

陈锋, 谢正辉. 2012. 气候变化对南水北调中线工程水源区与受水区降水丰枯遭遇的影响 [J]. 气候与环境研究, 17 (2): 139-148, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10097. Chen Feng, Xie Zhenghui. 2012. Effects of climate change on synchronous-asynchronous encounter probability of rich-poor precipitation between water source area and water receiving areas in the middle route of South-to-North Water Transfer Project [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (2): 139-148.

气候变化对南水北调中线工程水源区与 受水区降水丰枯遭遇的影响

陈锋^{1,2} 谢正辉¹

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 浙江省气象科学研究所, 杭州 310017

摘要 运用 Copula 方法构建南水北调中线工程水源区与各受水区汛期、非汛期及全年降水量的联合分布, 并基于 IPCC 第四次评估报告中大气环流模式的降水结果, 用所建模型探讨了气候变化情景下, 南水北调中线工程水源区与受水区丰枯遭遇的变化。结果表明, 从汛期来看, 汉唐 (汉江水源区—唐白河受水区) 和汉海 (汉江水源区—海河受水区) 遭遇的丰枯同步频率呈增加趋势, 不同排放情景下分别增加 3.34%~16.48% 和 2.56%~8.21%, 而汉黄 (汉江水源区—黄河受水区) 遭遇的丰枯同步频率呈减小趋势, 不同排放情景下减小 -1.97%~9.57%; 从非汛期来看, 汉唐和汉海遭遇的丰枯同步频率呈减小趋势, 不同排放情景下分别减小 -0.21%~9.42% 和 0.99%~5.54%, 而汉黄遭遇的丰枯同步频率呈增加趋势, 不同排放情景下增加 1.79%~13.28%; 从全年尺度来看, 汉唐、汉黄和汉海遭遇的丰枯同步频率基本均呈减小趋势, 不同排放情景下分别减小 -2.88%~10.97%、-1.28%~5.05% 和 -2.33%~7.01%。

关键词 南水北调 丰枯遭遇 Copula 方法 气候变化

文章编号 1006-9585 (2012) 02-0139-10 **中图分类号** P467 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10097

Effects of Climate Change on Synchronous-Asynchronous Encounter Probability of Rich-Poor Precipitation between Water Source Area and Water Receiving Areas in the Middle Route of South-to-North Water Transfer Project

CHEN Feng^{1,2} and XIE Zhenghui¹

1 *Institute of Atmospheric and Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Zhejiang Institute of Meteorological Sciences, Hangzhou 310017*

收稿日期 2010-07-06 收到, 2011-12-31 收到修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX2-YW-126-2、KZCX2-YW-217, 国家重点基础研究发展规划项目 2009CB421407, 国家自然科学基金项目 41105062, 浙江省海洋气象科学研究所气象科技开放研究专项 KF2009005、KF2010001

作者简介 陈锋, 男, 1982 年出生, 博士, 主要从事陆面水文过程及区域气候模式发展研究。E-mail: chenfeng@mail.iap.ac.cn

通讯作者 谢正辉, E-mail: zxie@lasg.iap.ac.cn

Abstract The Copula theory was used to construct the joint distribution of precipitation in the flood season, the dry season, and the whole year between the water source area and the water receiving areas in the middle route of the South-to-North Water Transfer Project. The effect of climate change on the synchronous-asynchronous encounter probability of rich-poor precipitation was analyzed based on the General Circulation Models (GCMs) outputs in the IPCC Fourth Assessment Report (IPCC AR4). The results show that on the flood season scale, the synchronous frequency of both rich and poor exhibits increasing tendency in the Han-Tang (Hanjiang Water Source Area-Tangbaihe Water Receiving Area) encounter and Han-Hai (Hanjiang Water Source Area-Hai River Water Receiving Area) encounter, and the values are 3.34%-16.48% and 2.56%-8.21%, respectively, under different emission scenarios; while the synchronous frequency of both rich and poor exhibits decreasing tendency in Han-Huang (Hanjiang Water Source Area-Yellow River Water Receiving Area) encounter, the value is in the range of -1.97%-9.57% under different emission scenarios. On the dry season scale, the synchronous frequency of both rich and poor in the Han-Tang encounter and Han-Hai encounter decreases about -0.21%-9.42% and 0.99%-5.54%, respectively, while that in Han-Huang encounter increases about 1.79%-13.28%. On the annual scale, the synchronous frequency of both rich and poor exhibits decreasing tendency in all the three encounters, and the values for the Han-Tang, Han-Huang, and Han-Hai encounters decrease about -2.88%-10.97%, -1.28%-5.05%, and -2.33%-7.01%, respectively.

Key words South-to-North Water Transfer Project, synchronous-asynchronous encounter probability, Copula method, climate change

1 引言

近年来, 由于人口增加、经济发展以及降水减少和温度升高引起的干旱化趋势, 使华北地区水资源供需矛盾更加突出, 并产生了严重的生态环境问题, 不仅制约了当地经济社会正常发展, 甚至影响到国家的可持续发展战略(左大康等, 1984; 章芳和苏炳凯, 2002; 李新周等, 2006)。南水北调中线工程的实施对于解决包括北京、天津在内的华北地区水资源短缺问题将起到重要作用(<http://www.nsb.gov.cn/> [2010-10-11])。然而, 由于区域来水的空间差异性和时间波动性, 南水北调水源区与受水区丰水和枯水并不总是能互补的(张有芷等, 1992; 张金才, 1999; 郑红星和刘昌明, 2000; 王志良和杨弘, 2004; 阮本清等, 2005; 韩宇平等, 2007)。例如: 当某一时段受水区水资源短缺, 而水源区来水也不充沛时, 或受水区来水充沛, 不需要跨流域输水时, 南水北调工程的效益就无法充分发挥。因此, 分析水源区和受水区来水丰枯的遭遇性是跨流域水资源调配的重要依据, 它直接影响到调水工程的可靠性, 是调水系统工程规划设计、合理布局的重要参数(郑红星和刘昌明, 2000)。

关于南水北调工程水源区与受水区丰枯遭遇

的分析已有不少研究(张有芷等, 1992; 张金才, 1999; 郑红星和刘昌明, 2000; 张彤, 2002; 王志良和杨弘, 2004; 阮本清等, 2005; 戴昌军和梁忠民, 2006; 韩宇平等, 2007; 闫宝伟等, 2007)。这些研究都是基于历史降水或径流资料, 采用模糊数学、经验频率、联合分布计算等方法, 对南水北调工程水源区和受水区丰枯遭遇现状进行研究, 而对未来气候变化引起丰枯遭遇频率变化方面的研究还相对较少。许多研究表明: 气候变化不仅能引起降水(和水资源)总量的变化, 而且对降水(和水资源)量的时空分布也有较大改变(刘春蓁, 1997; 黄荣辉和徐予红, 1998; Gao and Huang, 2001; IPCC, 2007)。因此, 研究未来气候变化对水源区与受水区丰枯遭遇的影响, 对南水北调中线工程规划、实施和调度是十分有意义的。

本文采用比较简单易行且已经在水文计算中得到成功应用并能兼顾水源区与受水区降水内在联系的 Copula 方法, 利用 IPCC 第四次评估报告中大气环流模式的降水结果, 进行不同水文区的丰枯遭遇研究, 以探讨未来气候变化对南水北调中线工程水源区与受水区丰枯遭遇的影响。

2 研究区域概况

南水北调中线工程从长江支流汉江上的丹江

口水库调水，途经湖北、河南、河北，最后到达北京和天津，横跨长江流域、淮河流域、黄河流域、海河流域，总干渠全长 1241.2 km，近期设计总调水量 145 亿 m³（水利部长江水利委员会，2001；Liu and Zheng, 2002）。水源区为汉江流域丹江口以上地区（以下简称为汉江区），集水面积 9.52 万 km²；受水区范围约 15 万 km²，分为唐白河受水区、黄淮受水区、海河受水区。图 1 为水源区和受水区的主要覆盖范围，以下结论均在此区域的基础上得出。

3 资料和方法

3.1 降水资料

20 世纪实测降水数据来自于中国气象局提供的 752 个气象站的日值观测数据 (http://cdc.cma.gov.cn/shuju/index3.jsp?tpcat=SURF&dsid=SURF_CLI_CHN_MUL_DAY_CES&pageid=3[2010-10-11])，21 世纪预测的降水数据来自 IPCC 第四次评估报告大气模式结果 (http://www.madzmaw.de/IPCC_DDC/html/SRES_AR4/index.html [2010-10-11])，采用距离平方反比方法

（谢正辉等，2004）插值到 0.1°（纬度）×0.1°（经度）网格，并最终获得降水量的区域平均值。王绍武和赵宗慈（1979）根据中国近 500 年旱涝史料分析认为中国东部旱涝存在 36 年左右的周期；郑红星和刘昌明（2000）也对北京、汉口和汉中等气象站点不同长度降水系列进行 *F* 检验和 *t* 检验，结果表明选取 50 年左右的资料系列具有较好的代表性，基本上能反映降水系列的总体特征。鉴于上述研究以及研究范围内各测站资料的长度限制，选取 1951~2000 年、2001~2050 年和 2051~2100 年逐月的降水资料分别作为 20 世纪下半叶、21 世纪上半叶和 21 世纪下半叶的代表系列进行丰枯遭遇分析。

3.2 水源区与受水区的降水气候特点

依据《水利水电工程设计洪水计算规范》（水利部长江水利委员会，1993）和《水利水电工程水文计算规范》（水利部长江水利委员会水文局，2002）的规定，我国水文分析一般假定服从皮尔逊 III 型分布，其概率密度函数为

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)}(x - a_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-a_0)}, (x > a_0) \quad (1)$$

其中， $a_0 > 0$ 、 $\alpha > 0$ 、 $\beta > 0$ 分别为形状、尺度和位

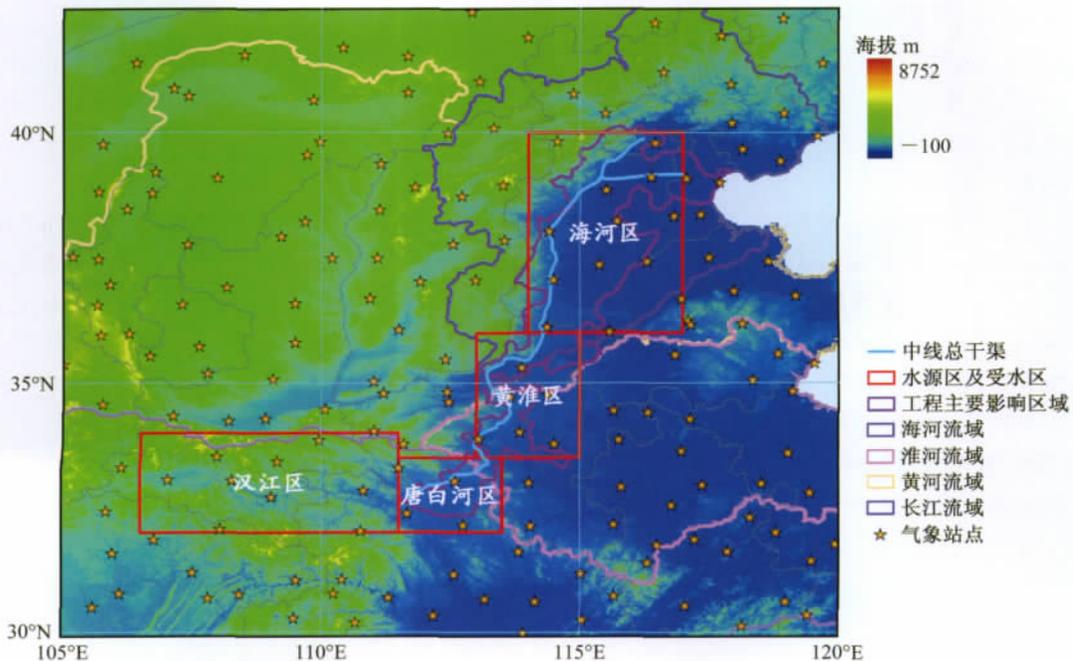


图 1 南水北调中线工程水源区及受水区

Fig. 1 The water source area and water receiving areas in the middle route of South-to-North Water Transfer Project

置参数, 分别可以用基本统计特征参数 E_x 、离势系数 C_v 、 C_s 表示 (黄振平, 2003) 如下:

$$a_0 = E_x \left(1 - \frac{2C_v}{C_s} \right), \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{4}{C_s^2}, \quad (3)$$

$$\beta = \frac{2}{E_x C_v C_s}. \quad (4)$$

皮尔逊 III 型分布的参数获取方法很多, 这里采用较为成熟的线性矩法 (Hosking et al., 1997; 王建刚和刘亚萍, 1997; 金光炎, 2007; 林小丽, 2008) 估计上述参数, 并得出 20 世纪下半叶水源区和受水区不同时间段的常用统计特征参数 E_x 、 C_v 、 C_s (如表 1 所示)。

表 1 水源区与受水区降水分布参数估计
Table 1 Distribution parameters of precipitation for water source area and water receiving areas

区域	时段	参数		
		E_x	C_v	C_s
汉江区	汛期	499.4	0.23	0.55
	非汛期	317.6	0.16	0.31
	全年	816.9	0.17	0.61
唐白河区	汛期	505.6	0.28	0.55
	非汛期	344.6	0.22	0.98
	全年	850.2	0.19	0.51
黄淮区	汛期	439.3	0.23	0.35
	非汛期	210.6	0.28	1.01
	全年	649.9	0.19	0.15
海河区	汛期	440.1	0.24	0.10
	非汛期	131.5	0.30	1.25
	全年	571.6	0.21	0.31

注: 海河流域汛期为 6~9 月, 为进行比较, 其他区亦取 6~9 月; 非汛期为 10 月至次年 5 月。

由表 1 可见, 水源区 (汉江区) 20 世纪下半叶多年平均降水量为 816.93 mm, 受水区由南到北递减, 依次为 850.20 mm、649.88 mm 和 571.60 mm。水源区多年平均降水量是海河受水区的 1.4 倍, 尤其是在非汛期, 达到了 2.4 倍。另外, 水源区降水的 C_v 为 0.17, 受水区由南到北依次增大, 分别为 0.19、0.19 和 0.21。而且, 就各个时段来看, 水源区的 C_v 均比受水区小。这说明受水区非汛期和全年降水的年际变化比汉江区大得多, 这种降水的时空分布对南水北调中线是

十分有利的。

3.3 基于二维 Copula 理论的联合分布

Copula 函数能独立于随机变量的边缘分布, 反映随机变量的相关性结构, 从而可将联合分布分为两个独立的部分来分别处理: 变量间的相关性结构和变量的边缘分布, 其中相关性结构用 Copula 函数来描述。Copula 函数的优点在于不要求具有相同的边缘分布, 任意边缘分布经过 Copula 函数连接都可构造成联合分布, 由于变量的所有信息都包含在边缘分布里, 在转换过程中不会产生信息失真 (Nelson, 1999; 熊立华等, 2005; Zhang and Singh, 2006; 闫宝伟等, 2007)。

3.4 基于 Copula 理论的丰枯遭遇问题

根据《地表水资源调查和统计分析技术细则》(水利部水文局, 1981) 中的规定, 各分区年降水分为丰水年、偏丰水年、平水年、偏枯水年、枯水年 5 个等级, 划分频率见表 2。

表 2 丰水年、偏丰水年、平水年、偏枯水年、枯水年等级划分

Table 2 Classification for wet year, partially wet year, normal year, partially dry year, and dry year

名称	频率 p
丰水年	$p < 12.5\%$
偏丰水年	$12.5\% \leq p < 37.5\%$
平水年	$37.5\% \leq p < 62.5\%$
偏枯水年	$62.5\% \leq p < 87.5\%$
枯水年	$p \geq 87.5\%$

水源区与受水区的各种遭遇情况的概率可以根据多维变量联合分布函数 (魏宗舒等, 2003) 求得:

$$P(x_1 \leq x < x_2, y_1 \leq y < y_2) = F(x_2, y_2) - F(x_1, y_2) - F(x_2, y_1) + F(x_1, y_1), \quad (5)$$

其中, x_1 和 x_2 为水源区降水的两个丰枯等级阈值 ($x_1 < x_2$; 丰水时 x_1 取 $-\infty$, 枯水时 x_2 取 $+\infty$), y_1 和 y_2 为受水区降水的两个丰枯等级阈值 ($y_1 < y_2$; 丰水时 y_1 取 $-\infty$, 枯水时 y_2 取 $+\infty$), F 为水源区和受水区降水的联合分布函数。

基于 Copula 理论的南水北调水源区与受水区降水丰枯遭遇分析, 具体应用包括以下几个步骤 (Zhang and Singh, 2006): 1) 确定各变量的边缘分布; 2) 计算 Kendall 秩相关系数 τ ; 3) 根据 τ

与待定参数 θ 的关系确定 θ ；4) 根据 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验和离差平方和最小准则 (ordinary least squares, OLS) 等评价指标选取 Copula 函数，建立联合分布；5) 根据所建分布按公式 (5) 中的表达式分析相应的遭遇情况。

根据以上步骤，最终选定以 Clayton Copula 作为联结函数；汉唐（汉江水源区—唐白河受水区）遭遇 3 个时段（汛期、非汛期和全年平均）的参数 θ 分别为 2.24、2.38 和 2.19；汉黄（汉江水源区—黄河受水区）遭遇的参数 θ 分别为 1.37、1.44 和 1.57；汉海（汉江水源区—海河受水区）遭遇的参数 θ 分别为 1.16、1.37 和 1.02。

4 结果分析

4.1 20 世纪下半叶丰枯遭遇分析

基于 Copula 理论建立南水北调中线工程水源区与各受水区降水量联合分布模型，可以求出不同时段水源区与各受水区各种降水遭遇的概率。从图 2 上可以看出，由 Copula 函数得出的计算分布在各个时段中均能较好地与经验点据拟合，可见采用 Copula 理论来描述水源区与受水区的丰枯

遭遇问题是可行的。从图 3 中可以查出水源区与各受水区发生各种降水组合的概率，如当水源区年降水量为 800 mm 时，唐白河区、黄淮区和海河区出现年降水量为 800 mm 以下的概率分别为 34.3%、46.6%和 47.5%。

根据公式 (5) 中的丰枯遭遇计算公式及表 2 中的丰平枯划分等级，可以计算得到南水北调中线工程水源区与各受水区各种降水丰枯遭遇的频率。由表 3 可见，水源区与各受水区不同时段丰枯遭遇表现如下特征：

(1) 从空间尺度上看，各个时段丰枯同步（包括水源区与受水区均为丰水、偏丰、平水、偏枯或枯水）的频率均由南向北依次递减，而丰枯异步（包括除了丰枯同步的其他遭遇形式）的频率则由南向北依次增加。就年尺度来说，由南向北（下同），丰枯同步的频率依次为 46.85%、35.88%和 22.47%，丰枯异步的频率依次为 53.15%、64.12%和 77.53%。

(2) 从时间尺度上看，非汛期的丰枯同步频率相对最高（汉黄遭遇除外），水源区与各受水区的丰枯同步遭遇分别达到 49.53%、32.91%和 31.54%。

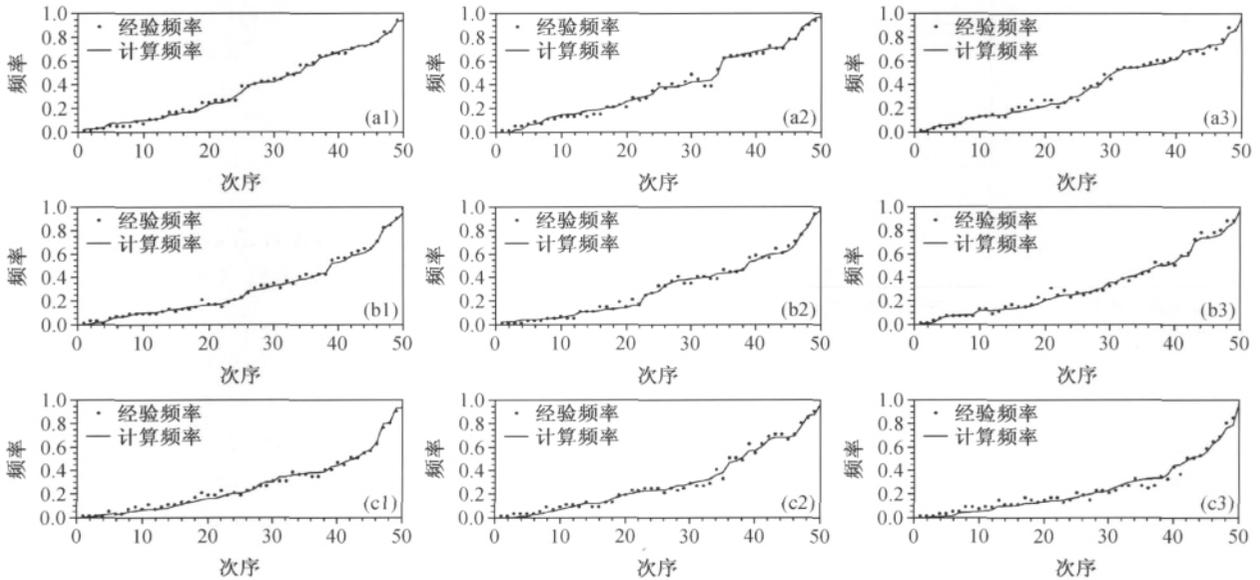


图 2 水源区与各受水区在汛期（左列）、非汛期（中列）和全年（右列）的计算频率和经验频率的拟合：(a1、a2、a3) 汉唐遭遇；(b1、b2、b3) 汉黄遭遇；(c1、c2、c3) 汉海遭遇

Fig. 2 The calculated and empirical frequencies between water source area and water receiving areas for the flood season (left panel), non-flood season (middle panel), and the whole year (right panel): (a1, a2, a3) Han-Tang encounter; (b1, b2, b3) Han-Huang encounter; (c1, c2, c3) Han-Hai encounter

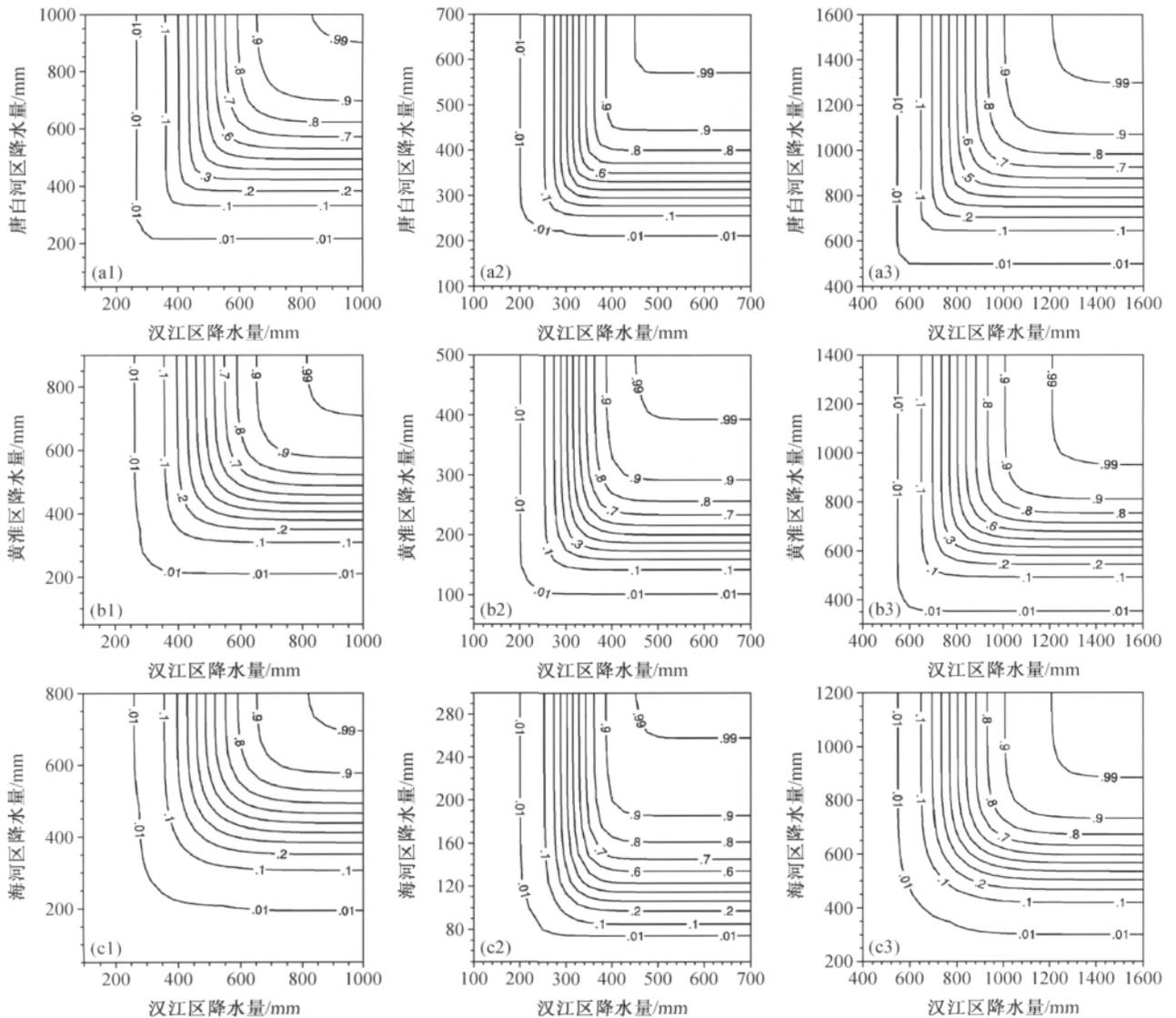


图 3 同图 2，但为联合分布等值线
Fig 3 Same as Fig 2, but for the joint distributions

(3) 就年尺度来说，若将丰水年、偏丰水年均视为丰水年，枯水年、偏枯水年均视为枯水年，则水源区与各受水区年降水量同丰（包括水源区与受水区均为丰水或偏丰）的遭遇频率分别为 25.33%、21.14%和 14.45%，同枯（包括水源区与受水区均为偏枯或枯水）的遭遇频率分别为 28.61%、23.92%和 14.66%，南丰北枯（包括水源区为丰水或偏丰，受水区为偏枯或枯水）或南枯北丰的遭遇频率均分别为 2.77%、6.23%和 13.58%，调水最为有利的丰枯遭遇（汉江区为丰水年、偏丰水年、平水年，受水区为枯水年、偏

枯水年、平水年，下同）频率分别为 27.77%、31.22%和 38.59%，调水不利的组合（两区同为偏枯水年、枯水年，下同）遭遇频率分别为 28.61%、23.92%和 14.66%。可见，从现状条件下的年尺度降水来看，水源区与海河受水区的降水丰枯遭遇对调水最为有利，其次是汉黄遭遇和汉唐遭遇。

4.2 气候变化对丰枯遭遇的影响

气候变化不仅会引起降水量大小的变化，而且还会引起降水量年际、年内分布的变化。本研究利用 IPCC 第四次评估报告中 15 个模式及其平

表 3 水源区与各受水区汛期、非汛期及全年降水量丰枯遭遇频率

Table 3 Synchronous-asynchronous encounter probability of rich-poor precipitation between water source area and water receiving areas for the flood season, non-flood season, and the whole year

类型	汉唐遭遇			汉黄遭遇			汉海遭遇		
	汛期	非汛期	全年	汛期	非汛期	全年	汛期	非汛期	全年
丰枯同步	47.56%	49.53%	46.85%	31.34%	32.91%	35.88%	26.13%	31.54%	22.47%
丰枯异步	52.44%	50.47%	53.15%	68.66%	67.09%	64.12%	73.87%	68.46%	77.53%
同丰	25.57%	28.32%	25.33%	19.13%	19.85%	21.14%	16.55%	20.80%	14.45%
同枯	28.84%	26.91%	28.61%	21.37%	22.30%	23.92%	17.80%	19.60%	14.66%
南丰北枯	2.60%	2.49%	2.77%	8.24%	7.50%	6.23%	11.08%	8.34%	13.58%
最有利 ^a	27.60%	27.49%	27.77%	33.23%	32.50%	31.22%	36.08%	33.34%	38.59%
最不利 ^b	28.84%	26.91%	28.61%	21.37%	22.30%	23.92%	17.80%	19.60%	14.66%

注: a 表示最有利于调水的频率——水源区为丰水、偏丰、平水, 而受水区为平水、偏枯、枯水; b 表示最不利于调水的频率——水源区与受水区均为偏枯或枯水。

均的回报结果, 分析了 20 世纪下半叶南水北调中线工程水源区与受水区的丰枯遭遇频率, 并与基于实测资料得出的结果比较后发现基于各模式结果得出的丰枯遭遇频率之间存在着一定的差距, 总体来说对丰枯同步的模拟过高, 而对丰枯异步的模拟偏小(图略)。经比较后发现: 德国马普气象研究所的模式 ECHAM5/MPI-OM 与基于实测数据所模拟的丰枯遭遇频率最为接近(绝对值误差和均方根误差分别在 1.20% 和 1.54% 以下, 相关系数在 0.93 以上); 并采用非参数假设检验(黄振平, 2003)对未来降水的独立性进行检验, 结果显示各区各个情景下的未来降水的丰枯情况与 20 世纪降水的丰枯情况并无显著关系(统计量 χ^2 均小于 $\alpha = 0.05$ 、 $n = 16$ 时的 χ^2_{α} , 最大值为 23.33)。因此选用该模式进行以下的深入分析。

表 4 为基于 ECHAM5/MPI-OM 结果分析, 得到气候变化引起的水源区与各受水区的丰枯遭遇频率变化。由表 4 可知, 汉江水源区与各受水区在 21 世纪的丰枯遭遇变化呈现以下规律:

(1) 就汛期来看, 水源区与唐白河受水区和海河受水区的丰枯同步频率呈增加趋势, 不同排放情景下的增幅范围在 21 世纪上半叶分别为 4.19%~10.60% 和 2.58%~8.21%, 在 21 世纪下半叶分别为 3.34%~16.48% 和 2.56%~5.39%; 而水源区与黄淮受水区的丰枯同步频率呈减少趋势, 尤其是在 21 世纪下半叶, 丰枯同步频率在两种排放情景下均减少了 9% 以上。

(2) 就非汛期来看, 丰枯同步频率的变化趋势与汛期恰好相反, 水源区与唐白河受水区和海

河受水区的丰枯同步频率呈减少趋势, 不同排放情景下的降幅范围在 21 世纪上半叶分别为 6.04%~9.42% 和 0.99%~5.14%, 在 21 世纪下半叶分别为 -0.21%~9.10% 和 1.85%~5.54%; 而水源区与黄淮受水区的丰枯同步频率呈增加趋势, 不同排放情景下的增幅范围在 21 世纪上半叶为 3.96%~9.12%, 在 21 世纪下半叶分别为 1.79%~13.28%。

(3) 就全年来看, 水源区与各受水区的丰枯同步频率基本均呈减少趋势, 不同排放情景下的降幅范围在 21 世纪上半叶分别为 -2.88%~6.74%、2.22%~5.05% 和 3.94%~7.01%, 在 21 世纪下半叶分别为 2.06%~10.97%、-1.28%~3.98% 和 -2.33%~3.27%。

5 讨论

南水北调丰枯遭遇问题是一个引人关注的敏感问题, 其结果与数据资料的内容(降水或是径流)、长度、范围、整理方法以及分析方法有较大关系, 就本文所得结果与前人工作(张有芷等, 1992; 郑红星和刘昌明, 2000; 水利部长江水利委员会, 2001; 戴昌军和梁忠民, 2006; 韩宇平等, 2007; 闫宝伟等, 2007)比较来看, 虽然在数据上有些差别, 但就定性而言基本一致。而且, 频率分析的结果还与丰枯划分标准有很大关系, 不同的丰枯划分标准会对最终结果产生很大的差别。

其次, 就本文所用方法而言, Copula 方法是构建联合分布的一种有效方法, 其具有一定的理

表 4 气候情景下水源区与各受水区汛期、非汛期及全年降水量丰枯遭遇频率的变化

Table 4 Changes of synchronous-asynchronous encounter probability of rich-poor precipitation between water source area and water receiving areas for the flood season, non-flood season, and the whole year

时段	时间	情景	汉唐遭遇			汉黄遭遇			汉海遭遇			
			丰枯同步	同丰	同枯	丰枯同步	同丰	同枯	丰枯同步	同丰	同枯	
汛期	现状		47.56%	25.57%	28.84%	31.34%	19.13%	21.37%	26.13%	16.55%	17.80%	
	21 世纪上半叶	B1	4.19%	3.44%	-1.21%	0.43%	0.16%	0.17%	8.21%	5.75%	2.68%	
		A1B	10.60%	5.10%	0.59%	1.97%	0.70%	0.74%	3.19%	3.09%	0.24%	
		A2	8.70%	2.83%	2.64%	-5.57%	-2.13%	-2.38%	2.58%	1.25%	1.71%	
	21 世纪下半叶	B1	3.34%	1.13%	1.11%	-0.44%	-0.16%	-0.17%	3.95%	1.90%	2.56%	
		A1B	16.48%	6.39%	2.02%	-9.57%	-3.81%	-4.42%	2.56%	2.72%	-0.09%	
		A2	7.16%	4.25%	-0.34%	-9.11%	-1.72%	-6.31%	5.39%	2.55%	3.40%	
	非汛期	现状		49.53%	28.32%	26.91%	32.90%	19.85%	22.30%	31.54%	20.80%	19.60%
		21 世纪上半叶	B1	-8.38%	-4.25%	0.22%	9.12%	5.67%	1.37%	-5.14%	-2.23%	-2.79%
A1B			-6.04%	-3.49%	0.93%	3.96%	3.75%	-0.56%	-0.99%	-0.41%	-0.50%	
A2			-9.42%	-2.50%	-2.68%	5.02%	4.17%	-0.14%	-4.91%	-2.12%	-2.65%	
21 世纪下半叶		B1	0.21%	-1.60%	2.56%	1.79%	0.73%	0.87%	-5.54%	-2.42%	-3.03%	
		A1B	-8.35%	-4.24%	0.23%	3.19%	3.43%	-0.88%	-1.85%	1.15%	-3.12%	
		A2	-9.10%	-2.40%	-2.58%	13.28%	6.98%	2.74%	-5.47%	-2.38%	-2.99%	
全年		现状		46.85%	25.33%	28.61%	35.88%	21.14%	23.92%	22.47%	14.45%	14.66%
		21 世纪上半叶	B1	-6.74%	-2.17%	-2.01%	-2.22%	-0.83%	-0.91%	-3.94%	-0.86%	-1.99%
	A1B		2.88%	2.54%	-1.80%	-2.64%	-0.99%	-1.09%	-6.37%	-3.13%	-4.29%	
	A2		-1.38%	-0.43%	-0.37%	-5.05%	-1.94%	-2.17%	-7.01%	-3.47%	-4.80%	
	21 世纪下半叶	B1	-2.06%	-0.64%	-0.56%	-3.98%	-1.51%	-1.67%	-1.35%	0.89%	-2.65%	
		A1B	-4.48%	-1.42%	-1.28%	1.28%	2.64%	-2.04%	2.33%	1.04%	1.32%	
		A2	-10.97%	-1.47%	-6.04%	-1.77%	1.52%	-3.18%	-3.27%	-0.29%	-3.68%	

论基础，且计算简单，便于在多变量水文分析计算中推广应用。由于 Copula 函数本身具有对称性，导致推求的丰平与平丰、丰枯与枯丰、平枯与枯平遭遇的频率相等，从而得出水源区偏丰、受水区偏枯与水源区偏枯、受水区偏丰的频率相等的结论，这与郑红星和刘昌明（2000）用经验频率方法得出的中线工程南丰北枯与南枯北丰的频率大致相当的结论是一致的，因此可以认为，用 Copula 来描述不同水文区的丰枯遭遇问题是可行的。

另外，基于降水资料的丰枯遭遇分析并不同于一般意义上的水资源分析。基于降水的丰枯遭遇分析只能是从广义水资源总量（来水）的角度分析，而一般意义上的水资源，还需要扣除蒸发等带来的损失。因此，用基于降水资料得来的丰枯遭遇频率评价南水北调工程的实施效益，实际上是有出入的。

最后，本文所讨论的气候变化引起的南水北调中线工程水源区与受水区降水丰枯遭遇变化，完全是建立在 IPCC 中 GCM 模式结果的基础上的。由于气候情景是对未来的预估，无法直接给出未来降水的分布状况，因此本文假设未来降水也服从皮尔逊 III 型分布；并且，从对基于不同模式结果所得的结果分析（未具体给出结果）可以看到，模式的误差对结果的影响可能是很大的，本文选用模拟的丰枯遭遇频率作为检验的依据，只能在一定程度上说明资料的可靠性。因此，本文中的结果只能作为一种情景假设来解释，而不是对未来结果的预报。

参考文献 (References)

戴昌军, 梁忠民. 2006. 多维联合分布计算方法及其在水文中的应用 [J]. 水利学报, 37 (2): 160-165. Dai Changjun, Liang Zhongmin. 2006. Computation methods of multivariate joint

- probability distribution and their applications in hydrology [J]. Journal of Hydraulic Engineering (in Chinese), 37 (2): 160-165.
- Gao G, Huang C Y. 2001. Climate change and its impact on water resources in North China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 18 (5): 718-732.
- 韩宇平, 蒋任飞, 阮本清. 2007. 南水北调中线水源区与受水区丰枯遭遇分析 [J]. 华北水利水电学院学报, 28 (1): 8-11. Han Yuping, Jiang Renfei, Ruan Benqing. 2007. Analysis on wetness-dryness encountering of runoff flow between water source region and receiving water region in the middle route of the South-to-North Water Transfer Project [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power (in Chinese), 28 (1): 8-11.
- Hosking J R M, Wallis J R, Qallis J R. 1997. Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-Moments [M]. London: Cambridge University, 242pp.
- 黄荣辉, 徐予红. 1998. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势 [J]. 高原气象, 18 (4): 465-476. Huang Ronghui, Xu Yuhong. 1998. The interdecadal variation of summer precipitations in China and the drought trend in North China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 18 (4): 465-476.
- 黄振平. 2003. 水文统计学 [M]. 南京: 河海大学出版社, 380pp. Huang Zhenping. 2003. Hydrological Statistics [M] (in Chinese). Nanjing: Hohai University Press, 380pp.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Solomon S, Qin D, Manning M, et al., Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 989.
- 金光炎. 2007. 线性矩法的特点评析和应用问题 [J]. 水文, 27 (6): 16-21. Jin Guangyan. 2007. Characteristics and application of linear moment method [J]. Journal of China Hydrology (in Chinese), 27 (6): 16-21.
- 李新周, 马柱国, 刘晓东. 2006. 中国北方干旱化年代际特征与大气环流的关系 [J]. 大气科学, 30 (2): 277-284. Li Xinzhou, Ma Zhuguo, Liu Xiaodong. 2006. Inter-decadal characteristics of aridification over northern China associated with the variation of atmospheric circulation during the past 50 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (2): 277-284.
- 林小丽. 2008. P-III型分布参数的线性矩估计与期望概率研究 [J]. 水利科技与经济, 14 (4): 269-271. Lin Xiaoli. 2008. L-moment estimation for parameters of Pearson type III distribution and the research of expectation frequency [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy (in Chinese), 14 (4): 269-271.
- Liu C M, Zheng H X. 2002. South-to-North Water Transfer Schemes for China [J]. Water Resources Development, 18 (3): 453-471.
- 刘春霖. 1997. 气候变化对我国水文水资源的可能影响 [J]. 水科学进展, 8 (3): 220-225. Liu Chunzhen. 1997. Potential impact of climate change on hydrology and water resources in China [J]. Advances in Water Science (in Chinese), 8 (3): 220-225.
- Nelson R B. 1999. An introduction to Copulas [M]. New York: Springer, 277pp.
- 阮本清, 韩宇平, 高季章, 等. 2005. 南水北调中线工程向黄河相机补水量分析 [J]. 水利学报, 36 (1): 22-27. Ruan Benqing, Han Yuping, Gao Jizhang, et al. 2005. Analysis on opportune surplus water supply to Yellow River by South-to-North Water Transfer Middle Route Project [J]. Journal of Hydraulic Engineering (in Chinese), 36 (1): 22-27.
- 水利部长江水利委员会. 1993. 水利水电工程设计洪水计算规范 (SL44-93)[S]. 北京: 中国水利电力出版社, 23pp. Changjiang Water Resources Commission. 1993. Regulation for calculating design flood of water resources and hydropower projects (SL44-93) [S] (in Chinese). Beijing: Hydraulic and Electric Press, 23pp.
- 水利部长江水利委员会. 2001. 南水北调中线工程规划 (2001年修订) 专题报告二: “供水调度与调蓄研究” [R]. 武汉, 60pp. Changjiang Water Resources Commission. 2001. Planning of South-to-North Water Transfer Project, special report 2: Water supply dispatching, regulation and storage [R] (in Chinese). Wuhan, 60pp.
- 水利部长江水利委员会水文局. 2002. 水利水电工程水文计算规范 (SL278-2002)[S]. 北京: 中国水利电力出版社, 42pp. Hydrological Bureau of Changjiang Water Resources Commission. 2002. Regulation for hydrologic computation of water resources and hydropower projects (SL278-2002) [S] (in Chinese). Beijing: Hydraulic and Electric Press, 42pp.
- 水利部水文局. 1981. 地表水资源调查和统计分析技术细则 [S]. 北京, 27pp. Hydrological Bureau of Water Resources. Technical details of surface water resources survey and statistical analysis [S] (in Chinese). Beijing, 27pp.
- 王建刚, 刘亚萍. 1997. P-III型分布 Φ 值数值计算方法比较 [J]. 水文, (5): 10-14. Wang Jiangan, Liu Yaping. 1997. Comparison among numerical calculation methods about Φ in P-III distribution [J]. Journal of China Hydrology (in Chinese), (5): 10-14.
- 王绍武, 赵宗慈. 1979. 我国旱涝 36 年周期及其产生的机制 [J]. 气象学报, 37 (1): 64-73. Wang Shaowu, Zhao Zongci. 1979. The 36-yr. wetness oscillation in China and its mechanism [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 37 (1): 64-73.
- 王志良, 杨弘. 2004. 天津市水源区降水丰枯遭遇性分析 [J]. 海河水利, (6): 15-18. Wang Zhiliang, Yang Hong. 2004. synchronous-asynchronous encounter probability of rich-poor precipitation at water source area of Tianjin [J]. Haihe Water Resources (in Chinese), (6): 15-18.
- 魏宗舒, 等. 2003. 概率论与数理统计教程 [M]. 北京: 高等教育

- 出版社, 118-119. Wei Zhongshu, et al. 2003. Probability and Statistics Tutorial [M] (in Chinese). Beijing: Higher Education Press, 118-119.
- 谢正辉, 刘谦, 袁飞, 等. 2004. 基于全国 50 km×50 km 网格的大尺度陆面水文模型框架 [J]. 水利学报, (5): 76-82. Xie Zhenghui, Liu Qian, Yuan Fei, et al. 2004. Macro-scale land hydrological model based on 50 km×50 km grids system [J]. Journal of Hydraulic Engineering (in Chinese), (5): 76-82.
- 熊立华, 郭生练, 肖义, 等. 2005. Copula 联结函数在多变量水文频率分析中的应用 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 38 (6): 16-19. Xiong Lihua, Guo Shenglian, Xiao Yi, et al. 2005. Application of copulas to multivariate hydrological frequency analysis [J]. Engineering Journal of Wuhan University (in Chinese), 38 (6): 16-19.
- 闫宝伟, 郭生练, 肖义. 2007. 南水北调中线水源区与受水区降水丰枯遭遇研究 [J]. 水利学报, 38 (10): 1178-1185. Yan Bao-wei, Guo Shenglian, Xiao Yi. 2007. Synchronous-asynchronous encounter probability of rich-poor precipitation between water source area and water receiving areas in the middle route of South-to-North Water Transfer Project [J]. Journal of Hydraulic Engineering (in Chinese), 38 (10): 1178-1185.
- 章芳, 苏炳凯. 2002. 我国北方干旱化趋势的预测 [J]. 高原气象, 21 (5): 479-487. Zhang Fang, Sun Bingkai. 2002. The prediction of aridification tendency in North China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 21 (5): 479-487.
- 张金才. 1999. 洪泽湖, 骆马湖, 南四湖径流丰枯遭遇分析 [J]. 湖泊科学, 11 (3): 213-218. Zhang Jincai. 1999. Analysis of plentiful or scanty runoff encountering in Hongze Lake, Luoma Lake and Nansihu Lake [J]. Journal of Lake Science (in Chinese), 11 (3): 213-218.
- Zhang L, Singh V P. 2006. Bivariate flood frequency analysis using the copula method [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 11 (2): 150-164.
- 张彤. 2002. 南水北调中线工程对北京市供水风险初探 [J]. 北京水利, (6): 13-15. Zhang Tong. 2002. The risk of the middle route of South-to-North Water Transfer Project on the water supply of Beijing [J]. Beijing Water Resources (in Chinese), (6): 13-15.
- 张有芷, 周良芳, 张少婕. 1992. 南水北调中线水源区与供水区降水丰枯遭遇分析 [J]. 人民长江, 23 (11): 18-22. Zhang Youzhi, Zhou Liangfang, Zhang Shaojie. 1992. Analysis of synchronous-asynchronous encounter probability of rich-poor precipitation between water source area and water receiving areas in the middle route of South-to-North Water Transfer Project [J]. Yangtze River (in Chinese), 23 (11): 18-22.
- 郑红星, 刘昌明. 2000. 南水北调东中两线不同水文区降水丰枯遭遇性分析 [J]. 地理学报, 55 (5): 523-532. Zheng Hongxing, Liu Changming. 2000. Analysis on asynchronism-synchronism of regional precipitation in planned South-to-North Water Transfer areas [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 55 (5): 523-532.
- 左大康, 刘昌明, 许越先, 等. 1984. 黄河以北地区东线引江问题的探讨 [J]. 地理研究, 3 (2): 25-33. Zuo Dakang, Liu Changming, Xu Yuxian, et al. 1984. Some problems regarding water diversion from the Changjiang to the Hai River plain [J]. Geographical Research (in Chinese), 3 (2): 25-33.