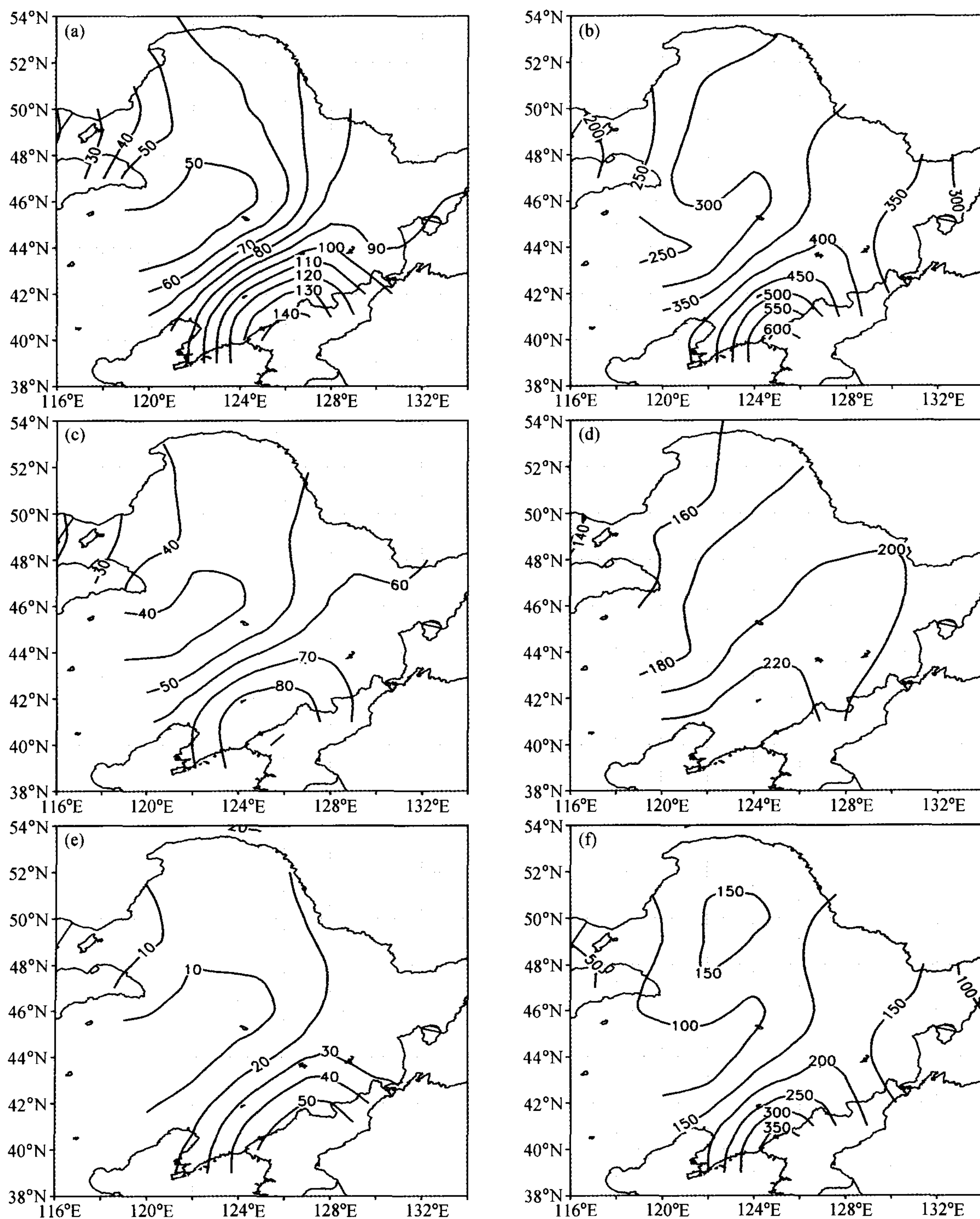


图1 东北地区春、夏季降水资源气候分布。(a)、(b)为春、夏季降水量(单位:mm);(c)、(d)为春、夏季蒸发量(单位:mm);(e)、(f)为春、夏季可利用降水量(单位:mm);(g)、(h)为春、夏季蒸发率(单位:%);(i)、(j)为春、夏季可利用降水率(单位:%)

Fig. 1 Average distribution of precipitation resource components in spring and summer in Northeast China. (a), (b) precipitation in spring and summer (mm); (c), (d) evaporation in spring and summer (mm); (e), (f) utilizable precipitation in spring and summer (mm); (g), (h) evaporation rate in spring and summer (%); (i), (j) utilizable precipitation rate in spring and summer (%)

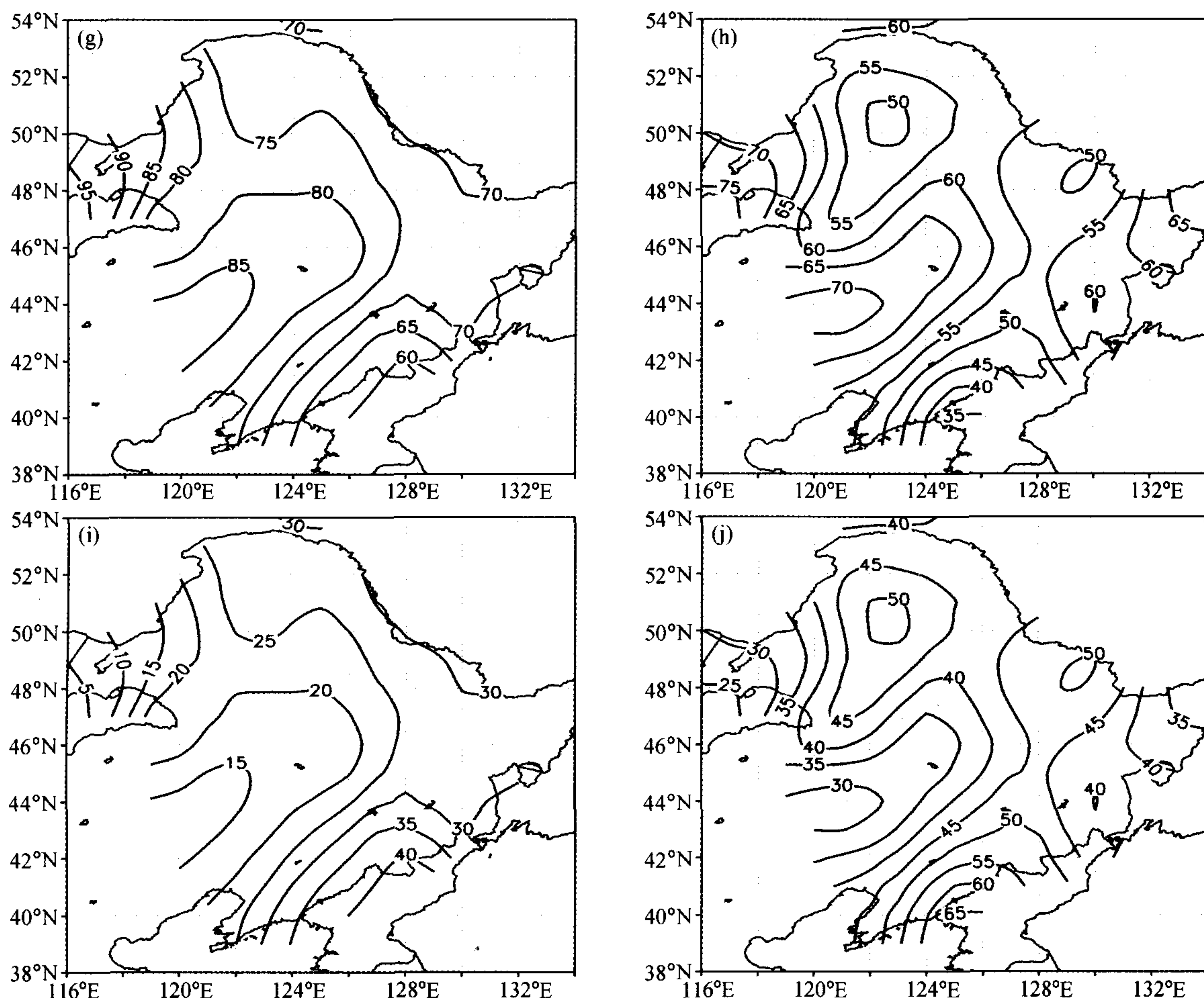


图 1 (续)

文中称之为可利用降水率), 结果由图 1i、j 给出。从中可以看到, 春季东部山区其比值在 30%~40%之间, 而西部地区只有 15%左右; 夏季东部山区基本在 50%以上, 而西部地区只能到 30%左右。其他季节及全年的降水资源分布状况与春、夏季基本一致 (图略)。

表 1 给出了东北地区全区域、东部山区及西部地区春、夏季和全年降水量、蒸发量、可利用降水量和可利用降水率 42 年的平均值。由表 1 可以看出, 在春季, 东北地区的可利用降水量为 20.8 mm, 可利用降水率为 26.2%; 东部山区可利用降水量也只有 47.3 mm, 仅占全季节降水量的 37.0%; 西部地区的可利用降水量仅仅为 8.2 mm, 可利用降水率只有 16.0%。在夏季, 东北地区的可利用降水量为 161.3 mm, 可利用降水率为 44.4%; 东部山区可利用降水量为 280.5 mm, 占全夏季降水量的 56.4%; 西部地区的可利用降

水量为 88.1 mm, 可利用降水率只有 31.4%。东北地区春季大部分降水因蒸发返回大气, 可利用降水率很低, 可利用降水量只占春季降水量的 1/4 左右; 东部山区可利用降水率高于全区, 超过春季降水量的 1/3; 而西部地区可利用降水量还不到春季降水量的 1/5。夏季全区的可利用降水率较春季有大幅度提高, 整个东北地区已接近 1/2, 东部山区超过了 1/2, 但西部地区尚不到 1/3。由此可见, 东北地区春季可利用降水资源严重不足, 绝大部分区域都面临着春旱问题。其中西部地区尤为严重, 降水少、高蒸发导致了可利用降水率极低, 又因为夏季该区域的可利用降水量也很低, 只有全区域的一半左右, 春夏连旱的年景经常发生。

从全年来看, 东北地区多年平均可利用降水率接近 40%, 可利用降水量刚刚超过 200 mm; 东部山区可利用降水量占总降水量的一半, 近 400

mm; 而西部地区的年降水量还不足 400 mm, 可利用降水率更低, 不到总降水量的 1/3, 可利用降水量仅为 100 mm 左右。西部地区的降水资源与可利用降水量远低于全区的平均值, 具有典型的半干旱地区的气候特征, 水资源的严重缺乏是影响当地生态环境的重要原因之一。

4 东北地区降水资源的时间变化

图 2 为东北地区、东部山区及西部地区 1961~2002 年全年降水资源各分量的时间变化。由图 2a 可以看到, 42 年间年降水量总的趋势均为下降

趋势; 图 2b 显示为年蒸发量都呈上升趋势; 从图 2c 和图 2d 可见, 年可利用降水量和可利用降水率总的趋势也为下降趋势。在表 2 中给出了东北全区、东部山区及西部地区年降水量、年蒸发量、年可利用降水量和可利用降水率的线性拟合斜率及趋势相关系数。可以看到由于东北地区年降水量减少, 年蒸发量增加而导致年可利用降水量和可利用降水率下降, 其中年可利用降水率趋势相关系数为-0.29, 超过了 0.10 信度检验 ($\alpha_{0.10} = 0.2573$), 表明东北地区年可利用降水率下降趋势显著。东部山区年降水量和年蒸发量的变化趋势最为明显, 线性拟合斜率分别为-2.04和0.29

表 1 东北地区和东、西部区域春、夏季及全年降水资源各分量多年平均值

Table 1 Average precipitation resource components in east, west and total areas in Northeast China

mm

		春季 Spring				夏季 Summer				全年 Annual			
		P	E	H	H/P	P	E	H	H/P	P	E	H	H/P
全 区	Total area	79.3	58.5	20.8	26.2%	363.4	202.1	161.3	44.4%	552.4	333.9	218.5	39.6%
东部山区	East area	127.9	80.6	47.3	37.0%	497.1	216.6	280.5	56.4%	790.7	395.3	395.4	50.0%
西部地区	West area	51.2	43.0	8.2	16.0%	280.8	192.7	88.1	31.4%	392.4	285.6	106.8	27.2%

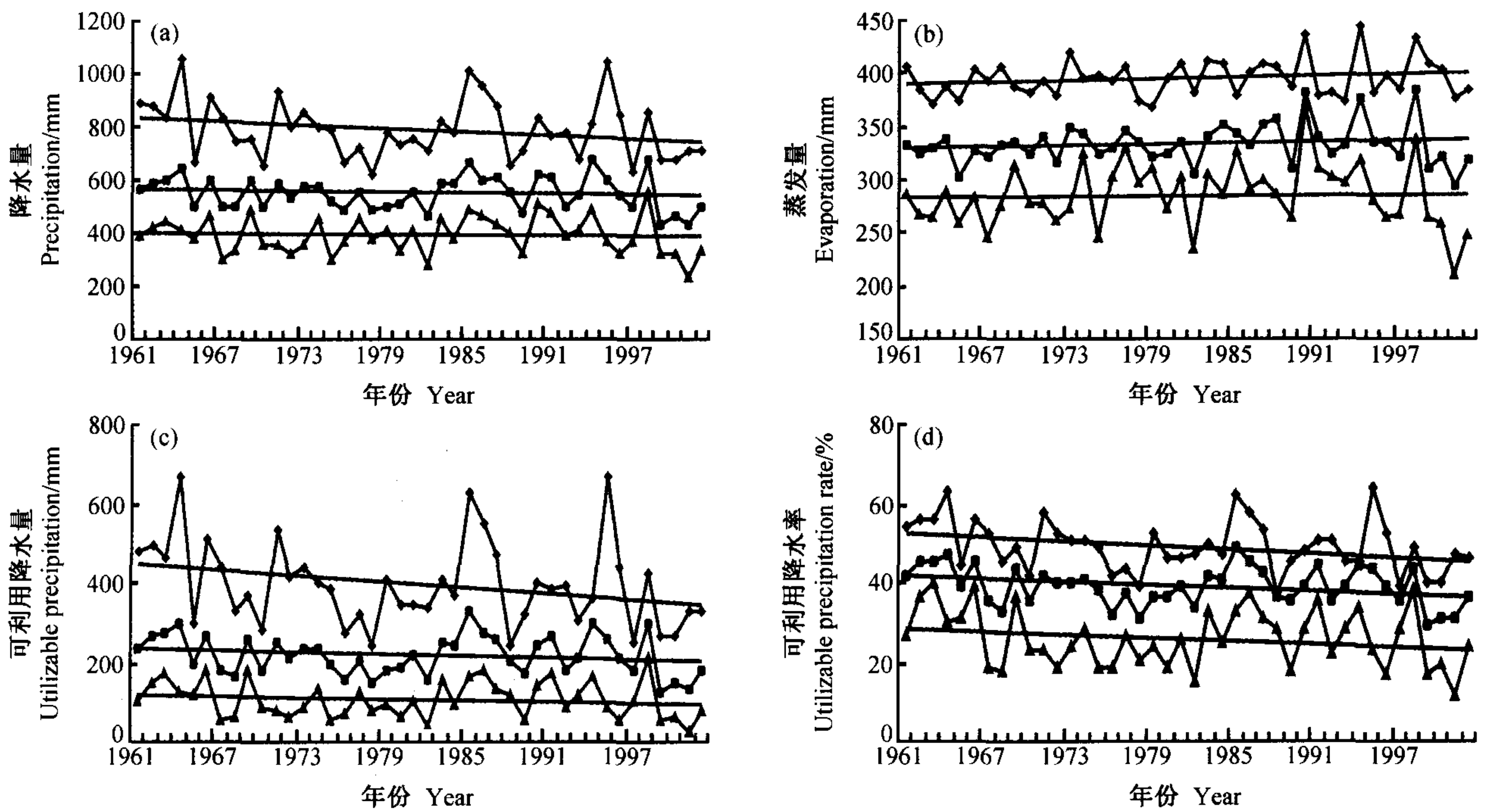


图 2 东北地区 1961~2002 年全年降水资源各分量时间变化。降水量; (b) 蒸发量; (c) 可利用降水量; (d) 可利用降水率。●东北地区; ◆东部山区; ▲西部地区

Fig. 2 Annual variations of precipitation resource components from 1960 to 2002 in Northeast China. (a) precipitation, (b) evaporation, (c) utilizable precipitation, (d) utilizable precipitation rate. ● Northeast China, ◆ east area of Northeast China, ▲ west area of Northeast China

mm · a⁻¹，因而年可利用降水量和可利用降水率的下降趋势显著，其趋势的相关系数分别为-0.27和-0.32，分别超过了0.10和0.05信度检验（α_{0.05} = 0.3044）。西部地区年降水量的下降趋势和年蒸发量的上升趋势虽然较小，但将导致原已短缺的水资源继续减少，使其半干旱性气候特征进一步加强。

从以上的结果可见，东北地区全区域年降水量、可利用降水量和可利用降水率都呈下降趋势，蒸发量呈上升趋势，其中年可利用降水率下降趋势较为显著，可利用降水资源供给形势不容乐观。西部地区为半干旱性气候区域，水资源已严重不足，虽下降趋势较其他区域小，但供需矛盾将愈加严峻。值得注意的是，东部山区为东北地区降水最为充沛的区域，是全区主要江河的发源地，但其降水量下降趋势和蒸发量上升趋势是东北地区最大的区域，年可利用降水量及可利用降水率的下降趋势也最显著，其影响已不限于当地，而对全东北地区水资源供给的影响更加深远。

由表3看出，东北地区降水资源的年代际变化为，20世纪60年代和80年代处于降水相对多的阶段，可利用降水量及可利用降水率也相对较高；70年代为少雨时段，可利用降水量及可利用

降水率也相应较低；90年代以来又进入少雨时段，平均可利用降水量明显降低。在降水量较多的年份，如1985年全区降水量为670 mm，可利用降水量为326 mm，可利用降水率高达48.7%；1995年东部山区降水量为1050 mm，可利用降水量为670 mm，可利用降水率高达63.8%；1998年西部降水量为552 mm，可利用降水量为212 mm，可利用降水率高达38.4%。在降水量较少的年份，如2001年全区降水量为431 mm，可利用降水量为136 mm，可利用降水率仅有31.6%；1978年东部山区降水量为619 mm，可利用降水量为245 mm，可利用降水率仅有39.6%；2001年西部降水量为237 mm，可利用降水量为27 mm，可利用降水率只有11.4%。在西部地区可利用降水率较高的年份仍不如东部山区可利用降水率较低的年份，可见东北地区西部与东部山区的气候差别。从年代际变化看，东北地区降水资源具有一定的气候阶段性变化，在多雨期可利用降水率也略高，而少雨期可利用降水率也较低，两者相差东北全区和东部山区可达4%左右；而西部地区高达8%以上。由此可见，西部地区可利用降水资源不但缺乏，且变率较大，在水资源的开发与利用上面临的问题较多。

表 2 东北地区全年降水资源各分量 42 年线性拟合斜率及趋势相关系数

Table 2 Linear fitting slopes and trend correlation coefficients of annual precipitation resource components in 42 years in Northeast China

	东北地区 Total area				东部山区 East area				西部地区 West area			
	P	E	H	H/P	P	E	H	H/P	P	E	H	H/P
线性拟合斜率/ mm · a ⁻¹ Linear fitting slopes	-0.65	0.16	-0.81	-0.11	-2.04	0.29	-2.33	-0.17	-0.40	0.09	-0.49	-0.13
趋势相关系数 Trend correlation coefficients	-0.13	0.10	-0.20	-0.29	-0.23	0.20	-0.27	-0.32	-0.07	0.04	-0.13	-0.21

表 3 东北地区全年降水资源各分量年代际平均值

Table 3 Decade average annual precipitation resource components in Northeast China

mm

	东北地区 Total area				东部山区 East area				西部地区 West area			
	P	E	H	H/P	P	E	H	H/P	P	E	H	H/P
1960~1969	560.0	327.3	232.7	41.6%	823.3	389.4	433.9	52.7%	400.2	276.4	123.8	30.9%
1970~1979	534.9	333.9	201.0	37.6%	768.6	391.8	376.8	49.0%	374.2	289.3	84.9	22.7%
1980~1989	575.5	341.3	234.2	40.7%	810.6	403.2	407.4	50.3%	415.1	297.0	118.1	28.5%
1990~2002	541.5	333.1	208.4	38.5%	765.2	396.5	368.7	48.2%	382.2	280.6	101.6	26.6%

5 东北地区气温、降水与水资源分量的关系

为了分析东北地区气温、降水与蒸发量、可利用降水量以及可利用降水率的关系，在此计算了春、夏季和全年它们之间的相关系数，结果由表 4 给出。从表 4 可以看出，蒸发量、可利用降水量以及可利用降水率与降水量的变化基本一致，降水量在水资源各分量中起决定性作用。气温与蒸发量呈正相关，其中在春季较为显著，通过了 0.10 信度检验；与可利用降水量、可利用降水率均为负相关，其中在夏季较为显著，分别通过了 0.10 和 0.05 信度检验。

由上述关系可得到这样的结论，假设在气温不变的情况下，当降水量增多（或减少）时，虽然蒸发量也增多（或减少），但由于降水量基数的加大（或变小），可利用降水量和可利用降水率还是随之增多（或减少）。在文献 [7] 中分析到，当降水量很大时，可能因空气易于饱和，蒸发量反而减少，这自然更有利于可利用降水量的增多。再假设在降水量不变的情况下，当气温升高（或降低）时，蒸发量将增多（或减少），可利用降水量和可利用降水率便会减少（或增多）。以东北地区 20 世纪 60 年代和 80 年代的实况为例，从表 3 中可以看到，60 年代和 80 年代同为多雨时段，虽然 80 年代的平均降水量较 60 年代的稍多，但 80 年代的平均气温为 4.4℃，较 60 年代的 3.8℃高了 0.6℃，导致 80 年代的蒸发量远大于 60 年代，两者的可利用降水量相差无几，而可利用降水率下降了近 1%。由此可见，虽然降水量是水资源的决定性因素，但由于气温变化所造成的影响也不可忽视。

根据东北地区 1961~2002 年资料的计算结果，以 90 年代的年平均气温 5.0℃为背景的情况

下，年蒸发的变化量大概占年降水变化量的 30%~40%，也就是说年降水量每增加或减少 100 mm，年蒸发量会增加或减少 30~40 mm。若以 90 年代的年降水量 540mm 为背景，年平均气温每升高或降低 1.0℃，年蒸发量会增加或减少 5~15 mm。当然上面的估计还很简单，因为每一年的降水和气温的变化都是不一样的，对蒸发量的影响要复杂得多。

6 结论及讨论

(1) 东北地区降水资源呈东多西少分布，全区可利用降水量多年平均为 200 mm 左右。东部山区全年可利用降水量较为丰富，多年平均可达为 400 mm；而西部半干旱地区全年可利用降水量只有 100 mm，为全区的一半左右，是东部山区的 1/4。全区春季可利用降水率平均不到 30%，大部分区域春季可利用降水缺乏，都面临春旱问题。西部半干旱地区尤为严重，且该区域夏季可利用降水也极为不足，春夏连旱的年景经常发生。

(2) 东北地区降水资源随时间变化总体呈下降趋势，西部半干旱地区水资源供给矛盾将更加突出，而东部山区的下降趋势最为明显，这不但对当地的水资源供给不利，对全东北地区水资源的影响也更为深远。从历史资料分析，东北地区降水资源具有阶段性变化，在多雨时段可利用降水率也较高，可利用水量明显多于少雨时段；西部半干旱地区多雨时段与少雨时段可利用降水率相差可达 8%，不利于该区域降水资源的开发利用。

(3) 降水量在水资源各分量中起决定性作用，但因气温变化所造成的影响也不容忽视。在文献 [9] 中指出由于人类活动影响的加剧，大量排放 CO₂ 导致全球气候增暖，在大气中 CO₂ 浓度加倍的情况下，东北地区年平均气温将上升 2.8℃左

表 4 东北地区气温、降水与水资源分量之间的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between temperature, precipitation and precipitation resource components in mm

		春季 Spring			夏季 Summer			全年 Annual		
		E	H	H/P	E	H	H/P	E	H	H/P
降水	Precipitation	0.9260	0.9375	0.8199	0.7424	0.9856	0.9344	0.7878	0.9729	0.9011
气温	Temperature	0.2915	-0.0363	-0.1946	0.0051	-0.2847	-0.3552	0.1375	-0.1436	-0.2173

右,而降水量总体来说变化不大。经估算,同现在的气候条件相比较,若降水量变化不大,东北地区年平均气温每上升 1.0°C ,蒸发量可增加 10 mm 左右,可利用降水率下降近 2% ;大气中 CO_2 浓度倍增时,东北地区可利用降水率将下降 5% 以上,超过了全区多雨时段与少雨时段的差别,其影响是非常显著的,可致使干旱化趋势持续发展和进程加快,水资源的供给和生态环境问题更加突出。

(4) 文中采用估算蒸发量的经验模型方法得到东北地区的可利用降水量,此方法在较大范围,从气候的角度能反映出其宏观分布特征及变化趋势,但由于没有考虑到地形、地貌以及植被等下垫面条件特征,在精度上与实际存着一定的偏差,这需要我们进行更深入的研究。

参考文献

- [1] 符淙斌,温刚. 中国北方干旱化的几个问题. 气候与环境研究, 2002, 7 (1): 22~29
Fu Congbin, Wen Gang. Several issues on aridification in the northern China, *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2002, 7: 22~29
- [2] 廉毅,安刚,王琪,等. 吉林省 40 年气温和降水的变化. 应用气象学报, 1997, 8 (2): 197~204
Lian Yi, An Gang, Wang Qi, et al. Variations of temperature and precipitation during the last forty years in Jilin province, *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 1997, 8: 197~204
- [3] 安刚,孙力,廉毅,等. 乾安县 40 年气候变化的分析. 气候与环境研究, 2002, 7 (3): 370~376
An Gang, Sun Li, Lian Yi, et al. The climatic changes analysis of Qian'an in the last 40 years, *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2002, 7: 370~376
- [4] 孙力,安刚,丁立. 中国东北地区夏季旱涝的分析研究. 地理科学, 2002, 22 (3): 311~316
Sun Li, An Gang, Ding Li. The characteristics of summer drought and flood in Northeast China, *Scientia Geographica Sinica* (in Chinese), 2002, 22: 311~316
- [5] 孙力,安刚,高纵亭,等. 中国东北地区地表水资源与气候变化关系的研究. 地理科学, 2004, 24 (1): 42~49
Sun Li, and An Gang, Gao Zong Ting, et al. Relationship between climate variation and surface water resources in Northeast China, *Scientia Geographica Sinica* (in Chinese), 2004, 24: 42~49
- [6] 杨辉,宋正山. 华北地区水资源多时间尺度分析. 高原气象, 1999, 18 (4): 496~508
Yang Hui, Song Zhengshan. Multiple time scales analysis of water resources in North China, *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1999, 18: 496~508
- [7] 宋正山,杨辉,张庆云. 华北地区水资源各分量的时空变化特征. 高原气象, 1999, 18 (4): 552~566
Song Zhengshan, Yang Hui, Zhang Qingyun. The characteristics of temporal and spatial variation of water resource components over North China, *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1999, 18: 552~566
- [8] 高桥浩一郎. 月平均气温、月降水量以及蒸发散量的推定方式. 天气 (日本), 1979, 26 (12): 29~32
Takahashi Koichiro. The estimation mode of evapotranspiration base on monthly temperature and precipitation, *Weather* (in Japanese), 1979, 26: 29~32
- [9] 秦大河主编. 中国西部环境演变评估. 北京: 科学出版社, 2002, 57~60
Qin Dahe, Ed. *The Estimate of Environment Change in West China* (in Chinese). Science Press, Beijing, 2002, 57~60