

我国中部和南部地区降水再循环率评估^{*}

康红文¹⁾ 谷湘潜¹⁾ 祝从文¹⁾ Paul Whitfield²⁾

1) (中国气象科学研究院, 北京 100081)

2) (Meteorological Service of Canada-PYR, Vancouver, B. C., V6C 3S5)

摘 要 利用 1976~1995 年 20 年 NCEP 再分析资料, 对我国中、南部地区降水再循环率进行了评估, 发现长江上游总的降雨有 20% 来自我国中、南部地区水汽蒸发, 长江中下游总的降雨则有 40% 来自这一地区。降水再循环率有很强的季节变化规律, 8、9、10 三个月的降水再循环率最高, 达四成左右, 而 5、6、7 三个月的降水再循环率不到四分之一。蒸发率和降水再循环率在 20 年中均有增加的趋势, 这可能与气候变暖有关。

关键词: 降水; 再循环; 水汽输送

文章编号 1006-9895 (2004) 06-0892-09 **中图分类号** P468 **文献标识码** A

1 引言

降水再循环率可定义为: 一个地区的蒸发对该地区降水的贡献, 它与所研究区域的大小和位置密切相关, 表征了一个地区陆面水文与区域气候相互作用的强弱, 只有在对它做出评估后, 才能清楚在该地区的降水有多少来自本地区的蒸发, 有多少来自该地区以外的水汽流入。对一个地区降水再循环率做出评估, 是了解该地区水量收支十分重要的一步。

有关对降水再循环率的评估问题, 在理论和地区评估应用上, 国内外已有不少研究, 并取得很大进展^[1~9]。其中, Eltahir 和 Bars^[3,4]的研究十分重要, 他们从水汽守恒方程出发, 重建了对降水再循环率的评估理论模式, 利用欧洲中心 (ECMWF) 再分析资料, 对 Amazon 流域重新进行了降水再循环率评估。Szeto^[8]和 Wood 等^[9]也采用了 Eltahir 和 Bars 的模式, 进行了一些地区降水再循环率的评估。

我国以长江流域为中心的中南部地区是主要降水区, 对这一地区降水再循环率的评估, 能揭示陆面蒸发对长江全流域降水的贡献。伊兰^[5]在 Eltahir 和 Bars 模式的基础上, 重建了一个评估模式, 对长江流域的降水再循环率进行了评估。但她的模式有再循环降水不包括来自本格点区域内的蒸发的假定, 而不便于与其他区域已有的评估结果进行比较。本文拟采用 Eltahir 和 Bars 模式, 对我国以长江流域为中心的中、南部地区, 进行降水再循环的评估, 并与国外其他地区的结果作了比较。

本文第 2 节介绍所用资料、Eltahir 和 Bars 评估理论及评估过程; 第 3 节为主要结果, 包括降水再循环率、地面蒸发和水汽输送的水平分布及季节变化, 以及它们的年

2003-07-07 收到, 2003-10-14 收到再改稿

^{*} 国家自然科学基金资助项目 40075024、国家 863 计划 2002AA135360 和科研院所社会公益研究专项资金项目 2002DIA20013 共同资助

际变化特征等；第 4 节为总结。

2 资料、评估理论和评估过程

2.1 资料

本文使用的资料是 1976~1995 年共 20 年的 NCEP 月平均再分析资料，包括高空 8 层等压面上的风、温度和相对湿度以及地面潜热输送和降水率。8 层等压面包括 1000 hPa、925 hPa、850 hPa、700 hPa、600 hPa、500 hPa、400 hPa、300 hPa，等压面上的格距为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ，地表格距为 $1.875^\circ \times 1.875^\circ$ ，它们也内插成 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 格点，以便进行有关计算。

研究区域范围是 ($20 \sim 37.5^\circ \text{N}$, $95 \sim 122.5^\circ \text{E}$)，涵盖了我国中部和南部（包括华南和西南地区），整个长江流域位于其中心地带。这一地区共含有 77 个 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 格区，其长度尺度（面积的平方根）是 2300 km。

2.2 评估理论

依据 Eltahir 和 Bars^[3,4] 提出的降水再循环率评估模式，降水再循环率 ρ 可定义为

$$\rho = \frac{P_w}{P_w + P_o}, \quad (1)$$

P_w 是在某一格区上，来自研究区域内的水汽所形成的降水， P_o 是在某一格区上，来自研究区域外的水汽所形成的降水。根据边界层观测结果，假定水汽在边界层内是充分混合的。由此，降水再循环率又可以定义为

$$\rho = \frac{O_w}{O_w + O_o} = \frac{N_w}{N_w + N_o}, \quad (2)$$

其中， O_w 是从某一格区流出的来自研究区域内的水汽， O_o 是从某一格区流出的来自研究区域外的水汽， N_w 是在某一格区内空气中包含的来自研究区域内的水汽， N_o 是在某一格区内空气中包含的来自研究区域外的水汽。格区水汽守恒方程可写为

$$\begin{cases} \frac{\partial N_w}{\partial t} = I_w + E - O_w - P_w, \\ \frac{\partial N_o}{\partial t} = I_o - O_o - P_o, \end{cases} \quad (3)$$

其中， I_w 是流入某一格区的来自研究区域内的水汽， I_o 是流入某一格区的来自研究区域外的水汽， E 是该格区上蒸发的水汽。由于空气中水汽含量的变化率与水汽通量和蒸发相比是小量，水汽守恒方程可以简化为

$$\begin{cases} I_w + E = O_w + P_w, \\ I_o = O_o + P_o, \end{cases} \quad (4)$$

最终，可以得出如下形式的对降水再循环率评估的公式：

$$\rho = \frac{I_w + E}{I_w + E + I_o}. \quad (5)$$

该模式与以前的模式相比有两方面的优势：一是它可以揭示降水再循环率的空间分布；二是它的假设最少且较合理。本文将采用 (5) 式作为评估公式。

2.3 评估过程

评估过程采用逐次逼近技术。具体步骤如下：

(1) 计算出研究区域内各网格点上的水汽通量和蒸发率, 并直接得到降水率。水汽通量 F 计算公式:

$$F_i = \frac{S_i R_{\text{air}}}{g R_w} \sum \left[\frac{H_R e_s(T)}{100} U_i d \ln p \right], \quad (6)$$

其中, $i=1, 2$ 分别表示经向和纬向, H_R 是相对湿度, T 是绝对温度, U 是速度, $e_s(T)$ 是饱和水汽压, p 是压力, R_{air} 和 R_w 分别是空气和水汽的气体常数, g 是重力常数, S 是垂直于水汽流方向的长度尺度。

(2) 地表蒸发可由潜热通量求出:

$$E = \frac{E_L}{\rho_w L}, \quad (7)$$

其中, E_L 是潜热通量, L 是蒸发潜热, ρ_w 是水汽密度。

(3) 在各格区内给定 ρ 的初估值。根据 (2) 式分配各格区上的 O_w 和 O_o , 它们实际上也是进入临近格区的 I_w 和 I_o , 由公式 (5) 重新评估各格区内的 ρ 。如此迭代, 直到前后两次差值小于给定的阈值。迭代收敛很快, 一般是 20 步之内可以收敛 6 个量级。

3 主要结果

3.1 降水再循环率的空间分布和季节变化

图 1 是我国中南部地区 1976~1995 年平均年降水再循环率的水平分布。长江以北的中原地区降水有一半是来自研究区域的蒸发水汽, 长江中下游有四成的降水来自研究区域的蒸发, 长江上游有两成的降水来自该地区。我国中、南部总的降水再循环率是 28.8%, 与此对比, Amazon 流域 (长度尺度是 2500 km) 多年平均的年降水再循环率是 25%~35%^[3], Mississippi 流域 (长度尺度是 1400 km) 总的降水再循环率是 24%^[2]。可见我国中、南部地区陆面水文与区域气候相互作用还是很强的, 尤其是中、南部地区陆面蒸散对长江中下游流域降水的总体贡献很大。图 2 是 20 年平均蒸发率的分布, 它显示了较强的随纬度增加而递减的规律。图 3 给出 1976~1995 年的水汽输送。由图可见, 长江中下游的水汽主要来自孟加拉湾, 并汇合来自南海的水汽。长江上游的水汽主要来自西部的青藏高原, 并汇合来自孟加拉湾北上的水汽。

图 4 是蒸发率四季的水平分布。总的来说, 四季的蒸发均随纬度的增加而减少。

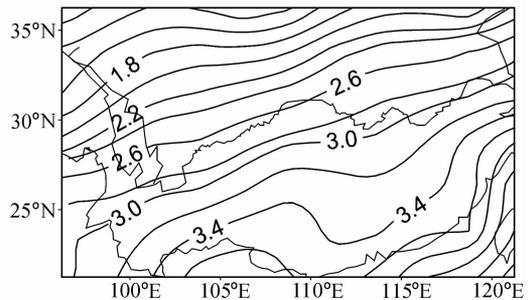
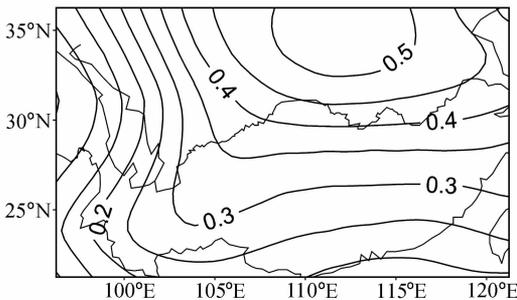


图 1 1976~1995 年平均年降水再循环率的水平分布

图 2 1976~1995 年平均年蒸发率的水平分布

(单位: mm d^{-1})

夏季长江流域广大地区蒸发较强，而在研究地区的东南部蒸发随纬度的增加反而增加，这是与东南部处在海洋上有关（图 4b）。冬季（图 4d）的大陆地区蒸发不仅弱，而且水平梯度很小，但在东南部的海洋上蒸发急剧增加。图 4b、d 显示，海岸线附近地区蒸发等值线走向与海岸线一致，这是大陆和海洋的蒸发在冬、夏有显著差异形成的。

图 5 为四季水汽输送的水平分布。可以看到它们有显著的差异。春季孟加拉湾是华南地区的主要的水汽源地（图 5a），这是西风带天气系统和热带季风气流共同作用的结果^[11]；夏季南中国海是长江中下游地区的主要的水汽源地（图 5b），印度季风和东亚季风使得来自印度洋和西太平洋的气流在南海和华南地区汇合，形成一支强西南气流^[10,11]；秋季亚洲大陆高压加强，大气环流从夏季环流型向冬季环流型过渡，在我国中、南部地区形成了涡旋状的水汽输送分布（图 5c）。冬季西风盛行，冷空气常从北方南下，但是我国北方蒸发低，空气干燥，南下空气带来的水汽很少（图 5d）。

图 6 是降水再循环率四季的水平分布。总的来说，秋天降水再循环率最高，大部分地区降水约有一半是来自本地，这是由于水汽在这些地区构成了封闭的循环（图 5c）、秋天蒸发较强（图 4c）的缘故。春季降水再循环率相对较低，大部分地区的降水再循环率低于 0.2（图 6a），这主要是因为春季来自孟加拉湾和青藏高原的水汽流较强（图 5a），而这个季节蒸发又较弱（图 4a），这就使得春季大部分地区的降水中，有八成

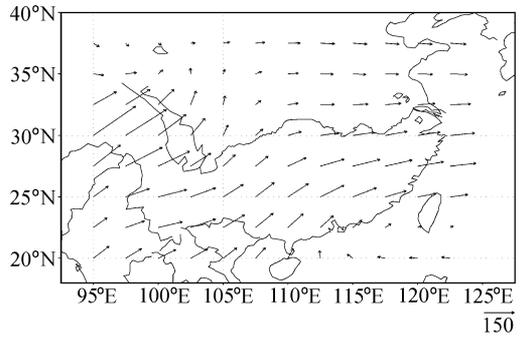


图 3 1976~1995 年平均年水汽输送矢量水平分布
(单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)

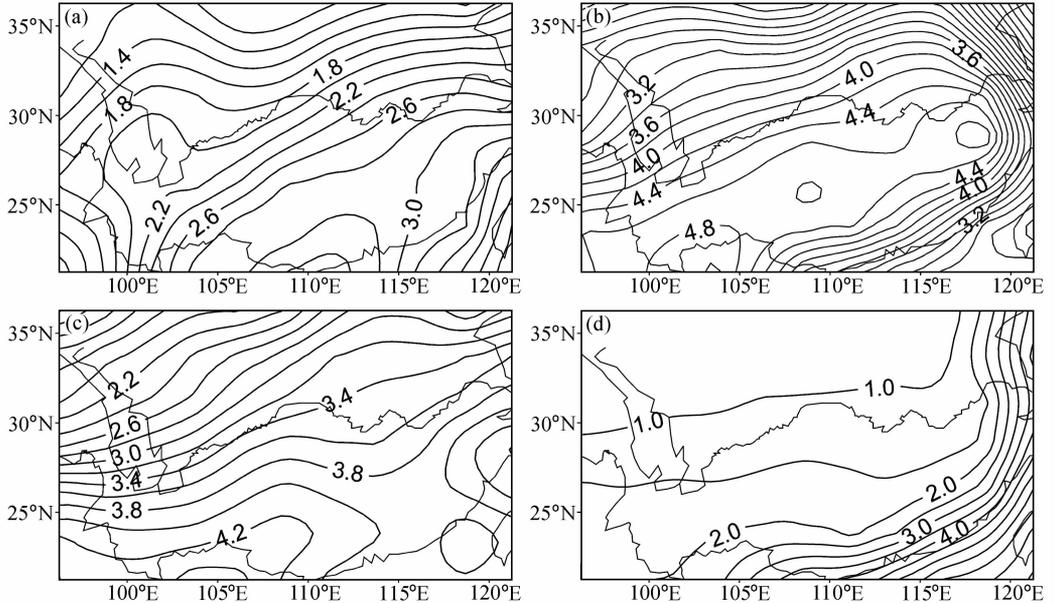


图 4 1976~1995 年平均各季蒸发率水平分布 (单位: mm d^{-1})
(a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季

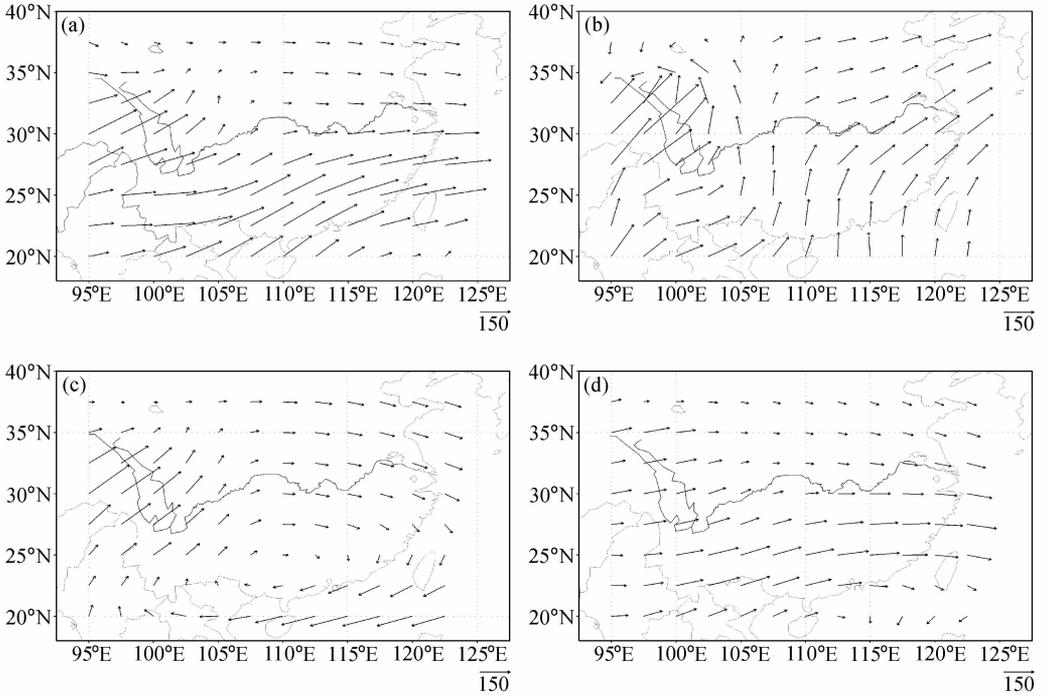


图 5 1976~1995 年平均各季水汽输送水平分布 (单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)

(a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季

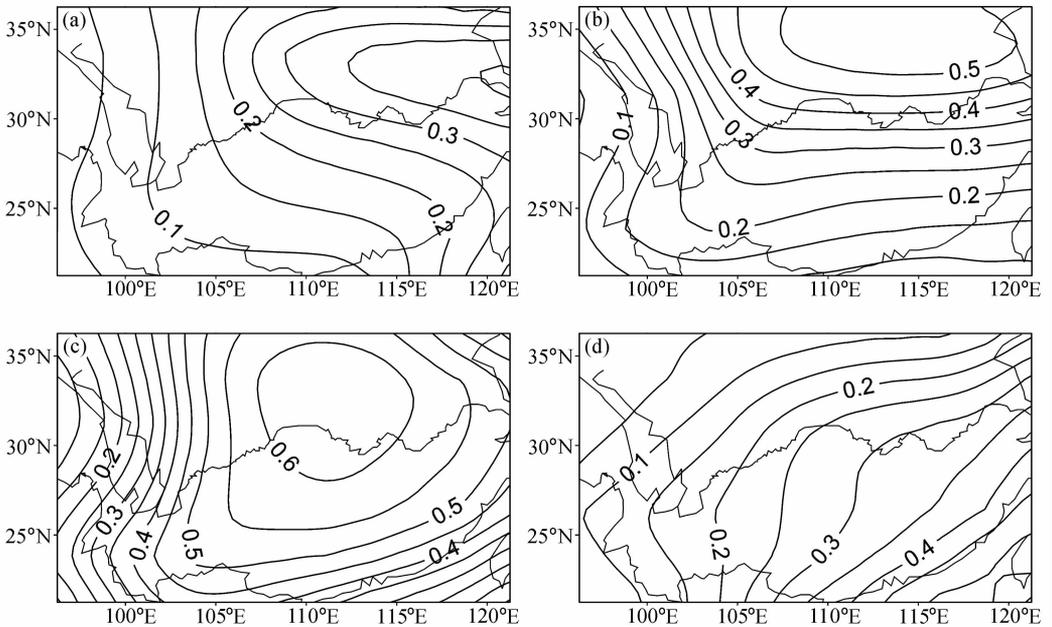


图 6 1976~1995 年平均各季降水再循环率水平分布

(a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季

是来自研究地区以外的水汽。图 6b 为夏季降水再循环率的水平分布，在长江中下游地区，降水再循环率等值线大致呈纬向分布，并随纬度增加而递增；在长江上游地区，降水再循环率等值线大致呈经向分布，并由西向东增加。由图 4b 可知，在长江中下游地区的水汽主要来自南海，这与谢安等^[12]得到的南边界的水汽输送，是长江中下游地区夏季水汽的最主要来源的结果一致。正是由于南海由南向北的水汽输送，使长江中下游地区降水再循环率等值线大致呈纬向分布，并形成随纬度增加而递增的分布形态。同理，对于长江上游地区，降水再循环率等值线大致呈经向分布，主要是来自青藏高原较强的水汽输送引起的（图 5b）。由图 6b 还可看出，夏季长江中下游地区有 40% 的降水来自我国中南部地区的水汽蒸发，而长江上游这一比例只有 15%。冬季降水再循环率等值线呈西南东北向分布，数值由西北向东南方向逐渐增大（图 6d），这表明冬季华南地区降水比研究区域的西北地区更多地依赖当地的蒸发。与别的季节比较，冬季整个区域的降水再循环率都较低，说明产生冬季降水的大部分水汽还是来自研究区域以外。对照图 1，可以看出图 6b 和图 1 的分布形势很相似，这表明总的降水再循环率主要是由夏季决定的，这是因为夏季降水较强，所占的权重较大引起的。

图 7 是 20 年平均的区域平均降水再循环率逐月变化，降水再循环率在 8、9、10 三个月最强，而 2、3、4 三个月最弱。图 8 是 20 年平均的区域平均蒸发率逐月变化，蒸发率在 5~9 月最强。图 9 是 20 年平均的区域各边界和总的水汽输送逐月变化，可以看到该地区水汽主要来自西、南两边界。而且在降雨高峰的夏季 6、7、8 三个月中，来自南边界的水汽量均大于来自西边界的水汽量。东边界只有水汽输出，北边界进出水汽量均很小，这反映了我国南北地区间水汽交换很弱，我们将在另文中专门对我国北方地区降水再循环率进行评估。

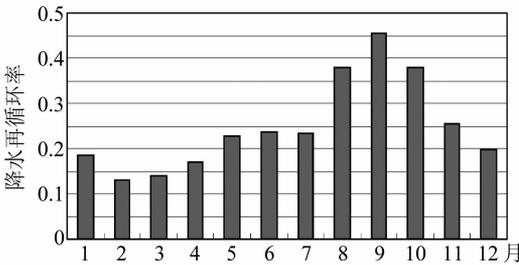


图 7 1976~1995 年及区域平均降水再循环率逐月变化

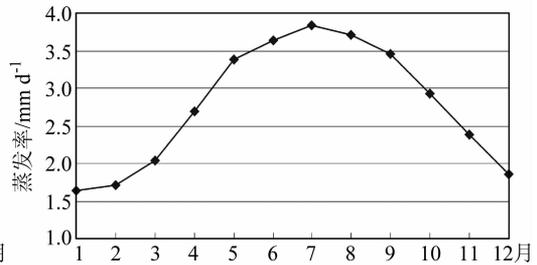


图 8 1976~1995 年及区域平均蒸发率逐月变化

3.2 年际变化特征和两个十年对比分析

图 10 是 1976~1995 年及区域平均的年降水再循环率年际变化。可以看到这 20 年该地区降水再循环率有明显增加的趋势，增幅在 10% 左右，并有 3~5 年周期的年际振荡特征。图 11 是相应的蒸发率年际变化。蒸发率也有逐渐增大的趋势，增幅在 3% 左右。

图 12 给出区域平均的年降水再循环率在两个十年（1976~1985 和 1986~1995）的比照情况，后十年的平均降水再循环率从 8 到 12 月都有明显增加，而在其他月份差别都很小。图 13 是与图 12 相应的两个十年蒸发率的对比，第二个十年的平均蒸发率除了 4、11 月以外，在其他月份都有增加。

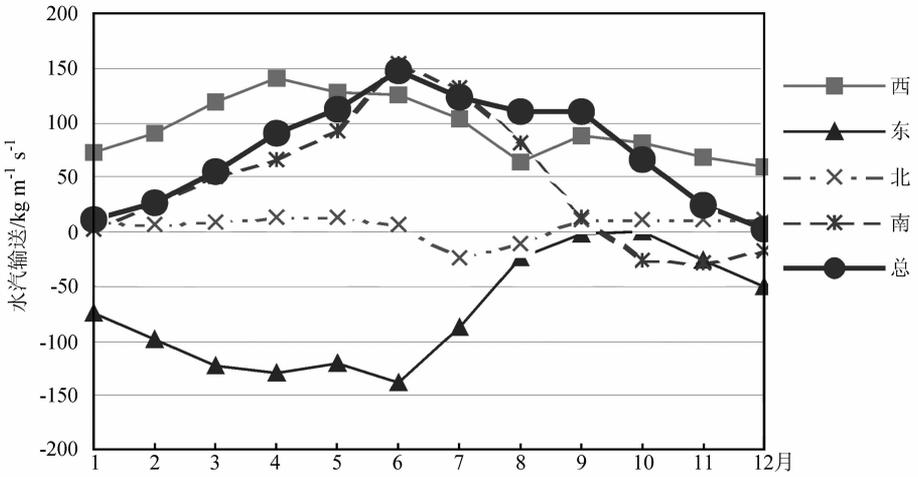


图 9 1976~1995 年平均各边界水汽输送和总水汽输送的逐月变化

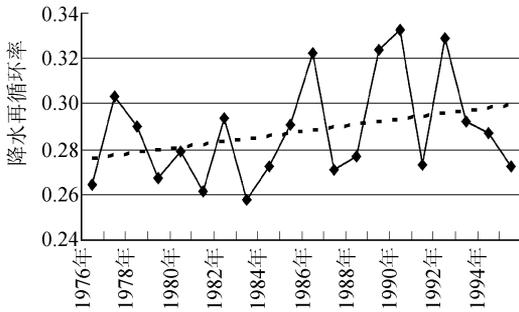


图 10 1976~1995 年及区域平均年降水再循环率的年际变化

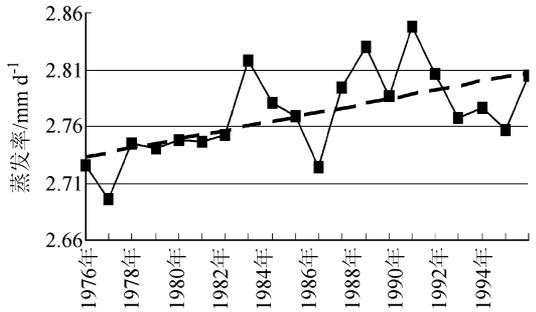


图 11 1976~1995 年及区域平均年蒸发率的年际变化

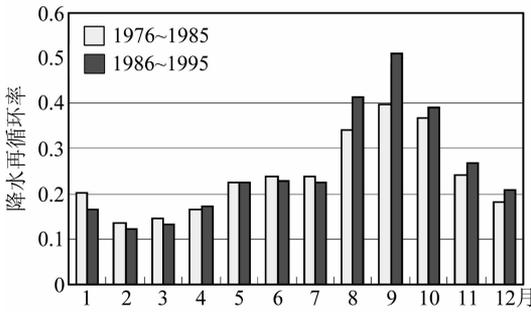


图 12 区域平均年降水再循环率在两个十年 (1976~1985 和 1986~1995) 的对比

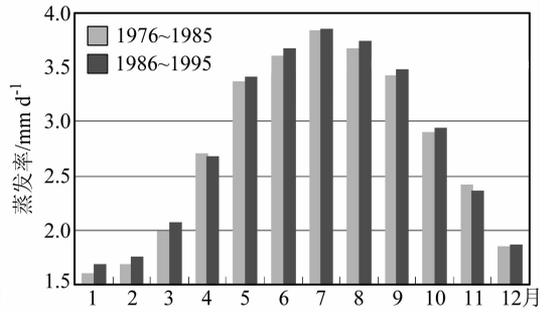


图 13 区域平均年蒸发率在两个十年 (1976~1985 和 1986~1995) 的对比

我们使用的是连续的 20 年的数据资料,但蒸发率和降水再循环率在前后两个十年的平均值已有一定的变化,这表明气候变化对它们的影响已有所表现。

4 总结

(1) 长江上游总的降雨有 20% 来自我国中、南部地区水汽蒸发，长江中下游总的降雨有 40% 来自这一地区。

(2) 我国中、南部地区降水再循环率有很强的季节变化规律，8、9、10 三个月的降水再循环率最高，接近四成，而 5、6、7 三个月的降水再循环率不到四分之一。

(3) 蒸发率和降水再循环率有增加的趋势。

20 年中蒸发率和降水再循环率增加的趋势，可能与气候增暖有一定的关系，这些有待今后进一步研究。

致谢：中国气象科学研究院孙岚博士与作者进行了有益讨论，并提供了相关资料。作者在加拿大 Meteorological Service of Canada 期间，Alex Cannon 在使用 NCEP 再分析资料方面提供了很多帮助。两位审稿人对原稿提出了许多好建议，作者在此一并致谢！

参 考 文 献

- 1 Budyko, M. I., Climate and life. *Int. Geophys. Ser.* No. 18, Academic Press, San Diego, Calif, 508pp.
- 2 Brubaker, K. L., D. Entekabi, and P. S. Eagleson, Estimation of continental precipitation recycling, *J. Climate*, 1993, **6**, 1077~1089.
- 3 Eltahir, E. A. B., and R. L. Bars, Precipitation recycling in the Amazon basin, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1994, **120**, 861~880.
- 4 Eltahir, E. A. B., and R. L. Bars, Precipitation recycling, *Rev. Geophys.*, 1996, **34**, 367~378.
- 5 伊兰, 亚洲季风的水循环与水分收支——GEWEX 亚洲季风区实验 (GAME) 预研究, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 1996, 156pp.
- 6 Trenberth, K. E., Atmospheric moisture recycling: role of advection and local evaporation, *J. Climate*, 1999, **12**, 1368~1381.
- 7 孙岚、吴国雄、孙菽芬, 陆面过程对气候影响的数值模拟——SSiB 与 IAP/LASG L9R15 AGCM 耦合及其模式性能, *气象学报*, 2000, **58**, 179~193.
- 8 Szeto, K. K., Moisture recycling over the Mackenzie Basin, *Atmosphere—Ocean Special*, 2002, **40**, 181~197.
- 9 Wood, E. F., and J. Sheffield, Analysis of GCM predicted precipitation recycling over large basins, 83rd Annual AMS meeting: Session 13, Climate Change Modeling: II 14th Symposium on Global Change and Climate Variations, 2003.
- 10 伍荣生, 现代天气学原理, 北京: 高等教育出版社, 1999, 209~236.
- 11 Zhang Renhe, Relations of water vapor transport from Indian monsoon with that over East Asia and the summer rainfall in China, *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, **18**, 1005~1017.
- 12 谢安、毛江玉、宋谈云等, 长江中下游地区水汽输送的气候特征, *应用气象学报*, 2002, **13**, 67~77.

Precipitation Recycling in Southern and Central China

Kang Hongwen¹⁾, Gu Xiangqian¹⁾, Zhu Congwen¹⁾, and Paul Whitfield²⁾

1) (*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

2) (*Meteorological Service of Canada — PYR, Vancouver, B. C., V6C 3S5*)

Abstract An evaluation of precipitation recycling in southern and central China was made using 20-year NCEP reanalysis data. It is found that 20% of the precipitation in the upper reaches of the Yangtze River and 40% of the precipitation in the middle and lower reaches of the Yangtze River come from the evaporation within the research region. The precipitation recycling varies obviously with seasons; it has the highest value of about 0.4 in August, September, and October, while it does not reach a quarter in May, June, and July. Both Evaporation and precipitation recycling increase during the 20 years, which may be the results of climate warming.

Key words: precipitation; recycle; moisture transport; NCEP reanalysis data