

# 全球水量交换的变化

P.K.克利格

近年来所进行的研究表明,全球水量交换经受了相当大波动。自上世纪以来,气候呈现明显变暖,并于本世纪30—40年代达到最高值,变暖将近 $1^{\circ}\text{C}$ 。然后,到60年代中期,气温出现某些下降,此后气温又略转升高。据M.И.布迪科的资料,在最近12年内气温增高 $0.3^{\circ}\text{C}$ 左右

高纬度地区气温变化的幅度,约比低纬度大3.5倍,这一较大差异是个重要特征,它导致平均南北温度梯度的重要变化。计算表明,北半球气温升高 $0.1^{\circ}\text{C}$ ,就相应地使年平均南北温度减小0.5%。

南北温度梯度决定着大气环流强度特性和大陆上水分收入状况的相应变化。但无论是根据直接的观测资料,还是用水量平衡计算所得的大陆地区大气降水总量的有关研究表明,随着全球性气温的升高,陆地上的降水总量就整体而论都是增加,可近似地表达为

$$X_K = 798.7 + 146.8 \Delta t_{\text{сн}} \text{毫米}$$

同时,从大气降水总量与南北梯度数值变化关系的分析,显示出相反的依存关系,这在大陆内部地区特别突出,可近似地表达为

$$X_K = 801.2 - 285.0 \Delta \gamma_{\text{сн}} \text{毫米}$$

从大气降水与年平均气温距常( $\Delta t_{\text{сн}}$ )和北半球温度梯度( $\Delta \gamma_{\text{сн}}$ )的相关关系,可以得到决定陆地(不包括南极大陆和岛屿)全球大气降水的近似方程

$$X_K = 73.93 \text{ c}10.89 + \Delta t(\text{сн} - 1.94 \Delta \gamma_{\text{сн}}) \text{毫米}$$

对整个陆地地区来说,大气降水

( $X_K$ )距常的多年变化,同样可以考虑用蒸发( $Z_K$ )和河川径流( $\Delta Y_K$ )的水量平衡方程进行一定程度的近似计算。

$$\Delta X_K = (Z_K + \Delta Z_K) + (Y_K + \Delta Y_K) - X_K$$

水量平衡计算表明,本世纪大气降水的多年变化,具有许多特点。

如30年代末到40年代初(变暖时期)大洋上降水有所增加(略多于2%),而在大陆地区(不包括南极大陆和群岛)则降水和南北温度梯度都急剧减少。

斯韦特弗格尔和彼得洛夫等人曾根据南极大陆的多年积雪层,研究了南极大陆每十年降水的时间变化,结果表明,南极冰盖的补给速度从19世纪末到20世纪30年代是加快的,而到40—50年代却减缓了。对属于大洋部分和属于大陆部分的降水量的多年变化过程进行比较表明,随着气候逐渐变暖,大陆部分的降水量开始减少,并在最高温期达到最小值(在2%的范围内),而此时温度梯度也处于最小值。

本世纪总的说来,其特点表现在普遍逐渐变暖的背景下,大陆(不包括南极大陆)降水有少量增加的趋势,每年增长数约为0.25毫米(31立方公里),或0.03%左右。大气降水多年过程的特性,与年平均气温的多年变化,以及年平均气温的南北梯度的关系极为密切。世界大洋水面蒸发随着气温的增高而增强。这些水分在变暖开始时,输向陆地,导致了降水的增加,与此同时,随着温度的增高,使气温南北梯度的距常,出现了明显的变化,在变暖程度达到最大的40年代,南北温度梯度

也达到了最小值。当东西方向温度梯度发生变化时, 从大洋到大陆的水汽输送强度也发生了变化。南北温度梯度的变小, 造成了大气环流强度的削弱, 最终的结果是造成进入内陆地区水汽流的削弱, 和大部分陆地降水的减少。相反的情况发生于50—60年代。

本世纪内蒸发过程也发生了十分显著的变化, 蒸发过程是由各地区热量和水分的对比关系决定的。

不包括南极大陆和群岛的整个陆地地区的年蒸发量, 可用下列方程近似地确定。本方程考虑到陆地的年平均温度 ( $t_k$ )、北半球气温距常 ( $\Delta t_{cn}$ )、年平均河川径流 ( $\bar{Y}_k$ )、平均地下径流 ( $\bar{U}$ ) 和它们的距常 ( $\Delta \bar{Y}$ ,  $\Delta \bar{U}_k$ ) 以及适当的经验系数。

$$Z_k = \frac{\{ 11.5 + 0.03[(\bar{Y}_k + \Delta \bar{Y}_k) + (U_k + \Delta \bar{U}_k)] \} (\bar{t}_k + \Delta t_{cn}) + 3.6}{1 - 0.03(t_k - \Delta t_{cn})}$$

同时也可根据水热平衡方程各要素相互关系的分析, 通过最大可能蒸发量 ( $Z_m$ ) 和大气降水量 ( $X_k$ ) 提出计算蒸发量的公式,

$$Z_k = Z_m \left[ 1 + \left( \frac{X_k}{Z_m} \right)^{-u} \right]^{-\frac{1}{n}}$$

就整个大陆总体而论 (不包括南极大陆和群岛) 下列方程可得十分满意的结果。

$$Z_k = Z_m \left[ 1 + \left( \frac{X_k}{Z_m} \right)^{-2} \right]^{-0.5} - 136$$

这里蒸发力可以经过某些修改的透尔克 (Л. Тюрк) 公式来确定

$$Z_m = 601 + 25 (\bar{t}_k + \Delta t_{cn}) + 0.05 (\bar{t}_k + \Delta t_{cn})^3$$

或按计算  $10^\circ\text{C}$  以上积温 ( $\Sigma \theta > 10^\circ\text{C}$ ) 的方程来求得。例如

$$ZM = 306 + 0.2 \Sigma \theta > 10^\circ\text{C}$$

不包括南极大陆的全部大陆地区 (面积约12510万平方公里), 通过总蒸发量多年过程的计算, 确定其多年平均值为526毫米 (65802立方公里), 其变动距常为39 (1805年) 到22 (1938年) 毫米/年 ( $\pm 6.5\%$ )。从陆地的蒸发总量多年过程中, 可以发现许多可作为特征的时期。如蒸发的增多主要出现于1897—1901、1927—1954、1970—1975年。而减少则主要出现于1881—1896、1902—1920、1955—1969年, 平均周期为16年。同时, 蒸发量以每年0.3毫米 (0.07%) 的趋势增加。陆地地区, 蒸发总量的这些变化是由各个时期内水热资源的对比关系决定的。

河川径流是全球水量交换重要因素之一。河川径流振动的研究表明, 整个河川径流和陆地上的降水总量的变化与气温的波动有极其紧密的关系。当温度升高到一定程度时, 降水和径流就会增多。与此同时, 对个别的自然地理区来说, 情况可能有所不同, 特别是那些位于干燥地带的内陆区。

在个别场合, 大陆径流的减少, 也可能发生在变冷时期, 因当时随着大洋水面蒸发的降低, 而减少进入陆地的水汽, 1884—1888、1917—1921和1962—1967年正是这种情况。

就陆地地区整体而言, 包括内流区在内 (不包括群岛和南极大陆), 河川径流和地下径流的变化为276 (1925年) 到317 (1897, 1976年) 毫米/年, 其变幅为40毫米 (5004立方公里), 其变动范围为河川径流和地下径流多年平均值300毫米或37593立方公里的  $\pm 6.5\%$ , 其中12毫米或1572立方公里属地下径流。

近百年内,全球温度明显地升高,蒸发约以8.8立方公里/年的规模增长,可是整个大陆径流总量本身的变化并未见十分固定的趋向。补偿径流在蒸发方面的损失,是依靠因冰川较为强烈的融化,促使山地河川径流增加的结果,冰川的融化使径流体积每年约增加0.4立方公里,同样,沿海坡地径流增加是大气降水增多的结果。

内流区径流出现相反的趋势,使径流每年约减少8.8立方公里。

直接流入大洋的河流,显示出径流稍微增多的趋向,群岛的径流则出现较显著的增长趋势,每年增加1.2立方公里左右,而这种趋向是由于大洋区大气降水增多的缘故。

内陆区径流的减少,蒸发的增加,降水的某些减少,引起了大陆总温度的降低,特别在内流区更是如此。内流湖容积的收缩和水位的下降就是这一情况的最明显反映。

从对以内流湖水位和面积变动为转移的内流湖总容积增长量变化的计算表明,容积最强烈的收缩发生在增温最多的40年代。在这个时期湖水总支出量可达380立方公里/年。从1890年到1940年湖泊蓄水量几乎缩减了6000立方公里。约占其总容积(176400立方公里)的3.4%。

自60年代中期直到1975年,湖水总容积大约增长了2000立方公里,这种情况与这个时期的降温有关。

1894到1975年整个期间湖水平均收缩约为33立方公里/年(表1)。

大陆地下水储存量的缩减,是本世纪的特点。研究表明,这一缩减过程在20到50年代最为强烈,当时地下水容积大约以每年860立方公里的平均速度减少。地下水储存是的变化,主要是受地球表面的热

力变动所决定的。同时人为的作用日益显得重要,特别是象欧洲和北美地区。

通过增减水量的途径,参与地球表面活跃循环的地球冰盖,在全球水量交换的变化中起着很大的作用。

冰川总径流量约为4300立方公里/年,这个数值的主要部分,来自巨大冰盾的径流。每年自南极大陆进入大洋的水量,约为2200立方公里,来自格陵兰的约为800立方公里,合起来为地球全部河川径流的9%。同时,在格陵兰液态径流几乎占其流量的半数,而在南极大陆,则几乎全部流量都来自冰山的消融(液态径流总共只有15立方公里)。南半球的现代冰山扩展到南纬45—50°,进入世界大洋中的冰山总体积,差不多等于地球河川径流量的一半。

许多冰川学家的研究表明,从19世纪末开始,地球冰盖明显地缩小。1900到1950年,它缩小近10%。北极冰层的平均厚度减小了一倍,而其面积的缩小则超过10%。冰川作用最急剧的削弱发生于本世纪的30—40年代。60—70年代冰川作用的消退速度减缓了,甚至在许多地区还出现了它们的前进时期。这首先是与全球性微小降温和许多地区降水量的增多有关。

从所进行的计算表明,1908到1958年期间,山地冰川储存的水量出现了约以58立方公里/年的速度缩小,北极群岛冰川以37立方公里、格陵兰冰川以275立方公里/年、南极大陆冰川以770立方公里/年的速度缩小的情况。现在这个过程大大地变慢了,虽然冰川的收缩还达170立方公里/年规模。

人类活动对陆地水状况的变化显示出越来越大的影响,这是因为一方面在发展灌溉和扩大水库面积的过程中,因蒸发而明显增加了水分消耗,而另一方面因水利

**表 1 地球表面水圈中的变化**  
〔分子：1908—1958 (51年)，分母1894—1975年(82年)〕

	总 容 积	占 水 圈	容 积 的	总 的	变化部分	变化部分
	立方公里	部 分	变 化	变 化	占总容积	占世界平衡
		(%)	(立方公里/年)	(立方公里)	(%)	(%)
湖 泊	$176.4 \cdot 10^3$	0.01	-74 -33	-3774 -2706	-2.14 -1.53	-8.62 -9.51
地 下 水	$34.6 \cdot 10^6$	2.47	-266 -108	-13566 -8856	$-3.79 \cdot 10^{-3}$ $-0.26 \cdot 10^{-3}$	-23.79 -31.12
陆 地 冰 川	$40.6 \cdot 10^3$	$1.93 \cdot 10^{-3}$	-58 -23	-2958 -1886	-7.29 -4.64	-5.19 -6.63
水 库	$0.8 \cdot 10^3$	$0.19 \cdot 10^{-3}$	-15 +31	+765 +2542	+100.00 +100.00	+1.34 +8.93
陆地(不包括北极和 南极大陆)	$34.4 \cdot 10^6$	2.48	-383 -133	-19533 -10906	-0.06 -0.03	-35.15 -38.33
北极群岛冰川	$83.5 \cdot 10^3$	$0.03 \cdot 10^{-3}$	-37 -6	-1887 -492	-2.26 -0.53	-3.31 -173
格陵兰冰川	$2.3 \cdot 10^6$	0.17	-275 -37	-14025 -3034	-0.61 -0.13	-24.60 -10.66
南极大陆冰川	$21.6 \cdot 10^6$	1.56	-398 -140	-20298 -11480	-0.09 -0.05	-35.60 -40.35
北极群岛和南极大陆	$24.0 \cdot 10^6$	1.73	-710 -183	-36210 -15006	-0.15 -0.06	-63.51 -52.74
整 个 陆 地	$58.4 \cdot 10^6$	4.21	-1093 -316	-55743 -25912	-0.10 -0.04	+98.66 +91.07
世 界 大 洋	$1.34 \cdot 10^9$	96.54	+1093 +316	+55743 +25912	$+4.20 \cdot 10^{-3}$ $+1.94 \cdot 10^{-3}$	+98.66 +91.07
世界大洋和水库	$1.34 \cdot 10^9$	96.54	+1108 +347	+56508 +28454	$+4.26 \cdot 10^{-3}$ $+2.13 \cdot 10^{-3}$	+100.00 +100.00

**表 2 陆地水量平衡 (1894—1975年)**

	大陆(无群岛和南极大陆)			群 岛			全 部 陆 地		
	面积 $F_k = 125.1 \cdot 10^6$ 平方公里			面积 $F_{oc} = 9.6 \cdot 10^6$ 平方公里			面积 $F_c = 149 \cdot 10^6$ 平方公里		
	立方公里	毫 米	占收入的%	立方公里	毫 米	占收入的%	立方公里	毫 米	占收入的%
大气降水	+103262	+825	100.00	+12148	+1266	100.00	119834	+804	100.00
蒸 发	-65802	-526	63.72	-3059	-319	25.18	-69913	-464	58.34
河川径流	-36021	-288	34.88	-8161	-850	67.18	-44.82	-296	36.78
地川径流	-1572	-12	1.52	-928	-97	7.64	-2500	-17	2.09
冰川径流	—	—	—	—	—	—	-3555	-24	2.96
全 径 流	-37593	-300	-36.40	-9089	-947	24.82	-50237	-337	41.92
平均误差	-133	-1	0.12	—	—	—	-316	-2	0.26

建设而进行人工水库的蓄水和陆地水的补充。总之，目前因为水库建设的结果，每年向水库约补充31立方公里的水量。

这样，自1894到1975年期间，由于自然和人为改变陆地地表水和地下水状况的结果，使其储存量出现约以316立方公里/年的平均速度缩减的情况（表2）。这个缩减过程在1918到1950年间最为强烈，当时陆地水储存量的耗损可能平均达到1361立方公里/年。

陆地水量平衡的变化与全球水量平衡的变化有着极为密切的联系，其中也包括与世界大洋水量平衡的联系。

本世纪的变暖应该引起大洋总蒸发的上升和水分循环强度一定程度的增强。计算表明，自上世纪末开始（当时蒸发力距常可达—40毫米左右），迄至本世纪的40年代，大洋总蒸发量有上升的趋势，大概增加了74毫米（近27000立方公里），或占多年（1894—1975年）平均值507153立方公里的5%多一些。60年代以前蒸发量曾出现某些降低（2%左右）

现代较强烈的全球水量交换的变化导致世界大洋容积的明显变动，从1894—1975年，其变动由—10194立方公里（1919

年）到+9344立方公里/年（1914、1941年），平均约为+316立方公里（表3）。大洋水体最大增长出现于1908—1958年，平均达1103立方公里/年左右，假如不建立拦蓄部分地表水的人工水体，则这个数值可达1118立方公里。在1894到1975年间，大洋补充了56253立方公里，约只占大洋水体的 $4.3 \cdot 10^{-3}\%$ 。

大洋表面大气年降水量的近似值可根据世界大洋水量交换基本要素的变化来确定：大洋容积 $\Delta W_o$ 、水位 $\Delta H_o$ 、面积 $F_o$ 、海岸带坡度 $\alpha$ 、蒸发 $Z_o$ 、河川经流 $Y_o$ 、地下经流 $U_o$ 和 $\alpha$ 川经流 $A_o$ ：

$$\Delta W_o = \Delta H_o (F_o + \alpha \Delta H_o),$$

$$X_o = Z_o - Y_o - U_o - A_o + \Delta W_o.$$

大洋表面的大气降水量，同样可以借助计算蒸发量 $Z_o$ 、大洋水体的增长量 $Q_o$ 和海面平均温度的距常 $\Delta t_o$ ，方程来确定

$$X_o = 0.98 (Z_o + Q_o) - 108 (1.48 \times \Delta t_o + 1)$$

1940年以前，多年降水过程增长趋势，多半是以500立方公里/年的平均速度增加，此后，则转为近似同样规模的下降趋势。大洋上降水的最低值大致是在1882、1908、1912和1916年，其降水量约比多年

表3 · 世界大洋水量平衡  
(1894—1975年)

平衡要素	立 方 公 里	毫 米	支 出 %
蒸 发	—507153	—1404	—100.00
大 气 降 水	+ 457232	+ 1263	+ 90.15
河 川 径 流	+ 44182	+ 122	+ 8.71
地 下 径 流	+ 2500	+ 7	+ 0.49
冰 川 径 流	+ 3555	+ 10	+ 0.70
全 径 流	+ 50237	+ 139	+ 9.91
平 衡 闭 差	+ 316	1	+ 0.06

平均值低30—40毫米，而超过多年平均值40多毫米的最高值，是与最大变暖的1938和1941年相合。从1818到1964年，降水的总变化数值范围较小，为±3%。

因此实际资料表明，随着全球温度的升高，不仅在世界大洋水面上大气降水总量出现增长，而且无论在全球或整个大陆区域也都出现增长。但同时必须注意的是，降水在陆地区的分配将有相当大的变化：沿海地区和滨海坡地降水量大为增加，与此同时，内陆地区在大大变暖（1°C）时期降水总量反而减少。

阐明全球水量交换未来可能的变化，是重要问题之一。研究表明这种变化与地球表面气候条件的变动和人类活动对自然过程影响的发展密切联系。

利用自相关函数对全球水量交换要素变率的分析指明：水量交换相对于气候波动存在着一定的滞后现象，如世界大洋水位较全球最大的温度波动滞后11年，地下水位滞后12年，内陆湖平均滞后6年等。这种情况使对各个水量交换要素未来可能变化的预测，具有一定程度的可靠性。

全球水量交换要素的研究表明，各要素的现代变化趋势主要决定于稍为升高的近地表气温（0.5°C）。

计算表明，即是目前存在的气候条件将不再变化，那么也可预料，至少在十年内所构成的水量平衡的变化，仍将保持现有的趋向，这首先与二十世纪的变暖有关，变暖结果使水量交换均衡发生变化。这样，世界大洋水位也将进一步大约以每年1—2毫米的速度持续上升，使大洋水体继续得到补充和陆地地区水储量的相应缩减。

M. И. 布迪科领导下所进行的研究，布勒克尔、默塞尔以及其它的一些学者的研究都表明，由于人为作用结果，可以

预期在未来的2000年前后，全球大概将增温1°C，而在更为遥远的未来则将增温更多。这可能导致全球水量交换系统发生巨大的变化。

对地球表面水 $W_3$ 、大洋水 $W_0$ 、陆地水 $W_c$ 的水体的水量平衡相互关系的研究，再考虑到其相应面积 $F_3$ 、 $F_0$ 、 $F_c$ 的相互关系及它们可能的变化 $\Delta F_0$ 、 $\Delta F_c$ ；大洋水量交换要素：降水量 $X_0$ 、蒸发量 $Z_0$ 、地表水流入量 $Y_0$ 及其期间的变化 $\Delta Y_0$ 、大洋水位 $H_0$ 、 $\Delta H_0$ 、依全球温度距常 $\Delta t$ 为转移的相应的水量交换要素 $X_c$ 、 $Z_c$ 、 $Y_c$ ，温度的南北梯度 $\Delta \gamma$ 和在时间 $T$ 内所有组成要素的变化，都可藉助一系列的水量平衡方程，如下列各式：

$$W_3 = W_0 + W_c,$$

$$F_c = \frac{F_3 (Z_0 - X_0)}{Y_0 + \Delta Y_0 + Z_0 - X_0},$$

$$T = \frac{1}{Z_0 - X_0 - Y_0} \left\{ H_0 - \frac{F_c Y_c}{\frac{\Delta F_c}{\Delta H_0} (Z_0 - X_0 - Y_0)} \right\}$$

$$\times \ln \left[ \frac{1 + H_0 \frac{\Delta F_c}{\Delta H_0} (Z_0 - X_0 - Y_0)}{(X_c - Z_c - Y_c) \frac{\Delta F_c}{\Delta H_0} + F_c Y_c} \right]$$

以及有关方程：

$$H_0 = f(\Delta t), \quad X_c = f(\Delta t, \Delta \gamma, \Delta Y_c),$$

$$Z_0 = f(\Delta t), \quad Z_c = f(\Delta t, X_c, Y_c),$$

$$X_0 = f(Z_0, H_0, \Delta t), \quad Y_c = (X_c, Z_c),$$

应该指示，根据水量交换的可能变化所得的结果，当然只是反映最一般的特征，它可能是具体区域更真实变化的背景。比方说，虽然陆地上的降水总的说来在变暖时是增加的；然而在内陆区域，由于变暖时因温度的均匀化，使大气环流强度削弱，降水可能减少。所得结论也未考虑到在变暖时期冰雪复盖面积的逐渐缩

# 关于农作物的旱灾问题

松田昭美

## 一、关于干旱的气候学研究

**1 干旱季节** 一年中无降水持续时间长的季节，通常在夏季和冬季较多。春秋季节由于移动性高气压、低气压频繁地通过，天气变化很大，无降水日持续的时间不太长。

在夏季太平洋高气压异常迅速发展发展的情况下形成梅雨期无雨，即是有雨，也因为梅雨期短，降水量少，而发生干旱。在梅雨期后，太平洋高气压的势力加强，如无台风袭来便发生盛夏的干旱。1939年及1967年在日本西部出现的大旱灾就是一例。

其次在冬季，西伯利亚高气压势力很强，如果这种气压分布状态持续很久，在太平洋沿岸无降水日也就会持续很久。但是与夏季相比气温较低，而且植物生长活动不旺盛，所以农作物受害也较轻。因此农作物的干旱灾害主要发生在夏季。根据统计和调查，多发生在日本西部。

根据正务等人的调查，图1所表示的无降水持续日数再现期间的地理分布可说



图1 夏季（7—8月）无降水持续日数的地理分布 L: 长的地区, S: 短的地区

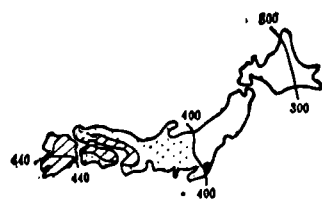


图2 夏季（6—8月）的可能蒸散量（毫米）  
明这点。图2是根据今山的调查，表示可能蒸散的地理分布，从水消耗的观点来看，由于干旱引起水分不足大部分是在日本西部。

**2 夏季干旱与降水量** 根据对降水量和夏季干旱的调查，如果降水量减少到

小，它无论对蒸发过程或热量交换都可能有一定的影响。同样也没有考虑到大气圈内水汽含量和云量的增加，会减弱温度和蒸发增高作用，也未考虑到现在还没有对其影响予以足够正确估价的某些别别的要素。

变暖也可导致在水量交换中其它的一

些重大变化。例如，可能出现南极大陆西部冰盖的瓦解，使世大洋大大到补充，引起大洋水位以每年十厘米的速度猛烈升高。

马瑞俊译自《Метеорология

и гидрология》

1982年第5期，黄大荣校）