

文章编号:1001-8166(2001)03-0406-07

# Sahel 气候与环境变化研究进展\*

史培军, 龚道溢

(北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 资源科学研究所, 北京 100875)

**摘要:**对 Sahel 地区气候及环境变化的研究,对理解和加强我国干旱半干旱地区许多相关问题有较好的借鉴意义。Sahel 地区的干旱化持续了近 30 年,虽然 1999 年降水出现了自 1968 年以来的最高值,但整个 90 年代降水仍然偏低。造成 Sahel 降水波动的因素包括大西洋海表温度、陆面反馈、全球变暖等。其中海洋的影响起重要作用,在某些年份里土壤水分可能会起到比较大的作用,而大气内部的动力作用则可能没有明显影响,从大尺度看人类活动对此地区整体环境和气候的变化贡献不大。

**关键词:**Sahel; 气候与环境变化; 干旱化

**中图分类号:**P467 **文献标识码:**A

## 1 前言

Sahel 地区地处撒哈拉大沙漠的南边半干旱地区,年降水量在 100~400 mm 之间,年际变率很大。从 60 年代后期开始,Sahel 地区降水持续偏少,一直到 90 年代,严重的干旱持续了 30 多年之久,这是 20 世纪持续最长的干旱。干旱对当地的环境和经济造成了重大破坏,如仅在 1968—1973 年间的旱灾就影响到了 16 个非洲国家,死亡超过 20 多万人。伴随干旱,相应的地面水文、地貌、植被都发生了深刻变化,生态环境日益恶化。这引起了全球科学界的极大关注,联合国 1977 年荒漠化会议和 1992 年全球荒漠化地区评估等都对 Sahel 地区的干旱问题给予了高度重视,就其形成机制及影响,组织实施了一些国际研究计划,如 1992 年 HAPEX 实验(Hydrologic Atmospheric Pilot Experiment—Sahel Experiment)。

2000 年春季我国北方广大地区风沙危害加剧,环境及气候的变化引起人们的密切关注。因此,本文就近年来国际上对 Sahel 地区环境与气候研究的一

些进展进行了分析,以期对我国干旱、半干旱地区环境变化研究有所裨益。

## 2 Sahel 的干旱化

### 2.1 降水变化

在历史上 Sahel 地区经常发生旱灾,如 19 世纪 20 年代、30 年代,20 世纪 10 年代、40 年代先后发生过严重的干旱,这些干旱持续的时间都没有超过 10 年,如 20 世纪 40 年代的干旱主要是发生在 1939—1943 年。当然,降水的减少是造成 Sahel 地区干旱的最直接的原因。

图 1 给出了几个不同的 Sahel 降水序列<sup>[1~3]</sup>,为方便比较都以 1951—1980 年为参考进行了标准化处理。图 1(a)和(b)都有较长的时间,不过早期资料比较少。整体看,这些序列反应的降水变化还是有很高的一致性的。图 1(a)和(b)两者相关系数为 0.63 (1900—1995),特别是 20 世纪 20 年代以后一致性非常好,1920—1995 年相关系数达 0.80。这些长的序列清楚地显示出 Sahel 降水的波动性和近百年来显著的减少趋势。从图 1(b)看,50 年代除 1959 年

\* 收稿日期:2000-07-19;修回日期:2000-10-08。

\* 基金项目:国家重点基础研究发展规划项目“我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测研究”(编号:G1999043404)资助。

作者简介:史培军(1959-),男,陕西靖边人,教授,理学博士,主要从事自然地理学研究。E-mail:spj@bnu.edu.cn

为 0 值外,降水都是正距平,而整个 70 年代和 80 年代,降水都是负距平,一直到 1994 年出现正距平为止,负距平持续了 23 年。而且随后的 1995—1997 年降水仍然是明显偏少。与 50 年代相比,70 年代降水减少了 51%,80 年代减少了 53%,1990—1995 年平均减少了 45%。图 1 中的序列都一致显示从 80 年

代开始,Sahel 地区降水有增加的趋势(+12%/10 a)。1999 年 7~9 月降水出现了自 1968 年以来 32 年中同期降水最多的一年<sup>[3]</sup>。但从整个 90 年代看,降水仍然明显偏少,并没有恢复到正常或偏多的水平,因此,Sahel 持续了近 30 多年的干旱,目前并未发生根本性的改善。

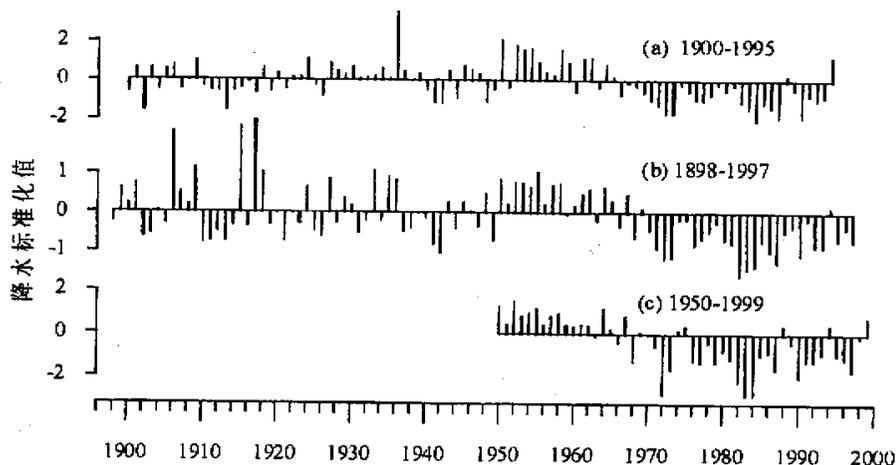


图 1 Sahel 地区雨季降水量

Fig. 1 Long-term rainfall fluctuations in Sahel.

(a) 20~10°N, 15°W~30°E 平均 6~9 月降水量<sup>[1]</sup>; (b) 是 20~8°N, 20°W~10°E 区域 14 个站平均 6~9 月降水量<sup>[2]</sup>; (c) 为 10~20°N, 18°W~20°E 平均 7~9 月降水指数<sup>[3]</sup>。为便于比较,3 个序列都进行了标准化处理,参考时段均为 1951—1980 年

(a) 20~10°N, 15°W~30°E, June-September<sup>[1]</sup>; (b) 20~8°N, 20°W~10°E, June-September, means of 14 stations<sup>[2]</sup>; (c) 10~20°N, 18°W~20°E, July~September<sup>[3]</sup>. All normalized with respect to 1951—1980

## 2.2 沙漠在向南扩展吗?

干旱化更具体的是体现在土地覆被的变化上。通常认为伴随干旱化,撒哈拉大沙漠向南扩展,Sahel 地区也随之向南推进,侵入热带稀树干草原地区(savanna),而且这种沙漠化的进程是不可逆的。例如,Hulme 等<sup>[4]</sup>分析了 80 年代撒哈拉沙漠范围变化,当然其年际变化与降水的波动非常吻合,利用简单的统计关系,将面积波动中降水的贡献除掉之后,发现剩下的部分有线性上升的趋势,80 年代,沙漠每年增加 4.1 万 km<sup>2</sup>。他们指出这种线性的趋势可能既与持续性多年干旱的累积贡献有关,也可能与人类活动有关,但各自贡献究竟有多大仍缺乏必要证据。

Nicholson 等<sup>[5]</sup>利用 NOAA-AVHRR 资料研究了 1980—1995 共 16 年 Sahel 边界的变化。图 2 是 200 mm 等雨量线与 25°N 纬线之间面积,用来反应撒哈拉沙漠边界的范围。地面观测及卫星观测结果有很好的 consistency,由于 80 年代以来降水有增加的

趋势,所以从图上看,面积范围呈下降趋势,但是最突出的特点还是年际变率非常大。Sahel 地区沙漠边界及土地覆被主要受气候因子(降水)所控制,这种受降水控制的撒哈拉沙漠的边界变化,年际之间可以超过 300 km<sup>[5,6]</sup>。虽然一些地区如居民点附近,水井周围等由于过度放牧、砍樵等人为活动造成土地退化,但整个来看,并没有造成生物总量的显著减少,而只是改变某些地区植被种类结构。他们把雨水利用率(RUE, Rain Use Efficiency),即净第一性生产力(NPP)与年降水量的比值,作为监测环境变化的一个指标,如果发生沙漠化,RUE 会呈下降趋势,如果只是由于降水减少而发生的干旱造成 NPP 下降,那么 RUE 会保持相对稳定。实际上,从 80 年代到 1990 年代初,RUE 不仅没有下降,反而呈显著的上升趋势,反应沙漠面积有小量收缩,这说明大范围的撒哈拉沙漠向南扩展及 Sahel 地区的沙漠化趋势并未发生<sup>[5,6]</sup>。因此近几十年来,Sahel 地区环境的变化主要还是受气候特别是降水变化所控制,从大

尺度看人类活动对此地区整体环境和气候的改变贡献目前还不显著。其它一些独立的研究也得到同样结论<sup>[7,8]</sup>。当然,这仅是十几年的资料长度,还不足以确认是否有更长期的趋势。

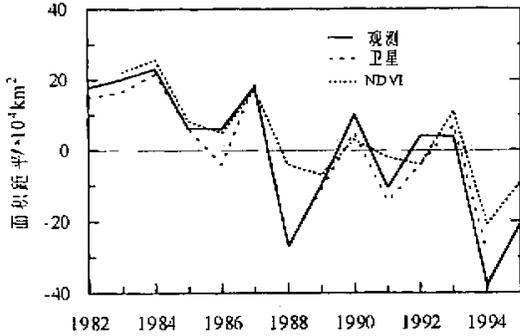


图 2 撒哈拉沙漠的扩展

Fig. 2 The extent of the Sahara desert

200 mm 等雨量线与 25°N 间面积大小,表示撒哈拉沙漠的扩展。距平参考时期为 1980—1995,同时给出地面观测及气象卫星观测的结果<sup>[5]</sup>

Calculated as the area between the 200 mm isohyet and 25°N as assessed from rainfall stations Meteosat data and the NDVI with respect to 1980—1995<sup>[5]</sup>

### 3 降水变率的机制研究

#### 3.1 海温

根据 Shukla 的观点,气候变率的产生可以简单地分为两个因素,一是大气内部过程;二是边界强迫。边界强迫中大西洋海表温度的作用引起了人们极大关注。Folland 等<sup>[9~12]</sup>发现近百年来 Sahel 地区降水与南北半球大西洋海温梯度有很密切的关系。当南半球的海温比北半球的海温低的时候,Sahel 地区为多雨期,反之则为干旱期。Rowell 等<sup>[13]</sup>用英国气象局 11 层大气环流模式做了 9 年海表温度强迫的模拟试验,包括 2 个降水偏多年(1950 和 1958 年),3 个降水正常或略少年(1949、1980 和 1989 年)

及 4 个降水量显著偏少年(1976、1983、1984 和 1987 年)。一律用 1984 年 3 月 26 日的大气初始场,而海表温度则用各年观测值,结果计算的降水距平与观测距平的相关系数达 0.95。分别对热带以外、热带、热带太平洋、热带大西洋、热带印度洋观测海表温度作强迫,而其它地区用气候平均值。模拟的 7~9 月降水与观测距平的相关系数分别为 0.55、0.72、0.79、0.62 和 0.59,这也证实海温变化的确对 Sahel 地区降水有重要影响。

Hunt<sup>[14]</sup>最近分析了耦合海洋全球大气环流模式 500 年积分结果,大气部分是澳大利亚(CSIRO)的 4 层谱模式(R21),海洋部分取为 50 m 混合层海洋。模式中 Sahel 地区的降水的确存在类似观测到的长期行为特征,如模式 332~363 年是降水偏多的时段,而随后的 364~379 年降水显著偏低,除 369 和 370 两年为弱的正距平外,其他 14 年都是很强的负值,标准化值达  $-1.5 \sim -2.0 \sigma$ ,其减少的强度与 70 和 80 年代的观测值  $-1.0 \sim -1.5 \sigma$  降水变化相比,大体相当或更低。整个 500 年模拟中,类似的年代尺度的干湿时期出现过多次(见图 3)。对模拟的 Sahel 地区降水与模拟的全球海表温度求相关,发现不仅与大西洋海温有较好的相关,与低纬度太平洋的海温也有显著的负相关。这也与 Rowell 等<sup>[11]</sup>的模拟结果吻合。这种低纬太平洋高海温—Sahel 少雨及低海温—多雨的关系在观测中也是存在的<sup>[15,16]</sup>。比较起来,大西洋海温的影响更显著。

近来研究进一步表明,热带大西洋的海表温度变化表现出一定的空间结构,当赤道北大西洋地区(约  $10 \sim 20^\circ\text{N}$ )的海温偏高时,则在几内亚湾西南的热带南大西洋地区海温偏低,反之亦然。这种模态称为热带大西洋偶极型(TAD; Tropical Atlantic Dipole)<sup>[17,18]</sup>,TAD 与非州低纬降水有很密切关系,当 TAD 表现为南正北负时,Sahel 干旱,北正南负时,Sahel 多雨。南北海温的梯度通过影响大气环流

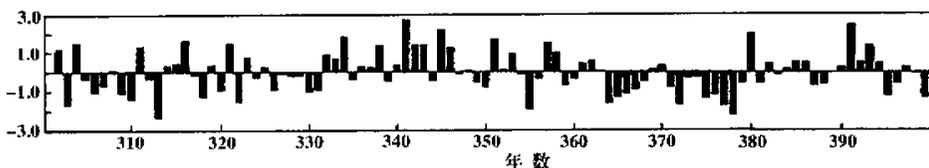


图 3 耦合模式模拟的 Sahel 地区年降水量变化(标准化值)<sup>[14]</sup>

Fig. 3 Simulated annual mean rainfall anomalies for the Sahelian region, as departures from the 500 year mean, normalized by the standard deviation<sup>[14]</sup>

造成 Sahel 降水变化, 当南半球海温低, 北半球海温高时, 热带辐合带 (ITCZ) 位置偏北, 所以 Sahel 降水偏多, 反之南半球海温高, 北半球海温低时, ITCZ 位置偏南, 所以 Sahel 降水偏少 (见图 4)。

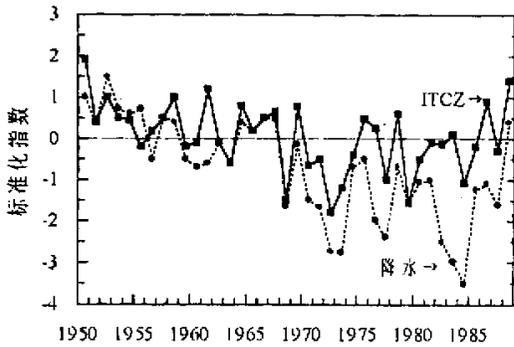


图 4 17°W 热带辐合带 (ITCZ) 的纬度位置与 Sahel 降水 (Lamb 降水指数) 的关系, 标准化值<sup>[19]</sup>

Fig. 4 Sahelian rainfall (Lamb's index) variability and the anomalous latitude of ITCZ at 17°W<sup>[19]</sup>.

### 3.2 全球变暖

陆地温度升高可以造成或加强干旱。Hulme<sup>[20]</sup>曾经分析了 20 世纪全球范围 9 个有代表性的干旱或半干旱地区的降水变化特征, 这 9 个地区分别是 ①美国西南部; ②亚洲西南部; ③东亚中部; ④非洲北部; ⑤非洲 Sahel 地区; ⑥非洲之角地区; ⑦非洲南部地区; ⑧澳大利亚; ⑨南美南部的巴塔哥尼亚地

区。他发现这 9 个地区并没有一致的变湿或变干的线性趋势, 不过在 Sahel 地区降水有显著的下降趋势, 约为  $-21\%/100\text{ a}$ 。降水的变化与温度间的关系可能比较复杂, 因为这些区域近百年来都在变暖, 但降水的变化却没有一致的特征。此外, 降水的波动受很多因素的影响, 而大气环流则是最为直接的影响因子, 所以降水的区域特征很大程度上受全球及区域大气环流、下垫面特征等因子的控制。对 Sahel 地区的降水来说, 全球变暖可能引起的非洲大陆及相邻的大洋的南北方向的温度梯度的变化更为密切 (见表 1)。

IPCC 报告<sup>[21]</sup>指出, 全球变暖对降水产生影响。全球平均降水增加, 但是区域影响差异明显。主要是热带及高纬度降水增加, 而中纬度降水减少, 考虑到世界上主要的干旱及半干旱地区大都位于中纬度, 所以全球变暖对这些地区的负面影响更为深刻。许多模式模拟结果表明, 在全球变暖情景下, 全球许多地区降水增加, 但在地中海、北部非洲及 Sahel 大部分地区年降水量是减少的。

### 3.3 陆面反馈

陆面过程对气候的影响途径主要包括两个方面。一是通过改变地表反照率影响气候; 二是通过与大气的感热、潜热、水汽等能量和物质交换而影响气候。

最早人们把 Sahel 干旱的形成归结于人类过度放牧使得地表裸露所造成的地面反照率的增加<sup>[22]</sup>,

表 1 全球 9 个干旱及半干旱地区 20 世纪降水变化 (数字代表的区域见上文)<sup>[20]</sup>

Table 1 Rainfall variability in the 9 arid and semiarid regions over globe<sup>[20]</sup>

	区 域									1~9 平均	全球陆地
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1961—1990 年降水 (mm)	483	297	254	237	451	486	457	375	340	359	999
降水趋势 (mm/100 a)	17.7	6.1	5.2	-14.9	-96.8 <sup>#</sup>	0.6	-26.5	52.4	62.6 <sup>*</sup>	-11.1	30.6 <sup>#</sup>
温度趋势 (C/100 a)	0.59 <sup>*</sup>	0.88 <sup>#</sup>	1.27 <sup>#</sup>	0.55 <sup>#</sup>	0.21	0.47	0.93 <sup>#</sup>	0.65 <sup>*</sup>	0.28	0.65 <sup>#</sup>	0.52 <sup>#</sup>
年降水与温度相关	-0.11	-0.11	-0.02	-0.34 <sup>#</sup>	-0.35 <sup>#</sup>	-0.27	-0.50 <sup>#</sup>	-0.20	0.06	-0.20	0.36 <sup>#</sup>
算相关资料长度 (年)	95	95	86	95	95	37	94	88	94	95	95

# 达到显著水平 99.9%, \* 达到显著水平 99%, 表中 5 区即为 Sahel 地区

Charney<sup>[23]</sup>为此提出了动力学解释。后来的许多模拟研究的手段包括增加地面反照率<sup>[24]</sup>, 或者只改变植被类型<sup>[25,26]</sup>, 或同时考虑反照率和土壤湿度<sup>[27]</sup>。这些模拟研究都得到类似的结论, 即地面的荒漠化都能导致降水的减少。这些模拟主要还是考虑年际的变化, 实际上观测到的降水年代变化更为重要。

目前, 大量的研究将陆面过程与大气进行耦合, Xue<sup>[28]</sup>利用 COLA-GCM 与简化的陆面生物模型

(SSiB) 耦合, 取 3 组初始场进行集合。荒漠化试验中将模式中 Sahel 地区的植被都换成荒漠类型 (带灌木的裸露地表), 控制试验取实际的植被类型。第一组试验积分 43 个月, 其余两组试验积分 31 个月。表 2 是模拟的结果, 表中观测降水数据取自 Nicholson<sup>[29]</sup>, 括号中同时也给出了 Hulme<sup>[30]</sup>数据。可见雨季 (7~9 月) 降水的变化非常明显, 与实际观测的少雨期与多雨期的差别非常接近。因此, 陆面反

馈可能对 Sahel 的干旱有相当大作用。不过,这些敏感性试验只能说是一种极端情况,实际观测的土地覆被的变化远没有这样强烈,其变化对降水的影响可能被过高估计了。

Zeng 等<sup>[31]</sup>利用大气—陆地—植被耦合动力模型,模拟 Sahel 地区 1950 年以来的降水变化,发现如果给定土壤湿度而不考虑植被的作用,模拟的降水年际变率和低频变化都远比实际观测的低;如果不考虑植被的作用但加入土壤水分与大气的相互作用,则模拟的降水年际变率有所提高,低频变化也比前一试验增强,与观测降水的相关系数达 0.44;如果同时考虑水分和植被的反馈作用,那么模拟的降水与实际观测非常一致,相关系数达 0.67。如果只考虑时间尺度大于 10 a 的低频部分,则与观测相关达 0.94。因此,他们认为植被对持续性干旱的维持或加强有重要的作用。

表 2 Sahel 地区不同季节降水变化 (mm/月)<sup>[28]</sup>

Table 2 Seasonal mean precipitation (mm/month) over the Sahel<sup>[28]</sup>

	1~3月	4~6月	7~9月	10~12月
观测:气候值	4(3)	47(26)	155(143)	15(11)
模拟:气候值(控制试验)	9	72	130	21
观测:1980s—1950s	-1(-1)	-7(-5)	-45(-43)	-6(-4)
模拟:荒漠化—控制试验	-6	-27	-39	-8

表中观测降水数据为 Nicholson<sup>[29]</sup>, 括号中为 Hulme<sup>[30]</sup>数据

## 4 沙尘事件

北部非洲广袤的沙漠和半干旱地区,是一个巨大的沙尘来源。据估计全球大气中近一半的矿物气溶胶来源于西部非洲。N'Tchayi Mbourou 等<sup>[32]</sup>分析了西非地区沙尘情况,图 5 是 50~80 年代马里的加奥(Gao)地区沙尘出现的频次变化及 Sahel 降水。可见观测到的地面沙尘事件频率呈稳定的上升趋势。沙尘事件的上升趋势与 Sahel 同期降水波动有非常好的相关关系。而且他们还发现 1 年中沙尘事件从开始出现到结束的季节长度也有线性的增长趋势。因此,沙尘事件的频繁发生主要还是由于降水的持续减少使得地表干燥及植被盖度下降造成的。

Bergametti 等<sup>[33]</sup>分析大气浮尘 Si/Al 比值,发现夏季到达加拿利(Canary)群岛的沙尘来源有两个,其中 Sahel 地区是一个重要来源地。北部非洲经常出现反气旋,位于反气旋南侧的 Sahel 地区的沙尘很容易被风向西运移到达大西洋,大量的沙尘通过大气能向东搬运超过 5 000 km 以上。Prospero

等<sup>[34]</sup>分析加勒比海地区的巴巴多斯 60 年代以来的大气尘埃浓度变化,发现有显著的增加趋势,其变化与 Sahel 地区降水有显著的负相关。这些研究表明,北非的沙尘主要可能不是起源于撒哈拉沙漠,而是其南边半干旱的 Sahel 及苏丹等地区<sup>[35]</sup>。不过,这还需要大量观测资料来证实,特别是覆盖面更广的卫星资料<sup>[36]</sup>。

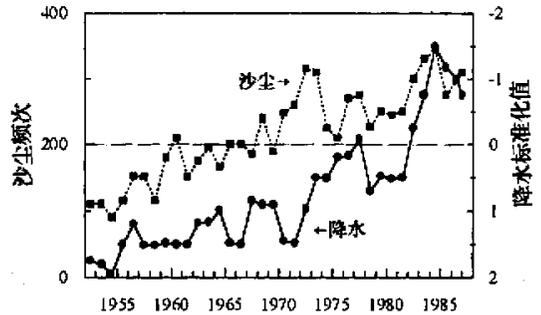


图 5 马里加奥地区沙尘事件的频次变化及 Sahel 地区降水<sup>[32]</sup>

Fig. 5 Frequency of dust occurrence at Gao, Mali, compared to rainfall anomalies<sup>[32]</sup>

降水为标准化值,其纵坐标轴反序以便对比  
shown as standard deviation, the axis of rainfall graph is inverted

## 5 结 语

Sahel 地区的降水自 60 年代后期以来呈显著的减少趋势,从 80 年代开始,Sahel 开始有增加的趋势。1999 年 7~9 月降水出现了最近 32 来的最高值。但从整个 90 年代看,降水仍然偏少,持续了近 30 多年的干旱,目前并未发生根本性的改善。降水与土地覆被有非常高的年际变率,但目前并没有足够的证据说明撒哈拉沙漠近几十年来有持续向南扩展的趋势。

Sahel 降水的影响因子包括海洋表层温度、陆面过程的反馈、全球变暖、人类的农牧业活动等。南北大西洋表层海温的梯度与 Sahel 降水有显著相关,人类活动及全球变暖都可能造成 Sahel 的降水减少。一些增加地面反照率、改变植被类型或土壤湿度等因素的敏感性试验都说明地面的荒漠化都能导致降水的减少。而考虑陆面过程与气候之间的耦合关系后,发现 Sahel 降水异常的年代尺度的变化有明显加强。Rowell 等<sup>[11]</sup>曾利用模式模拟来评估海表温度和陆面过程对降水贡献的相对大小,得到的结论是,海表温度是最重要的控制因子。不过在某些年份里土壤水分可能会起到比较大的作用。而大气内

部的动力作用则可能没有明显影响。

降水的减少造成沙尘事件频率的增加大气中的沙尘可能主要是来源于半干旱的 Sahel/苏丹地区。

一些研究发现 Sahel 地区的干旱化过程与我国华北有很大的相似性<sup>[37,38]</sup>,突出表现为 60 年代中期降水有突变性质的减少。二者之间可能存在内在的联系,因此了解 Sahel 地区降水的变化规律及其机制,对研究我国北方地区的干旱化趋势及预测有很强的现实意义。

#### 参考文献(References):

- [1] Hulme M. Rainfall changes in Africa;1931-1960 to 1961-1990 [J]. *Int J Climato*, 1992, 12:685-699.
- [2] Janowiak J E. An investigation of interannual rainfall variability in Africa[J]. *J Climate*, 1988, 1: 240-255.
- [3] Thiaw W M, Bell G D. Assessment of the 1999 Sahel Summer rains [A]. In: *Proceedings of the Twenty-fourth Annual Climate Diagnostics and Prediction Workshop [C]*. US Department of Commerce, NOAA/NCEP, Tucson, Arisona, Nov 5-9,1999. 23-24.
- [4] Hulme M, Kelly M. Exploring the links between desertification and climate change[J]. *Enviroment*, 1993, 35(6):4-11.
- [5] Nicholson E, Tucher C J, Ba M B. Desertification, drought, and surface vegetation: An example from the west African Sahel[J]. *Bull Am Met Soc*,1998, 79:815-829.
- [6] Kerr R A. The Sahara is not marching Southward [J]. *Science*, 1998, 281:633-634.
- [7] Toker C J, Nicholson S E. Variations in the size of the Sahara, 1980 to 1997[J]. *Ambio*, 1999, 28:587-591.
- [8] Toker C J, Dregne H E, Newcomb W W. Expansion and contraction of the Sahara desert from 1980 to 1990 [J]. *Science*,1991, 253:299-301.
- [9] Folland C K, Palmer T N, Parker D E. Sahel rainfall and worldwide sea surface temperatures[J]. *Nature*, 1986, 320: 602-607.
- [10] Fontaine B, Trzaska S, Janicot S. Evolution of the relationship between near global and Atlantic SST modes and the rainy season in West Africa; statistical analyses and sensitivity experiments[J]. *Climate Dynamics*, 1998, 14:353-368.
- [11] Rowell D P, Folland, C K, Maskell K, *et al.* Variability of summer rainfall over tropical North Africa (1906-92)-observations and modeling[J]. *Q J Roy Meteorol Soc*, 1995, 121:669-704.
- [12] Rowell D P. Reply to comments by Sud and Lau (1996): Further analysis of simulated interdecadal and interannual variability of summer rainfall over tropical north Africa[J]. *Q J Roy Meteorol Soc*, 1996, 122:1 007-1 013.
- [13] Rowell D P, Forlland C K, Maskell K, *et al.* Modeling the influence of global sea surface temperatures on the variability and predictability of seasonal Sahel rainfall[J]. *Geophy Res Lett*, 1992,19(9):905-908.
- [14] Hunt B G. Natural climatic variability and Sahelian rainfall trends [J]. *Global and Planetary Change*, 2000, 24: 107-131.
- [15] Fontaine B, Janicot S. Sea surface temperature fields associated with West African rainfall anomaly types[J]. *J Climate*, 1996, 9:2 935-2 940.
- [16] Ward M N. Diagnosis and short-lead time prediction of summer rainfall in tropical northern Africa at interannual and multidecadal timescales[J]. *J Climate*, 1998,11:3 167-3 191.
- [17] Enfield D B, Mestas-Nunez A M, Mayer D A, *et al.* The dipole tropical Atlantic SST: Common? Random? Intrinsic? [A]. In: NOAA. *Proceedings of the Twenty-Third Annual Climate Diagnostics and Prediction Workshop[C]*. October 26-30,1998. US Department of Commerce, NOAA, 1999.
- [18] CLIVAR. A Study of Climate Variability and Predictability [R]. Science Plan, August 1995. WCRP-89, WMO/TD No,690.1995.
- [19] WCRP, CLIVAR. A Research Programme on Climate Variability and Predictability for the 21th Century [R]. WCRP No 101, WMO/TD No 853,1997. 29.
- [20] Hulme M. Recent Climatic change in the world's dryland[J]. *Geophy Res Letters*, 1996, 23(1): 61-64.
- [21] IPCC. *Climate Change 1995: the Science of Climate Change [R]*. Houghton J T, Meira Filho F G T, Callander B A, *et al.*, eds. UK: Cambridge Univ Press, 1996.
- [22] Otterman J. Baring high-albedo soils by overgrazing: a hypothesized desertification mechanism[J]. *Science*, 1974, 186:531-533.
- [23] Charney J G. Dynamics of desers and drought in the Sahel [J]. *Q J R Meteorol Soc*, 1975,101:193-202.
- [24] Laval K, Picon L. Effect of a change of the surface albedo of the Sahel on climate[J]. *J Atmos Sci*,1986, 43:2 418-2 429.
- [25] Xue Y, Shukla J. The influence of land surface properties on Sahel climate. Part I: Desertification[J]. *J Climate*, 1993,6: 2 232-2 245.
- [26] Dirmeyer P A, Shukla J. The effect on regional and global climate of expansion of the world's deserts [J]. *Q J R Meteorol Soc*, 1996,122:451-482.
- [27] Sud Y C, Molod A. A GCM simulation study of the influence of Saharan evapotranspiration and surface-albedo anomalies on July circulation and rainfall [J]. *Mon Wea Rev*, 1988,116:2 388-2 400.
- [28] Xue Y K. Biosphere feedback on regional climate in tropical north Africa [J]. *Q J R Meteorol Soc*, 1997, 123:1 283-1 515.
- [29] Nicholson S E. An overview of African rainfall fluctuations of the last decade[J]. *J Climate*, 1993, 6:1 463-1 466.
- [30] Hulme M. A 1951-1980 global land precipitation climatology

for the evaluation of general circulation models[J]. *Climate Dynamics*, 1992, 7:57-72.

- [31] Zeng N, Neelin J D, Lau KM, *et al.* Enhancement of interdecadal climate variability in the Sahel by vegetation interaction[J]. *Science*, 1999, 286:1 537-1 540.
- [32] N'Tchayi Mbourou G M, Bertrand J, Nicholson S E. The diurnal and seasonal cycles of wind-borne dust over Africa north of the equator[J]. *J Appl Meteorol*, 1997, 36: 868-882.
- [33] Bergametti G, Gomes L, Coude-Gaussen G, *et al.* African dust observed over Canary Islands: Source-regions identification and transport pattern for some summer situations[J]. *J Geo Res*, 1989, 94(D12):14 855-14 864.
- [34] Prospero J M, Nees R T. Impact of the North African drought and El Niño on mineral dust in the Barbados trade winds[J]. *Nature*, 1986, 320:735-738.
- [35] Nicholson S. Land surface processes and Sahel climate[J].

*Reviews of Geophysics*, 2000, 38(1):117-139.

- [36] Husar R B, Prospero J M, Stower L L. Characterization of tropospheric aerosols over the oceans with the NOAA advanced very high resolution radiometer optical thickness operational product[J]. *J Geophys Res*, 1997, 102:16 889-16 909.
- [37] Huang Ronghui, Xu Yuhong, Zhou Liantong. The interdecadal variation of summer precipitations in China and the drought trend in north China [J]. *Plateau Meteorology*, 1999, 18(4):465-476. [黄荣辉, 徐予红, 周连童. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势. *高原气象*, 1999, 18(4):465-476.]
- [38] Yan Zhongwei, Ji Jinjun. Climatic jump over the northern hemisphere in 1960s I. summer precipitation and temperature[J]. *Sciences in China(B)*, 1990, 20:97-103. [严中伟, 季劲钧. 60年代北半球夏季气候跃变. I. 降水和温度变化[J]. *中国科学(B辑)*, 1990, 97-103.]

## PROGRESS IN THE STUDY ON SAHEL CLIMATE AND ENVIRONMENTAL CHANGE

SHI Pei-jun, GONG Dao-yi

(*Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Institute of Resources Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

**Abstract:** This paper examines the Sahel climate and environmental changes. It is helpful to understand the environmental problems in China's arid and semiarid regions. The severe drought has continued for about 30 years since the late 1960s. There are upward trends in Sahel rainfall since 1980s with the magnitude of +12%/10 a, and the rainfall in July-September of 1999 is the highest since 1968. But the decadal mean of 1990s is also very low, there is no signal showing the end of the prolonged desiccation. Many factors show influence in Sahel rainfall, including sea surface temperature (especially over the Atlantic Ocean), land surface processes, global warming and human activities such as overgrazing. In some years, soil moisture interaction may play a key role but sea surface temperatures are the dominant control factor. Internal dynamics are shown to have little effect. Looking at the Sahel as a whole, human activities also show little contribution to the Sahel climate and environmental changes. Some studies found that there are abrupt changes during the middle 1960s for the rainfall in both Sahel and northern China. The rainfall changes in these two regions show strong connection, thus the studies on Sahel drought is helpful for understanding the causes of variations of rainfall over northern China.

**Key words:** Sahel; Climate; Environmental change; Drought.