

南水北调中线地区旱涝变化的长期特征

譙季蓉 林锦瑞 章 淹

(北京气象学院, 北京 100081)

摘 要 利用近 500 年我国旱涝等级历史资料及新中国 40 多年气象资料, 采用天气、气候及统计方法, 计算了中线地区干旱指标, 分析了华北地区和汉水上游水库库区干旱分布特征、各区区域性干旱遭遇及库区供水区与北方需水区旱涝变化的长期特征, 供南水北调决策参考。

关键词 南水北调 中线地区 旱涝 长期特征

1 前言

我国是一个干旱缺水的国家, 水资源的南北分布又极不平衡。长江流域及其以南地区的河川径流占全国的 80% 以上, 耕地仅占全国的 36%, 黄河、淮河、海河三大流域的河川径流量只占全国的 6.5%, 耕地面积却占全国的近 40%。华北地区水资源量仅占全国的 2.3%, 人均水资源不及全国人均 2400 m^3 的 $1/6$, 不及世界人均的 $1/24$ ^[1]。首都北京人均水资源占有量不足 400 m^3 (如考虑流动人口, 则不足 300 m^3), 只有全国的 $1/7$, 世界的 $1/25$, 在世界 120 多个国家的首都及大中城市中居百位之后, 是最缺水的城市之一^[2]。严重缺水已成为制约华北地区经济持续发展和影响人民生活的重要因素, 解决本地区的水资源问题已成为刻不容缓的大事。

本文利用近 500 年我国旱涝等级^[3]历史资料, 结合解放后 40 多年气象资料, 采用天气、气候及统计方法, 计算了中线地区干旱指标, 分析了华北和丹江口水库及其上游来水流域的干旱特征, 各区区域性干旱遭遇及库区供水区与华北需水区旱涝变化的长期特征, 供南水北调决策参考。

2 研究区域的划分和资料的应用

图 1 为南水北调中线示意图, 将中线分为 3 个区: 第 1 区为京津冀地区; 第 2 区为豫北、中部地区; 第 3 区为丹江口水库库区及其上游来水流域。各区台站分布如下: 第 1 区: 北京、天津、保定、石家庄、衡水、沧州、邢台、邯郸; 第 2 区: 安阳、新乡、郑州、洛阳、许昌; 第 3 区: 汉中、安康、郧县、南阳, 共 17 站。

在中线地区外围尚有张家口、大同、太原、临汾、长治、西安、信阳、徐州、菏泽、济南、德州等 11 站。为增强资料的代表性和便于统计分析, 对上述网点资料的空缺部分, 采用附近站点参证和内插的方法进行了插补, 增补了衡水、邢台、新乡、许昌

等 4 站 1470~1995 年的资料。采用标准差方法, 计算了 1980~1995 年上述 28 个站的旱涝等级, 分析了中线地区 1980~1995 年旱涝等级分布图 (图略)。上述工作使我们在中线建立了一套完整的资料序列, 为下一步的研究打下了基础。

3 中线地区干旱特征分析

3.1 区域性干旱指标和干旱等级标准

区域性干旱指标是表示某区干旱特征的重要参数。为了使干旱指标既能反映干旱影响面积的大小, 又能表示干旱的强度, 本文参考了文献[4]的干旱指标, 并认为在本文研究的地区内, 台站网点平均密度基本相同, 故给出以下表达式:

$$I_D = A_4 \times \frac{M_4}{M} + A_5 \times \frac{M_5}{M}, \quad (1)$$

所不同的是本式对于干旱影响面积是采用遭受干旱的站数与该区总站数之比来表示, 而不是采用实际面积之比。式中, I_D 为区域性干旱指标; M_4 、 M_5 分别为遭受 4 级和 5 级干旱的站数, M 为该区总站数; A_4 、 A_5 分别为 4 级和 5 级干旱等级。

采用上述干旱指标, 对中线 3 个区分别进行了计算并确定干旱等级标准为

$$\begin{aligned} 0 < I_{D0} < 2.0, & \quad \text{轻旱} \\ 2.0 \leq I_{D4} < 4.0, & \quad \text{偏旱} \\ 4.0 \leq I_{D5} \leq 5.0, & \quad \text{旱} \end{aligned}$$

为说明 (1) 式的可靠性, 我们先以解放后实测降雨资料, 用标准差法, 由各区多年区域平均雨量计算求得的 ≥ 4 级的干旱等级, 与由 (1) 式计算的 ≥ 4 级的干旱等级进行比较, 结果见表 1。

表 1 各区干旱指标 ≥ 4 级的干旱等级与其年平均雨量、5~9 月平均雨量 ≥ 4 级的干旱等级比较(1957~1995)

区域	$\bar{R}_{5-9} \geq 4$ 级干旱与 $I_D \geq 4$ 级干旱						$\bar{R}_{\text{年}} \geq 4$ 级干旱与 $I_D \geq 4$ 级干旱					
	相同率		相似率		不同率		相同率		相似率		不同率	
	次	%	次	%	次	%	次	%	次	%	次	%
1 区	11	68.8	5	31.2	0	0.0	10	58.8	7	41.2	0	0.0
2 区	7	46.7	7	46.7	1	6.6	8	47.1	8	47.1	1	5.8
3 区*	15	68.2	6	27.3	1	4.5	12	54.5	9	40.9	1	4.6

* 资料年限: 1953~1995

由表 1 看出: 不论是用 $\bar{R}_{5-9}$ 还是用 $\bar{R}_{\text{年}}$, 其 ≥ 4 级干旱等级与由于干旱指标算出的 ≥ 4 级干旱等级的相同率和相似率 (差 1 级) 之和均在 90% 以上, 1 区甚至达 100%。2、3 区不同率 (差 2 级) 为 4.5%~6.6% 之间。因此可认为用各区干旱指标确定的 ≥ 4 级干旱和用 $\bar{R}_{5-9}$ 月及 $\bar{R}_{\text{年}}$ 确定的 ≥ 4 级干旱基本上是相同的, 该指标是可信的, 可以应用到 500 年旱涝资料中去讨论区域性干旱问题。

3.2 各区干旱特征分析

3.2.1 各区干旱总频次及其随时间变化

1470~1995 年间, 各区区域性干旱 ≥ 4 级的总频次以 1 区最多, 2 区次之, 3 区最少,

其出现频率分别为 33.3%、29.3%和 28.5%。周期平均为 3.0、3.4 和 3.5 年(表 2)。

表 2 各区干旱总频次统计

年 代	1 区			2 区			3 区			合计	
	偏旱	旱	合	偏旱	旱	合	偏旱	旱	合	偏旱	旱
1470~1500	8	2	10	8	2	10	6	6	12	22	10
1501~1600	16	9	25	14	13	27	24	6	30	54	28
1601~1700	22	15	37	20	16	36	16	7	23	58	38
1701~1800	26	3	29	13	10	23	15	5	20	54	18
1801~1900	32	7	39	12	11	23	15	6	21	59	24
1901~1995	26	9	35	18	17	35	31	13	44	75	39
1470~1995	130	45	175	85	69	154	107	43	150	322	157
占统计年数百分比 / %	24.7	8.6	33.3	16.2	13.1	29.3	20.3	8.2	28.5	67.2	32.8

由各区 ≥ 4 级干旱总频次随时间的变化曲线看出：16 世纪，3 区干旱较频繁，17 世纪是 1、2 区的干旱频繁期，而 18 世纪则是 3 个区干旱都较少的时期。值得注意的是，自 1801 年以来，3 个区干旱总频次都开始增加，其中以 3 区增加最快，在近 200 年中，其干旱总频次增加了 25 年，其中旱级 8 年，偏旱级 17 年；2 区增加 12 年，其中旱级 7 年，偏旱级 5 年；1 区在 18~19 世纪，干旱总频次增加了 10 年，但进入 20 世纪，却减少了 4 年。近 200 年间，1 区仅增加旱级 6 年，而偏旱级频次未增加。上述说明：近 200 年来，2、3 两区干旱发展较显著，特别是做为供水区的 3 区，干旱比 1、2 区更突出（图 2、表 2）。

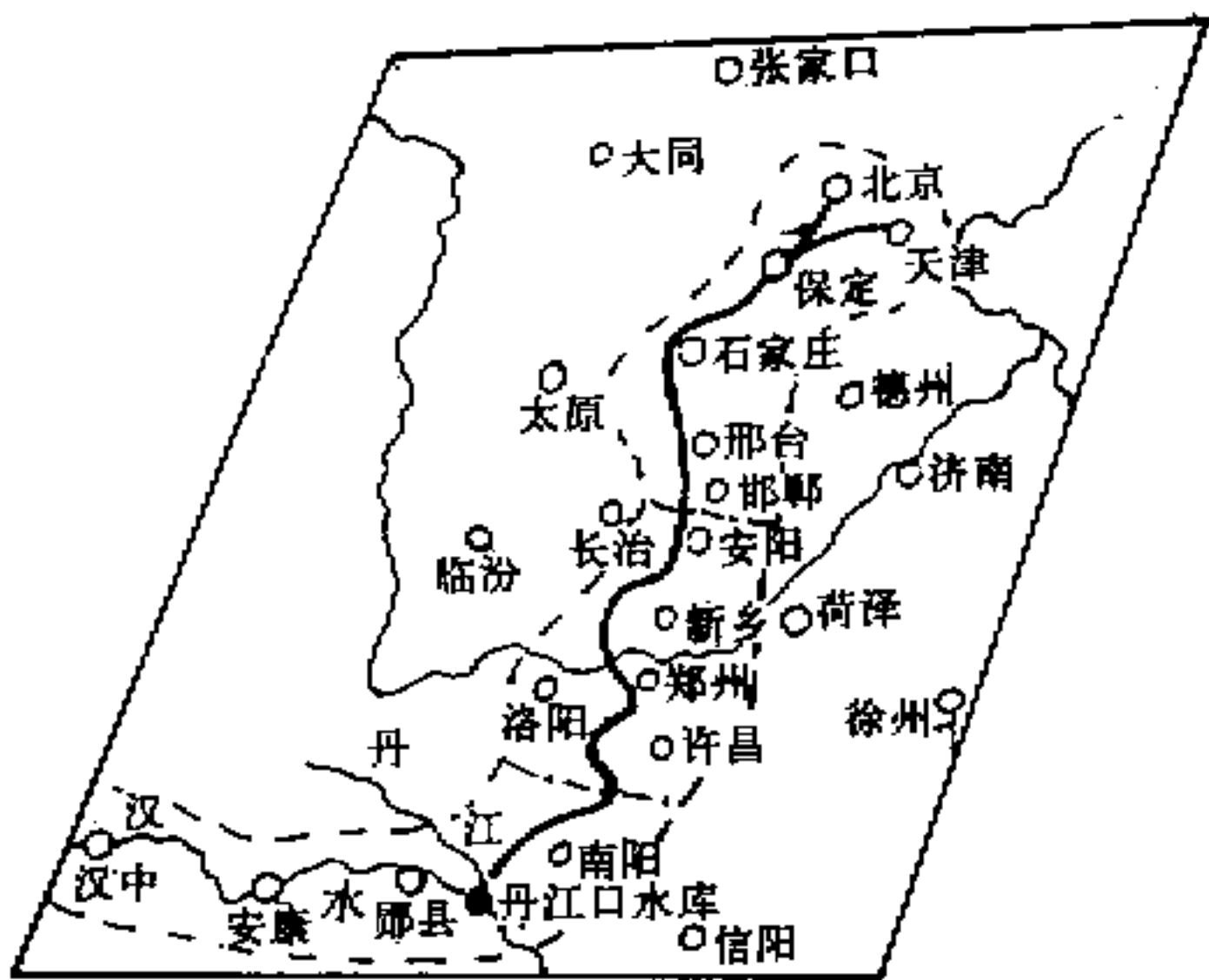


图 1 南水北调中线示意图
粗实线为南水北调主干道，虚线包围
面积为研究范围，点划线为各区分界线

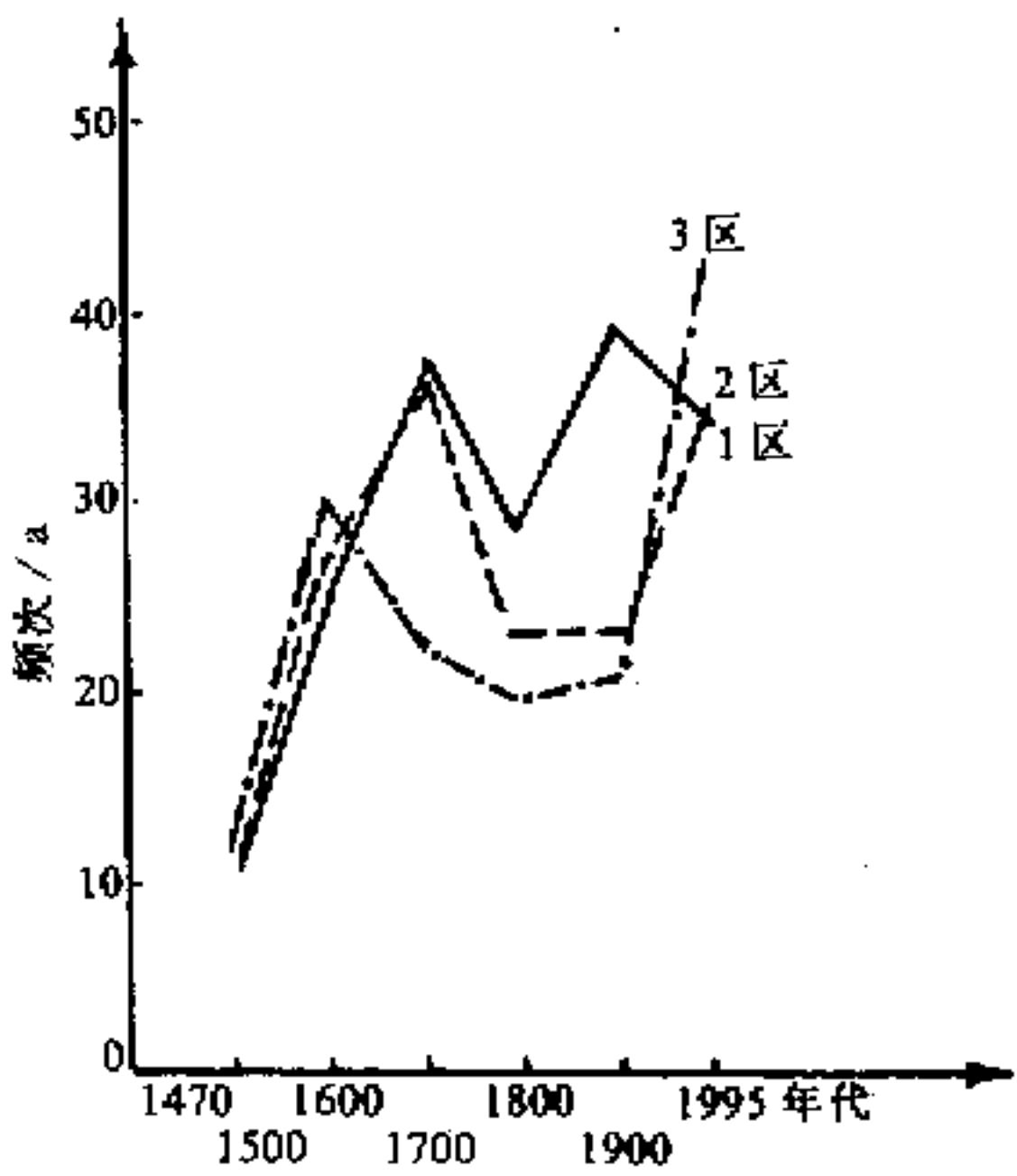


图 2 各区区域性干旱 ≥ 4 级总频次变化
实线：1 区；虚线：2 区；点划线：3 区

3.2.2 各区干旱的持续性

自 1470~1995 年的 526 年中，各区曾出现 2、3、4、5、6、7 甚至 8 年连旱的情况。出现连旱的总频次以 1 区最多，45 次（125 年），占该区总旱年的 71.4%；2、3 两区分别为 35 次（112 年）和 37 次（110 年），均占该两区总旱年的 72.7%。另外，北京在 526 年中连旱年有 122 年，占北京总旱年（190 年）的 64.2%。其中 7 年连旱 3 次

(1637~1643、1743~1749、1939~1945), 6 年连旱 1 次 (1775~1760), 5 年连旱 1 次 (1980~1984), 4 至 2 年连旱分别为 2、7 和 28 次。

进一步分析看出, 3 个区的连旱总频次均随时间的靠近而增大, 其中 3 区自 1801~1995 年间, 连旱总频次增加了 7 次 (25 年); 2 区增加了 5 次 (12 年); 1 区仅增加 3 次 (5 年)。特别是在本世纪内, 3 区的连旱总频次高达 11 次 (35 年), 在 3 个区中, 位居榜首。除 2、3 年连旱外, 3 区还出现 2 次 4 年连旱 (1948~1951、1959~1962), 1 次 5 年连旱 (1926~1930), 1 次 6 年连旱 (1990~1995)。可见本世纪 3 区的干旱持续性较 1、2 两区严重 (表 3)。

表 3 各区分世纪连旱年出现频次统计

连旱年	2 年			3 年			4 年			5 年			6 年			7 年			8 年			合计		
分区	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1470~1500	1	1	2	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2(5)	2(5)	4(11)
1501~1600	5	4	4	1	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	7(17)	6(19)	7(20)
1601~1700	4	3	3	3	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	9(28)	7(30)	5(17)
1701~1800	5	2	2	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7(19)	4(12)	4(11)
1801~1900	4	2	4	3	2	1	1	3	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	10(32)	7(22)	6(15)
1901~1995	7	5	5	2	2	2	1	2	2	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	10(24)	9(24)	11(35)
1470~1995	26	17	20	10	8	8	5	5	5	2	1	1	1	1	2	1	1	0	0	2	1	45(125)	35(112)	37(109)

括号内为连旱年数

4 各区区域性干旱的遭遇及供水区与需水区旱涝变化的长期特征

为考虑南水北调在缓解北京及其沿线水资源紧缺中水源供给的情况, 需要了解供水区和需水区旱涝变化的长期特征, 以便根据历史情况和人类社会发展变化等多种因素来考虑未来的对策。

4.1 区域性干旱的遭遇

在 526 年中, 1-2-3 区区域性干旱同时遭遇的有 47 年, 1-3 区为 65 年, 2-3 区为 80 年, 1-2 区为 93 年 (表 4)。由此得出各区之间区域性干旱遭遇的总年数为 144 年, 占统计年数的 27.4%。也就是说, 在 526 年间约有 1/4 多的时间出现了各区之间区域性干旱的同步发展。

表 4 各区之间区域性干旱遭遇统计

分区	1-2-3	2-3	1-3	1-2
1470~1500	2(2)	2(3)	4(5)	2(3)
1501~1600	3(5)	7(14)	5(8)	11(15)
1601~1700	4(10)	5(15)	6(14)	12(22)
1701~1800	6(8)	9(13)	6(9)	10(15)
1801~1900	7(12)	7(14)	10(15)	9(20)
1901~1995	7(10)	14(21)	11(14)	13(18)
1470~1995	29(47)	44(80)	42(65)	57(93)

表中数据形式为: 频次 (年)

特别应该强调指出的是区域性干旱遭遇的持续性。因为这种不同区域的干旱持续性的同步发展, 其影响面积最大, 持续时间最长, 常给社会和人类活动造成巨大的灾害。我们分析了自 1470~1995 年的 526 年间供水区和需水区区域性干旱遭遇的持续性。由表 5 可以看出, 各区之间区域性干旱遭遇持续期(年)占总的干旱遭遇期(年)的比例以 2-3 区最大, 为 67.5%; 1-2-3 区次之, 为 63.8%; 而 1-3 区为 55.4%。说明在区域性干旱的遭遇期内, 约有 1/2~2/3 的时间出现了持续性的干旱遭遇, 而且其持续期最长可达 8 年之久(2-3 区, 1634~1641 年)。这一点应引起我们的高度重视。

为进一步说明各区区域性干旱的遭遇, 应用下式计算了各区之间区域性干旱的相关系数:

$$r_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^n (I_{ij} - \bar{I}_j)(I_{ik} - \bar{I}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (I_{ij} - \bar{I}_j)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (I_{ik} - \bar{I}_k)^2}}, \quad (2)$$

式中 I_{ij} 、 I_{ik} 为第 i 年第 j 区与第 i 年第 k 区的干旱指标值; $\bar{I}_j$ 、 $\bar{I}_k$ 为第 j 和第 k 区的多年平均干旱指标值。

表 6 各区分世纪区域性干旱指标的相关系数

分区	3-1	3-2	2-1
1470~1500	0.008	0.029	0.063
1501~1600	0.225	0.568	0.440
1601~1700	0.428	0.504	0.665
1701~1800	0.319	0.605	0.772
1801~1900	0.498	0.743	0.823
1901~1995	0.020	0.384	0.233
1470~1995	0.281	0.532	0.460

大, 而 3-1 区间区域性干旱相关性很小, 同时发生干旱的可能性也很小。

4.2 供水区、需水区旱涝变化的长期特征

为分析供水区、需水区旱涝变化的长期特征, 首先用解放后实测雨量资料(以下简称资料), 用标准差方法, 计算各区区域性旱涝等级, 与近 500 年各区旱涝等级(以下简称史料)的众数进行比较, 先看解放前后各区区域性旱涝的长期特征。把史料和资料中的旱和偏旱加在一起称作“旱”, 而把涝和偏涝放在一起称作“涝”。由表 7 可以看出: 资料中各区“旱”的频率均高于史料, 其中 3 区甚至高出 24.8%; 相应地资料中各区

表 5 各区区域性干旱遭遇的持续性统计

分区	1-2-3	1-3	2-3
2 年	6(12)	9(18)	11(22)
3 年	3(9)	3(9)	2(6)
4 年	1(4)	1(4)	3(12)
5 年	1(5)	1(5)	0
6 年	0	0	1(6)
7 年	0	0	0
8 年	0	0	1(8)
2~8 年	11(30)	14(36)	18(54)
区域性干旱遭遇次/a	29(47)	42(65)	44(80)
持续年占遭遇年百分比/%	63.8	55.4	67.5

表中数据形式为: 次(年)

表 6 为由(2)式求得的 1470~1995 年各区区域性干旱指标的相关系数, 可以看出: 各区之间不同世纪区域性干旱主要为正相关, 其中以 3-2 区间的相关系数最大, 为 0.532; 其次 2-3 区之间为 0.460; 相关系数最小的是 3-1 区, 仅为 0.281。这说明 3-2 区、2-1 区之间, 区域性干旱均有较好的相关性, 同时发生干旱的可能性较大,

“旱”的周期均短于史料，其中以 3 区最短，约为 2.3 年。表明解放后 3 区的干旱发展明显。例如在本世纪的 95 年中，3 区共出现 2 年、3 年连旱 7 次（17 年），其中 6 次（14 年）是发生在解放后的 43 年中，占本世纪该区出现 2 年、3 年连旱总次数的 82.4%；其次 1 区“旱”的周期，解放后也缩短为 2.6 年。因此 1、3 两区解放后平均约 2~3 年就可能出现 1 次区域性的旱或偏旱；2 区“旱”的资料和史料相比变化不大，约平均 3~4 年出现 1 次区域性旱或偏旱。

资料中各区“涝”的频率，1、2 区与史料相比变化不大，只有 3 区比史料高出 6.1%，其周期约为 3.1 年；1、2 两区则分别为 3.9 和 3.5 年。

若把史料和资料综合起来考虑，各区出现“旱”的周期分别为 2~4 年（1 区）、3~4 年（2 区）和 2~5 年（3 区）；各区出现“涝”的周期大致相同，均为 3~4 年。这表明在 526 年中，需水区平均约 2~4 年或 3~4 年出现 1 次区域性的涝或偏涝；供水区则平均 2~5 年出现 1 次区域性的旱或偏旱，3~4 年出现 1 次区域性的涝或偏涝（表 7）。

表 7 各区史料与资料所得旱涝等级的比较

		旱		偏旱		旱+偏旱		涝		偏涝		涝+偏涝	
		史料	资料	史料	资料	史料	资料	史料	资料	史料	资料	史料	资料
1 区	次数	22	4	122	11	144	15	29	6	104	4	133	10
	频率	4.5	10.3	25.0	28.2	29.6	38.5	6.0	15.3	21.4	10.3	27.3	25.6
	周期	22.1	9.8	4.0	3.5	3.4	2.6	16.8	6.5	4.7	9.8	3.7	3.9
2 区	次数	37	3	101	9	138	12	30	4	100	7	130	11
	频率	7.6	7.7	20.7	23.0	28.3	30.7	6.2	10.3	22.3	17.9	28.5	28.2
	周期	13.2	4.8	13.0	4.3	3.5	3.3	16.2	9.8	4.5	5.6	3.5	3.5
3 区	次数	13	2	92	18	105	20	17	6	111	8	128	14
	频率	2.7	4.7	19.0	41.9	21.7	46.6	3.5	14.0	23.0	18.6	26.5	32.6
	周期	37.2	21.5	5.3	2.4	4.6	2.3	28.4	7.2	4.4	5.4	3.8	3.1

为进一步说明供水区、需水区旱涝变化的长期特征，用 1470~1995 年各区区域旱涝等级的历史演变来寻求南北两方旱涝的长期特征。

从统计分析看出，需水区和供水区的旱涝分布大致有以下几种型式：北旱南旱、北旱南涝、北旱南正（常）型、北涝南旱、北涝南涝、北涝南正（常）型、北正（常）南旱、北正南涝、北正南正（常）等 9 种型式（见表 8）。其中北旱、北涝是指 1、2 区中要有 1 个区出现旱（4 或 5 级）、涝（1 或 2 级）；南旱、南涝是指 3 区出现旱（4 或 5 级）、涝（1 或 2 级）；北正南正则是指 3 个区的旱涝等级同时为 3 级。

表 8 给出了上述 9 种型式出现的年数、频率和周期。可以看出：在 1470~1995 年间，中线地区需水区和供水区旱涝型式中，北正南正、北旱南正、北正南涝和北旱南涝 4 种型式表示北方（需水区）旱或正常，需要水（对长期干旱的北方，即使正常也需要补充水），而南方（供水区）出现涝或正常，也有水源可提供水。因此可充分发挥南水北调工程效益，实现南水北调，从而缓解北京及沿线地区水资源的紧缺状况，有利于上述地区国民经济的发展和人民群众生活的提高。这种情况约占统计年数的 55.5%。所以南水北调工程总的看来是利多的。但是，9 种型式中还有 3 种即北旱南旱、北正南旱和北涝南旱型。这 3 种型式表明：北方（需水区）旱或正常，需要水。即使是北方涝，

因为涝一般持续时间较短, 而且有些局部地区还有可能出现旱, 因此也需要水; 而南方(供水区)则旱, 无水或只有少量水可调, 特别是对持续几年的北旱南旱型, 如果供水区真的出现上述情况, 则将使大面积干旱持续发展, 南水北调工程将无法发挥效益, 这不仅会给需水区而且也会给供水区的经济发展和人民群众的生活带来巨大的灾害。这种型式出现频率为 16.9%, 约占统计年数的 $1/6$, 若再加上北正南旱和北涝南旱型, 其出现频率增加到 22.8%, 约占统计年数的 $1/4 \sim 1/5$ 。这种情况相当严重, 必须有相应的辅助措施加以补救。

表 8 1470~1995 年中线地区需水区和供水区旱涝型式分析

类型	北正南正	北旱南正	北旱南旱	北涝南正	北正南涝	北涝南涝	北旱南涝	北正南旱	北涝南旱
年数	106	97	89	64	52	48	39	22	9
频率/%	20.2	18.4	16.9	12.2	9.9	7.8	7.4	4.2	1.7
周期/a	4.95	5.43	5.92	8.20	10.10	12.82	13.51	23.82	58.82

5 结语

(1) 由 (1) 式确定的干旱指标能较好地反映中线各区区域性干旱分布的特征, 该指标基本上是可信的。

(2) 在 1470~1995 年中, 中线各区干旱总频次以 1 区最多、2 区次之、3 区最少。近 200 年来, 2、3 两区干旱发展迅速, 特别是 3 区较 1、2 区更突出。

(3) 在 1470~1995 年间, 3 个区出现连旱总频次以 1 区最多、2 区次之、3 区略少于 2 区。但自 1801 年特别是本世纪以来, 3 区连旱总频次在 3 个区中位居榜首, 其干旱持续性较 1、2 两区严重。

(4) 各区区域性干旱遭遇总年数为 144 年, 约占统计年数的 27.4%。区域性干旱遭遇期内约有 $1/2 \sim 2/3$ 的时间出现了持续的干旱遭遇, 其持续期最长可达 8 年之久。各区之间区域性干旱指标的相关系数以 2-3 区最大, 1-2 区次之, 1-3 区最小。说明 2-3 区之间、1-2 区之间区域性干旱同时遭遇的可能性较大, 而 1-3 区之间的可能性较小。

(5) 若综合考虑史料和资料, 则需水区平均约 2~4 年或 3~4 年出现 1 次区域性的旱或偏旱; 平均约 3~4 年出现 1 次区域性的涝或偏涝。供水区则平均约 2~5 年出现 1 次区域性的旱或偏旱, 3~4 年出现 1 次区域性的涝或偏涝。

(6) 在 1470~1995 年间, 中线地区旱涝分布的 9 种型式中, 北正南正、北旱南正、北正南涝和北旱南涝等 4 种型式, 可充分发挥南水北调工程效益, 实现南水北调。这 4 种型式约占统计年数的 55.5%。所以南水北调工程总的看来是利多的。但是还有北旱南旱、北正南旱和北涝南旱等 3 种型式, 特别是持续几年的北旱南旱型, 其出现机率为 16.9%, 约占统计年数的 $1/6$, 再加上北正南旱和北涝南旱两型, 其出现机率增加到 22.8%, 约占统计年数的 $1/4 \sim 1/5$ 。这种情况相当严重, 必须有相应的辅助措施加以补救。

致 谢 感谢丹江口水利枢纽管理局无偿提供有关资料

参 考 文 献

- 1 钮茂生, 1996, 中国的水, 3 月 22 日人民日报.
- 2 颜昌远, 1997, 水——首都发展的生命线, 3 月 22 日北京科技日报.
- 3 中国气象科学研究院, 1981, 中国近 500 年旱涝分布图集, 北京: 气象出版社.
- 4 宋慧珠等, 1994, 区域干旱统计特征分析, 水科学进展, 5(1), 18~25.

The Long-Range Characteristics of Drought and Flood Evolvment in the Mid-Line Area of Water Transfer from South to North China

Qiao Jirong, Lin Jinrui and Zhang Yan

(*Beijing Meteorological College, Beijing 100081*)

Abstract By use of data 526 years, the methods of synoptics, climatology and statistics have been investigated for the characteristics of drought and flood that over North China and the Hanshui River valley, and the drought index computed also. The long-range evolvement of regional drought and flood distribution, and the requirement of water resources along the mid-line Water Transfer from South to North China were given.

Key words Water Transfer from South to North China mid-line area drought and flood long-range characteristics