氣 象 學 報
第25卷第3期 1954年9月

蘇聯氣象學者在水份循環方面的研究*

楊鑑初
（中國科學院地球物理研究所）

目 次

一、緒說
二、地球上水份循環總的情況
三、內、外水份循環與水份循環的計算
四、水份循環與大氣環流的關係
五、結語

一、緒 說

爲了實現偉大的斯大林改造自然的計劃，加速地進行共產主義建設，蘇聯的氣象學者進行了一系列的關於自然界中水份循環問題的研究。顯然，要改造乾旱地區的氣候，首先必須對該地氣候的實際情況加以了解。爲此必須掌握該地大量的全面的氣候資料，然後進行分析研究，要求獲得形成這些地區氣候的基本原因，以及在相當長的時期中氣候演變的規律。尤其要弄明白這些地區產生降水的天氣條件，要明白隨大氣環流輸送到那裏的水份總量究竟有多少，當地地表蒸發出來的水份量又有多少，大氣中的水份有多少被分離出來形成降水降落於地面，降落的雨水從河道中流走的又佔多少；此外，當地蒸發出來的水份中究竟有多少重新形成降水再降落於該地區。顯然，這些問題需要先大致研究清楚，方能進一步談到如何來改造氣候，如何來進行一些有效措施以增加當地空氣中的水份含量，甚至希望能够增加當地的降水量，最後目的要求增加收穫量來豐富人民的生活。

由此可見，研究自然界中水份循環的問題，不僅是水文氣象學和氣候學中的主要問題而且對水土保持、水力發電、林木栽植等一切有關工農業及水利、運輸、交通、林墾、牧畜等事業方面有重大的意義。所以水份循環的研究，一方面是氣

* 中國科學院地球物理研究所論著第255號。

象學所要求解決的一個複雜的理論問題，同時另一方面也是國民經濟建設事業中迫切需要解決的一個有實際意義的問題。

現在，我們國家在過渡到社會主義的時期中正在大力建設國家的重工業，並在國民經濟建設事業的各個方面都有了很大的進展，像“開發黃河”這樣艱巨而偉大的任務，有關部門也已經提出了具體的計劃。氣象工作者爲了密切配合國家的建設事業，很明顯的像水份循環這樣重要的問題很快就會成爲我們追求解決的主要對象之一。

但是由於我國過去的水文氣象資料殘缺不全，目前還未能直接來計算我國各重要地區水份循環的各個因子。然而爲了做好準備工作，我們需要先對蘇聯的先進理論和先進經驗加以學習，以便結合我國具體情況想出辦法來解決我們的問題。我們知道，近十年以來蘇聯氣象學者對水份循環的研究非常重視，而且已有顯著的研究成績。本文目的即在介紹蘇聯學者在這方面的研究成果。但由於作者在這方面的學習很不足，介紹的內容難免掛一漏萬，請讀者同志多提意見以補不足。

二、地球上水份循環總的情況

早在十九世紀末年，權威的俄羅斯氣候學家華也可夫 (А. И. Воейков) 就注意到水份循環的問題[1]。他注意到陸地上的蒸發作用對形成降水的影響，並認識到隨大氣環流自遠方携帶來的水份對形成降水的重要性。可是在華也可夫的時代，由於大氣環流的資料和水份輸送量的資料還很欠缺，所以他理會到在他那個時候還不能够來進行水份循環方面量的計算工作。到了 1933 年卡明斯基 (А. А. Каминский)[2]應用地面天氣圖研究內陸上水份的輸送問題，也指出蘇聯歐洲部份的水份主要是極地海洋氣團從大西洋輸送來的。1934 年西書可夫 (В. Р. Шишков)[3]又把卡明斯基的方法加以改進。以後在 1948 年菁節爾林格 (В. В. Цинзерлинг)[4]又發表關於水份循環的研究工作，但由於他的假設缺少物理基礎[5]，其結果並沒有被普遍採用。1947 年以來蘇聯學者客辛 (К. И. Кашин)、帕哥香 (Х. П. Погосян)、布提可 (М. И. Будыко) 和特洛氏讀夫 (О. А. Дроздов) 等位發表了一系列的研究報告，利用廣泛的氣象資料水文資料以及高空觀測資料進行水份循環的計算，得到許多重要結果。這類工作仍在蘇聯水文氣象總局科學研究所及其他有關單位內繼續進行着。本文即根據他們已經完成的研究結果作一綜合性介紹。

從地球上整個情況來考慮，從海洋和大陸表面蒸發出來加入到大氣中的水份量與大氣中的水份通過一定的物理過程產生各種形式的降水（雨、雪、雹等）重新降落於地球表面，其間的相互關係以及複雜過程便是我們所要研究的水份循環的基本問題。根據調查的結果，地球上各大洋的水面高度幾百年來幾乎是不變的，因此我們可以認爲地球上的水份總量，包括氣體液體和固體三種狀態的水份總量，在有史時代以來是一個常數。自從水文與氣象觀測在世界各地建立以來，在大陸上也並沒有發現總水量有什麼增減的現象，只在個別年份發現某些變動；而且多年來各河道中流入海洋的平均逕流量（сток）事實上也是一個常數，因此也可以證明地球上水份總量是一常數的結論是正確的。

根據上述這些事實，對自然界中的水份循環我們就可以確定它的某些方式。首先，在相當長的時間中（以年爲單位時間）降落到地球表面的總降水量就應等於地球表面的總蒸發量，即

$$\Sigma O=\Sigma H, \qquad (1)$$

(1) 式中 O 代表降水量，H 代表蒸發量。

因爲對整個地球來說，既然總的水份是一常數，而且大陸上的總水量在長時期中沒有增減現象，海洋水面的高度又沒有變化，那麼從地球面上蒸發出來到大氣中去的水份總量顯然要同自大氣中降落到地面的總降水量相等。但考慮到海洋和大陸之間水份循環的時候，我們更應該把大陸上河道中流入海洋的逕流總量計算進去。當然，海洋和大陸之間還有地下水的交換作用，但按照蘇聯學者的最新觀點，地下逕流的水量比之地面上的逕流量要小得多了[6]。

現在以 O_0 表示海洋上的降水總量，C 表示河道中流入海洋的逕流總量，H_0 表示海洋上的蒸發總量，則知海洋上得到的水份總量應爲 O_0+C，而海洋上失去的水份總量即爲 H_0，故對全世界的海洋來說，其水份平衡便是：

$$O_0+C=H_0. \qquad (2)$$

對大陸來說，除了內陸流域不計外（因爲在內陸流域河中逕流並不注入海洋只注入內海，如中亞的裏海流域便是例子），它的水份平衡成爲：

$$O_C-C=H_C, \qquad (3)$$

同樣，(3) 式中 O_C 表示大陸上的降水總量，H_C 表示大陸上的蒸發總量，C 仍爲河道中流入海洋的逕流總量。

單對內陸流域來說，其水份循環的方式應該使當地的降水量等於當地的蒸發

量，即

$$O_M = H_M \qquad (4)$$

(4) 式中 O_M 爲內陸流域的降水總量，H_M 爲內陸流域的蒸發總量。

因此，把 (2)，(3)，(4) 三個式子相加即得整個地球上的水份平衡，成爲：

$$O_0 + O_C + O_M = H_0 + H_C + H_M. \qquad (5)$$

第 (5) 式中各個項目的直接測量是很困難的，尤其是海洋面上蒸發量的觀測更難得到，關於極地區域、沙漠中以及其他地球上無人居住的區域，水份平衡的資料就更缺少了。蘇聯氣象學者 O. A. 特洛氏讀夫[7]曾搜集北半球一切可用的資料，按照一定的假設，計算了北半球海洋和大陸上各緯度間隔中的降水量、蒸發量及逕流量的數值，如下表所示：

北半球各緯度間隔中的水份平衡表（單位：厘米/年）

緯度	大陸			海洋			全北半球		
	O_c	H_c	C_c	O_0	H_0	C_0	O	H	C
0—10°	168	112	56	139	110	29	145	110	35
10—20°	76	57	19	87	135	−48	84	114	−30
20—30°	51	37	14	63	130	−67	59	95	−36
30—40°	50	41	9	78	115	−37	66	83	−17
40—50°	56	37	19	94	70	24	74	53	21
50—60°	51	23	28	78	60	18	63	39	24
60—90°	30	10	20	24	15	9	27	12	15
0—90°	63	41	22	87	101	−14	77	77	0

從表中可知：(1) 在北半球的大陸上，無論高低緯度降水量皆比同緯度的蒸發量爲大；大陸上各緯度地區蒸發量與逕流量之和等於大陸上的降水量。(2) 在北半球的海洋上，在低緯度 (0—10°) 與高緯度 (40—90°) 降水量仍大於蒸發量，但在中緯度 (10—40°) 蒸發量便大於降水量；以整個北半球海洋來說，蒸發量是大於降水量的。(3) 全部北半球上的蒸發總量和降水總量相等；同時主要由於受了海洋的影響，使得北半球低緯度與高緯度的降水量也大於蒸發量，而在中緯度則蒸發量大於降水量。

現在進一步來分析地球上各個地方蒸發與降水之間的關係。這種關係在海洋

上和在大陸上有很大的差別。我們知道，在洋面上的蒸發過程幾乎同洋面上的降水很少發生密切依存的關係，因爲在洋面上蒸發掉的水份立即就被從隣近部份流來的水所補充；而且蒸發作用也不至於使海洋表層的鹽份濃度增加多少，所以不會影響到蒸發作用的繼續進行。在陸地上條件就完全不同了，大陸上無限制的蒸發條件是比較少見的。在乾旱地區由於降水量缺少，可能蒸發的水份也就受到限制，僅在有河流或湖泊的地區蒸發量才較大。在低緯度地帶，大陸上蒸發量的變化通常與降水量的多少是一致的。就是說，降水量愈多則蒸發量也愈大，降水量愈少則蒸發量也愈小。在高緯度地帶，因爲蒸發作用所需要的熱量供應很不足，所以那裏的蒸發量就遠遠落後於當地的降水量。一般而論，不論是在大陸上還是在海洋上，蒸發量都是隨緯度的增高而減少的，主要的原因仍在於蒸發所需要的熱量供應在緯度愈高的地方愈感不足所致。上述各種情況在附表中皆可明白辨認。

在赤道和中緯度地帶以及部份極地區域，由於大氣環流的特性造成了對產生降水的有利條件。在高緯度降水量通常是減少的，顯然這是因爲那裏空氣的溫度低，所以空氣中的水份含量也就不足。在副熱帶緯度地帶由於副熱帶高氣壓的出現，對形成降水的條件很不利；因此在副熱帶高氣壓出現的地區降水量大爲減少。在赤道地帶降水量很多，蒸發量也大，但大量蒸發所需要的熱量供應仍感不足；因此在赤道地帶無論海洋上和大陸上降水量仍比蒸發量爲大，而且海陸之間蒸發量的差別也並不顯著。

特別是在副熱帶 20—40 度緯度地帶，降水與蒸發的情況在海陸之間有很大的差別。在大陸上由於降水量減少所以蒸發量也隨之減少，尤其在內陸流域以及沙漠地區，那裏降水量與蒸發量的差別幾乎等於零。可是在海洋上情況就完全不同了，因爲在副熱帶的緯度地帶海洋上經常出現着準靜止的高氣壓，空氣乾燥而且雲量很少日照很强，蒸發的條件很是有利，因此在那裏蒸發量是很可觀的。所以那裏的蒸發量就遠遠超過了降水量，而且使得空氣中積貯了許多的水份含量。一方面這些蒸發出來的水份隨信風環流向南輸送到赤道去，另一方面又隨副熱帶海洋氣流向北輸送到中緯度去。因此，副熱帶高氣壓所在的洋面是供給大氣大量水份的源地，對整個地球的水份循環起了顯著作用的。

關於整個地球上水份平衡中各個項目的定量計算，蘇聯氣象學者布提可和李華維契（М. И. Львович）曾做過計算[6]。根據他們計算的結果，全世界海洋面上

一年中降落的降水量 O_0 估計約達 412×10^3 立方公里的水，就相當於在海洋面上平均深度 1140 毫米的降水；一年中流入海洋的河道逕流總量 C 估計約達 36×10^3 立方公里的水，相當於在海洋面上平均深度 100 毫米的水。因此全世界海洋面上一年中的蒸發總量 H_0 便爲上述兩個數量的和，即等於 448×10^3 立方公里，或相當於平均深度 1240 毫米。

全世界大陸上一年中的降水、逕流及蒸發，他們計算的結果爲：$O_C=99\times10^3$ 立方公里（850 毫米），$C=36\times10^3$ 立方公里（在大陸面上相當於平均深度 310 毫米），$H_C=63\times10^3$ 立方公里（540 毫米）。在內陸流域 $O_M=H_M=8\times10^3$ 立方公里。

由此可見，一年中地球上參加水份循環的水份總量實在是很可觀的，但這樣大的水份量我們很難具體想像它的大小程度，做一個比較也許就容易明白一些。例如，黑海或裏海海中所貯存的總水量約達 70×10^3 立方公里，那麼可以想見地球上一年中的蒸發總量（$H_0+H_C+H_M=519\times10^3$ 立方公里）就比整個黑海海中的水要大上七倍多了，一年中大陸上流到海洋裏去的逕流也約合半個黑海的海水。

按照上述結果，地球上的水份循環可用圖 1 的簡單表示方法來說明。圖中以

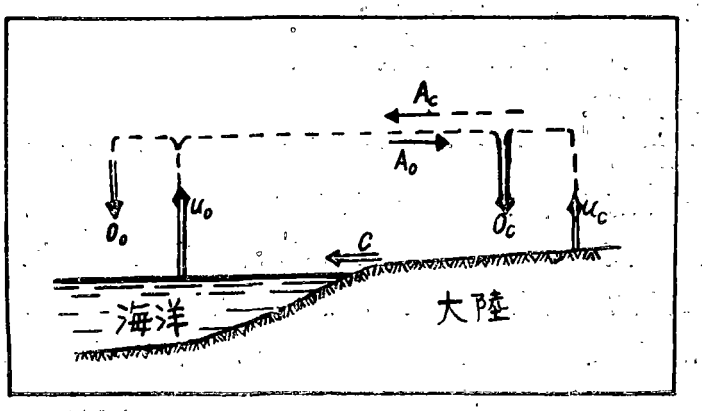

圖 1

箭頭的長短表示出來海洋上的蒸發量超過降水量，而海洋上蒸發出來的水份其中一部份隨大氣環流帶到大陸上來形成大陸上的降水。大陸上降水的一部份又通過地面逕流滙集於各河道，再從河道中流返海洋裏去，因此保持了海洋上的水份平衡。

在這樣簡化了的表示方法中，我們必須指出還有一個很重要的因子尚沒有被考慮進去，這便是在海陸之間大氣中水份的相互交換情況。對總的水份平衡來說，自海洋輸送到大陸上的水份固然即等於逕流總量（36×10^3立方公里），但是如對這個問題加以更進一步的研究，就可以發現大陸上降水量超過蒸發量的原因乃由於兩種氣流（一自海洋吹向大陸，一自大陸吹向海洋）其所包含的水份有差別所致。如果我們考慮大陸上某一有限地區的話，該地產生的降水主要還是由於海洋上吹來的濕空氣所造成，地方性蒸發出來的水份則大都隨氣流携出該地區之外，甚至從大陸上一直帶到海洋上去了。

因此，在圖1的水份循環方式中，應該考慮到大氣中的水份輸送情況。自大陸吹向海洋的氣流中其所含水份在圖中以A_C表示，自海洋吹向大陸的氣流中其所含水份以A_0表示，故A_0-A_C顯然也就等於河道中逕流總量C。

三、內、外水份循環與水份循環的計算

上面所講的海洋和大陸之間的水份交換，蘇聯學者稱之爲"外水份循環"(внешний влагооборот)。在大陸上還有大陸本身的水份循環，則稱爲"內水份循環"(Внутренний влагооборот)。隨海洋氣流來到大陸上的水氣，通過一定的大氣物理過程形成雲雨並產生了降水，降水落在大陸地面其中一部份又因陸地上的蒸發作用重新回到大氣中去，而且這一部份水份又可作爲形成降水的來源。大陸上蒸發出來的水份重新形成降水降落大陸地面，這種相互關係便稱爲內水份循環。

外水份循環與大陸上內水份循環之間的關係，是我們所要研究的要點之一，因爲這有很大的實際意義。大陸上的降水中其蒸發愈大則返回大氣中的水氣也愈多，那麼陸地上降落的降水也可能更多。卡舍脫懇（И. И. Касаткин）經過一系列的研究工作之後曾提出這樣的見解，認爲如應用農業技術上一些措施便可以大量提高蒸發量，因此大陸上的降水量也就可以增加[6]。卡舍脫懇的見解原則上是正確的，但他沒有進行定量的估計。近來經過客辛、帕哥香以及布提可和特洛氏讀夫等位的研究，關於大陸上內水份循環這個複雜的問題已經得到了完全新穎的解釋[8]。在他們的研究結果中說明了隨海洋氣流輸送來的外來水份與地方性蒸發出來的內部水份對大陸上降水所起的作用。

當研究整個地球上水份循環的時候，可以考慮大氣中的水份總量是不變的，

因此得到地球上的降水總量與蒸發總量相等的結論。但是如果研究大陸上某一地區的時候，存在的問題就要複雜得多。假如我們選取陸地上某一定區域作爲研究的對象，如圖 2 所示。在這個區域中自海洋來的水份用 A_0 表示，由於海洋水份

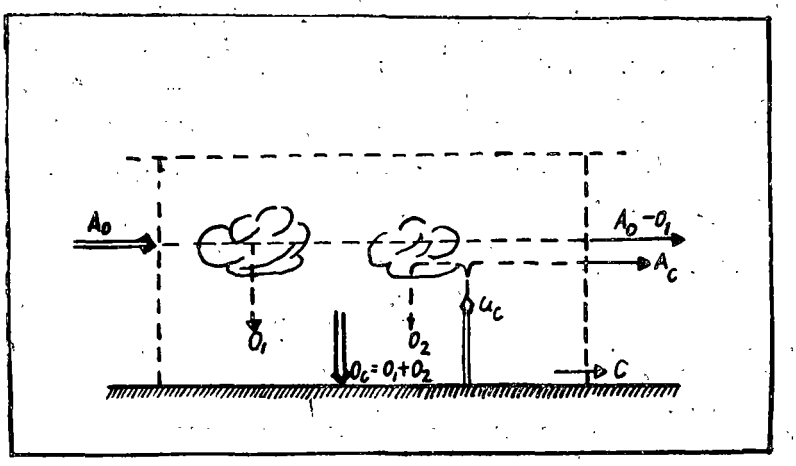

圖 2

在該地產生的降水以 O_1 表示，海洋水份 A_0 減去降水 O_1 即爲餘下來的海洋水份 (A_0-O_1)，它便隨着氣流的運行及其雲層一併移出這個地區之外去了。該地蒸發出來的水份以 H_C 表示，由於當地蒸發水份所產生的該地降水以 O_2 表示，H_C-O_2 即爲餘下來的水份也隨氣流移出這個地區之外，這部份水份以 A_C 表示，蘇聯學者稱之爲 "大氣的逕流"。

因此，在這個地區隨海洋氣流進入的水份爲 A_0，而被氣流帶走的水份即等於 $A_0-O_1+A_C$。如果再把河道中逕流也計算在內，則總的外來水份平衡便成爲：

$$A_0=A_0-O_1+A_C+C \qquad (6)$$

或

$$O_1=A_C+C. \qquad (7)$$

(7) 式即表明在大陸上某一定地區，其由於外來水份（隨海洋氣流進入的水份）所產生的降水等於大氣的逕流與河道中的逕流之和。這個公式成爲決定大陸上水份循環問題的基礎。對整個地球來說，既然大氣中的水份總量是不變的，那麼 A_C 應該等於零，則 $O_1=C$，就是說大陸上外來水份所產生的降水決定了河道中的逕流。以上的討論皆假定是在某一相當長的時期之內所發生的，大都以年爲時間單位。

對整個大陸來說，可用下述方法來估計它的水份循環。大陸上降水總量 O_C

其中包括由於外來水份所產生的降水 O_1, O_C 與 O_1 比值的大小即可決定大陸上的降水由於外來水份所產生的部份究竟佔多少。使 $K=\frac{O_C}{O_1}$, K 即被稱爲水份的循環係數。假如不考慮大氣中的逕流，則根據上文所提到的數字便可計算 K 的值。例如大陸上年降水總量爲 99×10^3 立方公里，大陸上年蒸發總量爲 63×10^3 立方公里，故由於外來水份產生的降水 $O_1=C=99\times10^3-63\times10^3=36\times10^3$ 立方公里。那麼 $K=\frac{O_C}{O_1}=\frac{99}{36}\simeq3$。這就是說由於外來水份產生的大陸降水只約佔大陸上降水總量的 1/3 而已。但是這樣的計算完全不考慮大氣中的逕流是不正確的。

按照 M. И. 布提可的假定來計算水份循環係數則較接近眞相。他認爲水份循環被地球上總蒸發量與海洋上蒸發量之比所決定，即

$$K=\frac{H_0+H_C}{H_0}=1+\frac{H_C}{H_0},$$

已知 $H_C=63\times10^3$ 立方公里，$H_0=448\times10^3$ 立方公里，故 $K=1+\frac{63}{448}=1.14$。從此就得到這樣的結論，即大陸上降水的絕大部份是由外來水份所產生的，大陸上蒸發的水份所產生的大陸降水只有 14% 而已。

雖然如此，地方性蒸發對陸地上降水的形成仍起着重要的作用。根據布提可和特洛氏讀夫最近發表的研究結果[9]，假定地方性蒸發完全停止的話，則將使降水量減少 31%，在春季與夏季甚至可以使降水量減少 57—74%。可見由於地方性蒸發的水份所產生的陸地降水雖不多，但它的作用一方面增加了當時大氣中的水份含量，同時另一方面改變了大氣中的物理狀態，因此使得對產生降水有利的條件可能存在。由此更可推論，如果改變地面的植被狀況並改良土壤，就可改變地面的蒸發條件，以至於相當地改變降水量。

要實際計算陸地上某一定地區的水份循環，必須應用高空觀測資料計算隨氣流輸送到該地的水份總量究竟有多少。然後計算當地降水量、蒸發量及河中逕流各佔隨氣流輸送到該地水份總量的百分比。1950 年客辛和帕哥香[10]計算蘇聯歐洲部份中央平原地區屋客河（Ока）流域的水份循環是一個很出色的例子。因爲在屋客河流域具有比較完備的水文資料以及地面和高空觀測資料，所以計算的結果也比較接近眞相。屋客河流域的面積爲 244×10^3 平方公里，東西長度約爲 600 公里，南北寬度約爲 400 公里。屋客河流域平均年降水量爲 550 毫米，即相當於 134.2 立方公里的水。而屋客河流域平均全年逕流總量爲 33.2 立方公里。由此可知該流域的平均全年蒸發總量應等於 $134.2-33.2=101.0$ 立方公里。

屋客河流域全年隨氣流輸送來的水份總量係根據莫斯科各月高空平均比濕的資料來計算，計算到5公里高度爲止。因爲空氣中的水份含量絕大部份在5公里以下的氣層中，在5公里以上的水份含量可以略而不計。先求出單位氣柱中的水份含量，乘以平均氣流輸送速度即可求出輸送水份的總量。計算的結果在屋客河流域全年隨氣流輸送來的水份總量等於1285.0立方公里的水。

由此可見，一年中隨氣流輸送到屋客河流域的水份要比當地蒸發出來的水份大得多，幾乎要大13倍光景。而且當地的降水量也不過佔隨氣流輸送水份的大約1/10而已。所以，外來水份的絕大部份仍舊隨氣流輸出屋客河流域之外去了。屋客河流域降水，蒸發及逕流佔外來水份的百分比如下：降水10.5%，蒸發7.9%，逕流2.6%。

根據這些數字可以想見，像在屋客河流域這樣大的一個地域上，降水、逕流和蒸發所佔隨氣流輸送進來水份總量的比是不大的，因此客辛和帕哥香得出這樣的結論：只有在面積很大的地域上蒸發才能對運動着的氣流起顯著的潤濕作用。當流域長度等於600公里如屋客河流域，當地蒸發水份僅約佔空氣中輸送來水份的8%，這就是降水降落之後重新回到空氣中去的水份。如果氣流經過的地域面積愈大，則當地蒸發所起的作用也隨之增大。

帕哥香等位也曾計算過地域範圍更大的像蘇聯歐洲部份全部這樣大面積上的水份循環。爲了計算隨氣流輸送到蘇聯歐洲部份的水份總量，他們先假定輸送來的水份量等於通過垂直於東西方向剖面上的水份量，而與水份的來源無關。這個垂直剖面選在蘇聯歐洲部份的西界上，沿着東經25度的子午綫在北緯43—68度之間，設想那裏有一座高度爲5公里的牆壁。然後根據高空的濕度觀測紀錄，得出比濕隨高度的平均分佈和各季的平均分佈。通過比較研究認爲用700毫貝等壓面上的平均風速作爲氣流輸送的平均速度是合適的。這樣計算的結果，一年中隨氣流輸送到蘇聯歐洲部份的水份總量便等於8507立方公里。

而蘇聯歐洲部份各河流域的總面積約爲6500×10^3平方公里，每年各河流的逕流總量爲928立方公里[11]，平均年降水量約爲480毫米或相當於3120立方公里，於是該地區的全年蒸發總量便爲$3120-928=2192$立方公里。因此就可以算出蘇聯歐洲部份的降水量佔隨氣流輸送來的水份總量的37%，逕流佔11%，蒸發則佔26%。

從這些計算出來的數字中可以想見，像在蘇聯歐洲部份這樣大的地域中，水

份平衡中各個項目所表現的作用狀況。而且隨氣流輸送來的水份量8507立方公里中，通過水份循環最後在河道中以逕流流出去的水份只有928立方公里，即佔11%，而其餘絕大部份的水份即8507－928＝7579立方公里，仍隨氣流輸出蘇聯歐洲部份之外去了。也就是說在蘇聯歐洲部份的東邊，通過想像的沿子午綫的垂直剖面而流出去了。

把一定地區水份平衡中的各個項目（降水、蒸發、逕流）和隨氣流輸送到該地區的水份相比較，計算出各個項目所佔的百分比；因此進一步要來解決我們的重要問題，就是在當地的降水量O_C中究竟有多少是由於外來水份所造成（外來降水O_1），又有多少是由於當地蒸發水份所造成（內部降水O_2），最後要求決定水份循環係數$K=\frac{O_C}{O_1}$。

我們先要深入討論當地蒸發水份的作用問題。例如在蘇聯歐洲部分的地域上，其蒸發出來的水份當然會不斷地隨氣流輸送出該地域之外去。但在氣流進入該地的入口處，那裏蒸發出來的水份就會被氣流帶着流過整個地域；可是在氣流流出該地的出口處，那裏蒸發出來的水份勢必立即被氣流帶出該地，故不可能經過該地域了。因此就可以認爲，該地域所有蒸發出來的水份質點，在該地平均經過的路程只等於該地域長度的一半。也就是說蒸發水份中只有一半是經過該地域全部路程的。所以，在蘇聯歐洲部份蒸發出來的水份2192立方公里中只有一半是通過整個地域的，即等於1096立方公里。

因而，已知蘇聯歐洲部份的外來水份爲8507立方公里，有效的蒸發水份應爲1096立方公里，兩者之比便爲：$\frac{A_0}{H_C}=\frac{8507}{1096}=7.7$。

對屋客河流域來說即爲：$\frac{A_0}{H_C}=\frac{1285}{50.5}=25.4$。

我們知道，在大氣中因不斷地有湍流的交換作用，故使得外來水份與當地蒸發水份發生混和。按照布提可與特洛氏讀夫研究的結果，認爲在某一定時期之內由於外來水份所產生的降水與由於當地蒸發水份所產生的降水之比，等於外來水份與當地有效的蒸發水份之比，即

$$\frac{O_1}{O_C-O_1}=\frac{A_0}{H_C}. \qquad (8)$$

第(8)式的關係並不能認爲降水量與空氣中所包含的水份量是綫性關係，它僅說明由於外來水份與當地蒸發水份所產生的降水量之間的關係正如參加作用的外來水份量與當地蒸發水份量之間的關係而已。

根據這種關係，就可計算由於外來水份所產生的降水量 O_1，及由於當地蒸發水份所產生的降水量 O_2 $(=O_C-O_1)$。

即以蘇聯歐洲部份的例子來說，就成爲：

$$\frac{A_0}{H_C}=\frac{O_1}{O_C-O_1}=7.7,$$

已知 $O_C=480$ 毫米或 3120 立方公里，故 $O_1=425$ 毫米或 2760 立方公里，$O_2=55$ 毫米或 360 立方公里。

再根據上述第 (7) 式，即可求出大氣中的逕流 A_C，$A_C=O_1-C=2760-928=1832$ 立方公里。

因此蘇聯歐洲部份的水份循環係數即爲：

$$K=\frac{O_C}{O_1}=\frac{3120}{2760}=1.13.$$

從此可知，由於當地蒸發水份所產生的降水重新降落於該地域上的僅約佔 13% 而已。

同樣，根據客辛和帕哥香的計算結果，屋客河流域的水份循環係數便等於 1.05。故知像在屋客河流域這麼大的地區上，當地蒸發水份所產生的降水就更少了，只佔 5% 而已。

蘇聯歐洲部份與屋客河流域水份平衡各個項目的計算結果是相當一致的，因爲屋客河流域東西長度約爲 600 公里，與屋客河流域同緯度的蘇聯歐洲部份的東西長度約爲 2000 公里，故後者約爲前者的 3.3 倍。若將屋客河流域的降水、逕流及蒸發皆乘 3.3，則其結果便與蘇聯歐洲部份上的降水、逕流、蒸發數值相近。

此外，布提可與特洛氏讀夫用稍爲不同的方法計算蘇聯歐洲部份的水份循環係數，也得到幾乎相等的結果。他們根據高空紀錄先求出大氣中年平均水份含量爲 1.2 克/平方厘米，大氣的年平均輸送速度爲 30 公里/小時。已知蘇聯歐洲部份東西長度爲 2000—2500 公里，故携帶外來水份的氣流從西界進入蘇聯歐洲部份，經過全區再從東界出去共需時間不過 3—4 天。

我們知道蘇聯歐洲部份所在的緯度地帶主要是在西風帶內，故氣流運行主要是自西向東的，外來水份一旦隨氣流輸出本地區之後重新回到原地來的很少，據估計僅佔全部水份的八分之一。所以在蘇聯歐洲部份平均每三天至少有八分之七的外來水份要被替換出去。從此即可求得一年中該地區單位面積上大氣中通過的水份含量應爲：$\frac{365}{3}\times\frac{7}{8}\times1.2=128$ 克/平方厘米。

在蘇聯歐洲部份每年蒸發出來的水份約相當於31克/平方厘米，其中一半應與當地產生的降水量有關（上文已有說明），即約合16克/平方厘米。因此，代入上述第(8)式，即得$\frac{O_1}{O_C-O_1}=\frac{128}{16}=8.0$。因$O_C=48$厘米/年，便可求得$O_1=42$厘米/年，$O_2=6$厘米/年。

故水份循環係數$K=\frac{O_C}{O_1}=1.14$。

布提可與特洛氏讀夫又假定平均氣流速度如果減少33—35%的話，則可計算外來水份年總量將減爲5650立方公里（原爲8507立方公里），因而外來水份與當地蒸發水份之比成爲$\frac{5650}{1096}=5.1$，K即等於1.19，比原來1.14增加了百分之五。由此可見，即使把氣流輸送速度減少三分之一，對水份循環係數也並沒有顯著的增加。

上述四位蘇聯學者研究的結果，獲得同樣的結論：陸地上有限地區的地方性蒸發對當地降水的影響並不大。也就是說，在有限地區地方性蒸發水份所產生的降水比外來水份所產生的降水要小得多。

近幾年來由於資料不斷增加，在蘇聯不但可以計算多年平均狀況下的水份循環，而且也有條件對每年各季甚至對個別的天氣過程中水份循環加以定量的計算[11]。

四、水份循環與大氣環流的關係

研究自然界中水份循環必須聯系大氣環流，因爲水份是隨着氣流而輸送到各地去的。而且各地產生降水的多少與環流的特性有密切關係。蘇聯氣象學者研究水份循環時常與大氣環流的性質結合起來討論，這是完全正確的。

大陸上降水量的分佈是由許多因子來決定的，如緯度高低、地形性質、天氣系統發展的狀況等等皆對降水量分佈有顯著影響。其中最主要的因子乃爲自海洋輸送來氣流中的水份含量。因此要分析大陸上多年平均降水量的分佈，必須從大陸上大氣環流的特性出發。例如在歐洲，降水量一般是自西向東減少的，至於在高地與山脈地區降水也是比較多的，這樣的降水量分佈即由於歐洲大氣環流的方向主要是自西向東的緣故。

降水量的區域分佈不僅與水平方向的氣流運動有關，而且更與氣團的垂直運動有密切關係。我們知道，氣團的上升運動能使空氣發生動力冷却，因此空氣中所包含的水份就可以發生凝結而產生雲雨；氣團的下沉運動則發生動力加熱，就

使得即使原來已經達到飽和狀態的空氣也會消失飽和狀態，因而消失了產生凝結的條件。在氣旋系統中由於下層有氣流的輻合作用，所以盛行着空氣的上升運動；在反氣旋系統中由於下層有氣流輻散所以產生空氣的下沉運動。故在中緯度與高緯度，降水量的分佈顯然與氣旋形環流及反氣旋形環流中那一種佔優勢有很大關係。此外，當大氣的層結不穩定的時候，熱力對流作用所產生的上升氣流超過因環流特性而引起的下沉氣流時，則也可以產生降水。但是大氣的不穩定層結只是發生對流性降水的必要條件，還不是充份條件。例如在蘇聯南部及中亞的乾旱地區，夏半年大氣的層結經常是在不穩定狀態中，但由於整個大氣層受熱很利害，不能達到飽和狀態，所以在這些地方的降水量依舊是很少的。

當出現强烈的氣旋形環流而且空氣中又包含着足够的水份時，就能形成大量的降水。1949年杜爾開梯 (З. Л. Туркетти)[12]曾計算過，在一次强大的氣旋系統中降水量曾超過40立方公里。在氣旋系統中，有時蘇聯可發生一晝夜降水量達到100毫米以上的。至於在我們中國，夏秋之間有强大的颱風（强烈的熱帶氣旋形環流）登陸時，華南個別地點可以產生一晝夜降水量達到500毫米以上的。在我國台灣由於受到强大的颱風環流影響，一晝夜降水量在個別地點甚至有超出1000毫米的。

比較陸地上降水量的分佈與氣旋頻率的分佈，就能發現其間有相互關係。例如，在東歐與西伯利亞西部全年降水量在北緯65—50°度的地帶比較多，向南到40—45度的地帶降水量迅速減少，儘管在40—45度的地帶空氣中的水份含量比北部多，但由於環流特性不同，在那裏即產生不了很多的降水。從氣旋頻率分佈上就可以解釋這種降水量分佈的特點，因爲那裏的氣旋頻率常常是自北向南減少的。

一般而論，冬季海洋上的氣旋比大陸上的氣旋爲多，夏季則大陸上的氣旋有所增加。不論在冬季還是夏季，尤其是在冬季歐洲氣旋頻率是從西北向東南迅速減少的。由於這種氣旋頻率的分佈，所以在降水量的分佈上也就顯出不同來。例如在海洋上及靠近海洋的大陸沿岸降水量常較多，愈向內陸降水量愈少。在夏季由於大陸上氣旋活動有相當的增加，所以降水量也隨之增加。一方面氣旋活動使得空氣的上升運動獲得發展，因此有利於雲雨的產生；另一方面在夏季由於氣旋形成的雲雨減弱了地面和氣團的加熱，所以使空氣容易達到飽和狀態。因此在北緯50度以南地區，少數氣旋的出現就可以使得從海洋到內陸去的氣團其相對濕

度不致迅速減少。但是在中亞仍出現沙漠，顯然這是大氣環流的特性及與之有關的氣團變性所產生的結果。

大家都知道，在對流層中自西向東的空氣輸送是地球上（尤其中緯度）氣團輸送的主要方式。這從近年來廣泛的高空資料中可以證實的，在北半球逐月平均500毫貝等壓面圖上，也可以看出自西向東空氣輸送規模之大。一般而論，在中緯度與高緯度對流層中自西向東的空氣輸送，其輸送速度夏季要比冬季小；春秋的輸送速度則介於冬夏之間。在低緯度自西向東的空氣輸送不明顯，該處環流系統主要決定於海陸之間的溫度差別，即所謂季風環流，這在東南亞洲部份特別顯著。所以在低緯度降水量的分佈仍舊是被大氣環流的特性所決定的。

夏季在亞洲南部有强大的熱低壓存在，因此造成明顯的季風活動，並使印度洋上的空氣大量侵入到大陸上來。印度洋來的濕空氣受南亞山脈的阻制與影響，使得產生的大量降水一般限制在山脈以南的地方，因此印度洋氣流的水份輸送就不能直接影響到蘇聯地區的水份循環。當然，東南亞這個多雨地區，其降水量的分佈仍與氣旋形環流的活動分不開的。

此外，我們知道在海洋上有很多地區，例如在大西洋非洲沿岸20—25度地帶，由於那裏反氣旋環流佔優勢，因此全年降水量常常很少。但在這些地區的蒸發量却特別大，年蒸發總量平均達到2000毫米。如比較研究海洋上蒸發量分佈與降水量分佈就可發現，降水與蒸發這兩個因子之間是有一定關係的，在平均狀況之下其間一般存在着相反的關係，就是"降水增加則伴隨着蒸發減少"[13]。這可見在海洋上地方性蒸發對當地降水的形成並不佔重要地位。

從上所述可知，我們要研究水份循環的問題，必須結合環流的特性以及天氣系統的發展情況來加以詳細分析，方能得到更進一步的認識。

五、結　語

總結以上對水份循環的討論，它的實際意義可歸納如下：根據蘇聯學者的研究結果，認爲在小區域上，例如在10^3—10^4平方公里的面積上，當地蒸發的變化對當地降水實際上是不能够起多大的影響。由此可見，沼澤與某些湖泊的乾化便不會使當地降水減少。但是在幾百萬平方公里的較大地區上，蒸發的改變就要起相當的作用。所以在廣大地區進行土壤改良使得蒸發有所改變時，也就會引起降水的一些變化。所以人對自然的改造對氣候的改造是完全有可能的。

特洛氏讀夫與卡里寧[14]等曾經指出，在蘇聯歐洲部份的南部進行過土壤改良的地區上，由於防護林帶的種植以及蒸發的增加，使得降水量普遍增加了20—30毫米。由此可見，用人力改變植被狀況、改良土壤、以及修築水庫水池、開闢運河、配合灌溉事業等等，就能改變近地面空氣層與土壤的水文氣象效果，提高生產量來爲人民服務。

大家都知道，在蘇聯正在實現着規模宏大的斯大林改造自然的計劃，進行着史無前例的偉大的共產主義建設。例如在伏爾加河上修建了巨大的古比雪夫和斯大林格勒水力發電站，在德聶泊河上建造了卡霍夫水力發電站，此外還開闢了土庫曼大運河、南烏克蘭與北克里姆運河，使得伏爾加河和頓河互相連接，因此千百萬公頃的肥沃土地獲得了灌溉，避免了旱災的威脅。繁榮的光輝燦爛的蘇維埃農莊和集體農莊建立起來了，原來是荒涼的土地都轉變爲產量日益增加的良田，無限美麗的花園與果樹園建造起來了。在蘇聯還有更加廣大的計劃和引人入勝的遠景，就是要把西伯利亞葉尼塞河與鄂畢河裏的大量水源，不要讓它白白地流到北冰洋裏去，而要使它流到中亞細亞來灌溉廣大的沙土。這一切偉大的共產主義事業，必然地都和水份循環的問題聯在一起。例如乾旱地區獲得大量河水的供給後，作物茂盛，地方性蒸發增加了，空氣中的濕度也顯然增加了，空氣中的凝結層高度也就可以適當地降低，雲雨也就相應地增加了。誰能說人力不能改造氣候呢？

而且，在有預見性的偉大的斯大林改造自然的計劃中，空前未有的大範圍防護林種植起來了，其面積已約達六百萬公頃，比英國和法國的面積合起來還要大好幾倍。在防護林帶的田地上積雪量可以增加，融雪的時間也顯得緩慢一些，因此也改變了河道中的逕流，滲入地土中的水份反而增加了。而且，土壤的冲刷作用減小，風速也被減小，甚至溫度的變化也要受到影響。

顯然，"蘇聯的今天便是我們的明天"，在國家過渡時期總路綫的燈塔照耀之下，全國人民在中國共產黨和毛主席的正確領導之下，向着社會主義的大道前進。四年來在我國也已經開始進行了相當可觀的改造自然的工作，在水利、植林、築港等方面已經表現出巨大的成績。今後，當國家建設事業大規模開展，改造自然改造氣候的要求勢必愈加迫切，因此對我國水份循環問題的研究就很重要。我們必須大力開拓水文氣象的觀測工作，增加高空觀測台站和雨量自記的台站，以便在具有可靠而廣泛的資料基礎上，在蘇聯先進經驗與理論的指導下，來進行我

國各重要地區水份循環的計算工作。

參考文獻

[1] 華也可夫：自然界中的水份循環、降水和蒸發。氣象公報第10，12號，1894年。

[2] 卡明斯基和房涅萬 (О. В. Ванеева)：蘇聯歐洲部份暖季的水汽輸送。Зап. ГГИ Т. 8, 1933年。

[3] 西書可夫：論卡明斯基的"蘇聯歐洲部份暖季的水汽輸送"。地球物理雜誌 T. 4, 1934年。

[4] 秤善爾林格：蘇聯歐洲部份內水份循環及其在水利方面的意義。ЦИП報告，T. 2，Вып. 7，1948年。

[5] 帕哥香：大氣中水份循環的方式。江愛良、潘怡航譯，地理學報20(1)，1954年。

[6] 脫甦爾斯基 (П. Н. Тверский) 主編：氣象學教程第25章，1951年。

[7] 阿里索夫 (Б. П. Алисов) 等：氣候學教程第2章，1952年。

[8] 巴鴿羅甦 (Н. А. Багрова) 主編：護田林栽培的水文氣象效果問題論文集。1950年。

[9] 布提可和特洛氏譚夫：論大氣中水份循環的規律性。蘇聯科學院報告Новая серия Т. XC №.2，1953年。(此文已由楊鑑初譯出，見氣象譯報第一期)

[10] 帕哥香：大氣環流。陶詩言、楊鑑初譯，中華書局，1954年。

[11] 同 [10] 或 [5]。

[12] 杜爾開梯：極大降水降落的天氣條件。М.И.Г. 第1號，1949年。

[13] 同 [10] 或 [5]。

[14] 同 [8]。