

近百年中国华北农牧交错带与非洲 Sahel 地区环境变化的比较分析

毛 睿, 龚道溢, 房巧敏

(北京师范大学资源学院, 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875)

摘要: 非洲 Sahel 地区与中国华北农牧交错带在环境特征及演变过程中体现出许多相似之处, 存在明显内在联系。对两个地带近百年降水变化、植被覆盖、干旱事件和沙尘事件对比分析, 可以对我国干旱/半干旱地区环境变化的相关科学问题有更好认识。两个地区年降水量序列的年代际变化趋势有很大相似性。非洲 Sahel 地区年降水量在 1950s 以前存在明显的年际变化特征, 从 1960s 中期起主要以年代际变化为主; 其大部分地区植被覆盖表现为增长趋势; 降水量年代际变化可能是影响该地区干旱的重要因素, 温度变化也可能存在作用; 该区沙尘暴频次年际、年代际变化与降水量相应尺度变化有显著关系, 年均温变化和天气变率可能具有一定影响。华北农牧交错带年降水量以年际变化为主要特征, 有明显低频波动; 该带偏北和偏东地区植被覆盖增长比较显著, 南部部分地区植被覆盖呈下降趋势; 降水量年代际变化是影响该地区干旱的重要因素, 但相同降水量可能引发不同程度的干旱; 该带春季沙尘暴频次与前冬温度变化及天气变率有密切联系, 与春季降水量也有一定关系。

关键词: 非洲 Sahel 地区; 华北农牧交错带; 环境变化; 比较分析

1 引言

我国华北农牧交错带与非洲 Sahel 地区处于各自季风系统的尾闾区, 其生态、环境和气候受季风活动的影响至为深刻, 而且又都属于干旱/半干旱地区, 是全球气候变化最敏感的地区, 也是环境非常脆弱的地区^[1,2]。这两个地区生态、环境和气候的变化具有很强的波动性, 常常对当地社会和经济造成严重冲击, 研究和了解其生态、环境和气候变化的特征及相互联系, 揭示其演变的自然驱动力, 对社会经济长远发展和规划具有重要意义。

华北农牧交错带与非洲 Sahel 地区在环境特征及其演变的过程中都体现出许多的相似之处, 而且存在明显的内在联系^[3-5]。文献[6]通过对两个地区全新世以来的环境对比分析, 认为两个地带自然地理环境及其自全新世以来的环境演变具有很大程度的相似性; 自全新世以来两个地带均出现过几乎同步的 8 个千年尺度的冷暖、干湿旋回; 在近百年的干湿变化方面都有 10~20a 变化周期; 在少雨期和多雨期的转变过程中非洲 Sahel 地区较北方农牧交错带提前 5a 以上。Ren 等^[7]对中国北方和非洲 Sahel 地区在年代际尺度上的降水量变率及其相

收稿日期: 2007-04; 修订日期: 2007-06.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 2006CB400505; 教育部优秀青年教师资助计划 EYTP-1964; 霍英东教育基金-81014.

作者简介: 毛睿(1980-), 男, 甘肃兰州人, 博士生, 从事全球变化及气候系统诊断分析。E-mail: mr@ires.ac.cn

应的环流特征做了分析,得出两地在 1950s 以前年代际变率较弱,而在 1960s 以后经历较长时间的干旱;前者在 1970s 后期降水出现转折,而后者在 1965 年左右出现转折;降水变率与局地环流调整有关。严中伟等^[34]指出在 20 世纪 60 年代中期前后北半球气候发生一次突变,其中北非、中国等地区出现一致性的变干,这是一条包括北非、印度西北部、中国北部和东部以及日本北部在内的行星尺度带的降水同位相变化,而其南北侧各有一条反位相变化带,说明北非 Sahel 地区和华北农牧交错带可能存在内在关联。文献[8]也指出在亚非季风带上存在一个年代际的大气环流遥相关波列,正是由于此波列的作用,使得我国华北地区所发生的干旱化与北非 Sahel 地区的干旱化存在着明显的关联现象。

以往对华北农牧交错带和非洲 Sahel 地区的对比研究存在如下问题:一是时间序列的分辨率过低和时期过于久远,缺乏对高分辨率和较近时期的气候要素序列进行对比。现在通过对近百年气候要素序列进行对比,能准确而全面地检测出影响环境变化的重要因子,如海温(SST)的作用^[9],以及人类活动的反馈机制^[10]等,这些都是低分辨率历史气候资料欠缺的;二是参与分析的气候要素比较单一,缺乏综合比较和互相印证。因此本研究基于全球变化及亚洲季风和非洲季风系统这两大背景,把华北农牧交错带和非洲 Sahel 地区联系在一起,从宏观角度对两个地区近百年降水变化、植被覆盖、干旱及沙尘事件进行综合对比分析。

2 降水量

2.1 降水量序列

华北农牧交错带的范围和位置因研究目的和划分指标不同而有所差异,但是种种划分方案中最核心的地区则没有本质区别^[11],即位于内蒙古高原东南边缘和黄土高原北部。本文依据文献[12]确定了华北农牧交错带的范围,即以(35°N, 109°E)、(41°N, 109°E)、(47°N, 121°E)和(41°N, 121°E) 4 个顶点围成的四边形区域(图 1b)。该区域涵盖了 18 个站,其降水量资料由中国气象局提供,从 1951 年开始。其中北京、朝阳、呼和浩特和太原等站有 1880 年以来的降水资料^[13]。文献[12]指出,由于以上 18 站与其中 4 站的夏季降水量相关系数为 0.94,所以用 4 站夏季降水量来反映整个华北农牧交错带夏季降水量的变化特征是可信的。我们依据此法计算得出 18 站与 4 站年降水量相关系数为 0.93,所以用 4 站年降水量序列来代表整个华北农牧交错带年降水量变化特征。分析时段为 1880~2001 年,共 122 年(图 2d)。为方便比较,以 1961~1990 年为参考进行了标准化处理。

由于非洲 Sahel 地区范围的不确定性,图 2 给出了 3 条不同的降水序列。Hulme^[14]提供了区域 10°~20°N 和 15°W~30°E (图 1a, 虚线所围区域)6~9 月平均降水量序列(图 2b),长度为 1900~1995 年,取自 <http://www.cru.uea.ac.uk/tiempo/floor2/data/sahel.htm>; Mit-cheell^[15]提供了区域 10°~20°N 和 20°W~10°E(图 1a, 实线所围区域)6~10 月平均降水量序列(图 2c),长度为 1898~2004 年,取自 http://jisao.washington.edu/data_sets/sahel/; Nicholson^[16]提供了 Sahel 地区年平均降水量(图 1a 中点线所围区域,图 2a),长度为 1901~1994 年,取自 http://jisao.washington.edu/data_sets/nicholson/。为方便比较 3 个序列都以 1961~1990 年为参考进行标准化处理。因为 Sahel 年降水量与雨季降水量相关达到 0.8~0.93 之间,所以图 2b 和图 2c 中降水量序列基本能代表 Sahel 年降水量变化^[17]。从整体看,Sahel 地区的 3 条降水量序列除了在

1900~1905 年存在差异外, 其余时段的降水变化具有很高的一致性, 特别是 1930s 以后一致性非常好。

2.2 年降水量变化特征

从图 2(a-c)可以看出 Sahel 降水的波动性和近百年的显著减少趋势。该地区年降水量变化具有以下 2 个特点:(1)降水变化在 1950 年前后出现明显的差异;(2)从 1960s 中期开始北非 Sahel 地区降水持续减少。在 1950 年以前, Sahel 地区降水较多, 有明显的年际变化特征, 即干湿事件交替产生, 持续时间短。年际分量方差占到原始序列方差的 82.9%。比较明显的干旱事件发生在 1910s 和 1940s 的初期。1950 年以后非洲 Sahel 地区的降水特征发生突然变化, 降水明显减少(线性趋势为 $\sim 0.76\sigma/10\text{yr}$, 通过 99% 信度检验), 而且主要以年代际变化为主, 年际变化明显变弱, 年代际分量方差占到原始序列方差的 86.9%。其中 1972~73 年, 1982~83 年成为 20 世纪最严重的干旱事件, 强度远远超过 1910s 和 1940s 的旱灾^[18,19], 尤其 1982~83 年成为近百年来 Sahel 降水最少的两年。这种变化很可能与大西洋海表温度(SST)、ENSO、季风环流系统的范围和强弱变化和大尺度海陆热力对比等现象有密切关系^[3-4,8,20-22]。通过功率谱分析, 得出降水周期主要体现在两种时间尺度上, 年际尺度上为 2.4 年和 3.2 年, 年代际尺度上为 58 年周期, 与 Nicholson 等结论较接近^[17]。近年来 Sahel 地区的降水有所恢复, 年际变化的特征也开始明显, 但是降水量依然低于 1970s 以前的水平^[23]。

从图 2d 中可以看出, 华北 4 站年降水量存在明显的年际变化, 旱涝交替明显; 从长期变化来看, 也有明显的低频波动。在整个序列中, 年际分量为主要变化特征, 其方差占到原始序列方差的 77.0%, 而且降水量变化幅度较小。在 1880~1890s 中期、1920~1930s 和 1950s~1960s 中期, 降水都是处于偏多的时期; 在 1898~1910、1940s、1980s 和 2000 年左右都是偏干的时期。通过功率谱分析得出, 华北农牧交错带年降水量变化显著周期主要为 2.5 年、5.0 年和 35 年周期, 与文献[12]结果一致。

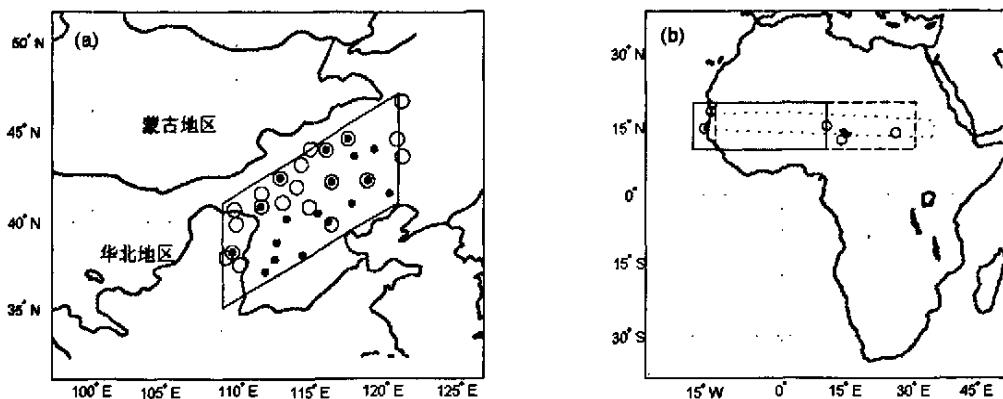


图 1 研究区域站点分布

Fig.1 The distribution of stations of the region studied in this paper

(a) 华北农牧交错带, (b) 非洲撒赫尔地区, ("○": 沙尘暴观测站点; "●": 降水观测站点)

(a) agro-pasture zigzag zone in Northern China, (b) Sahel. "○": dust storms stations; "●": precipitation stations

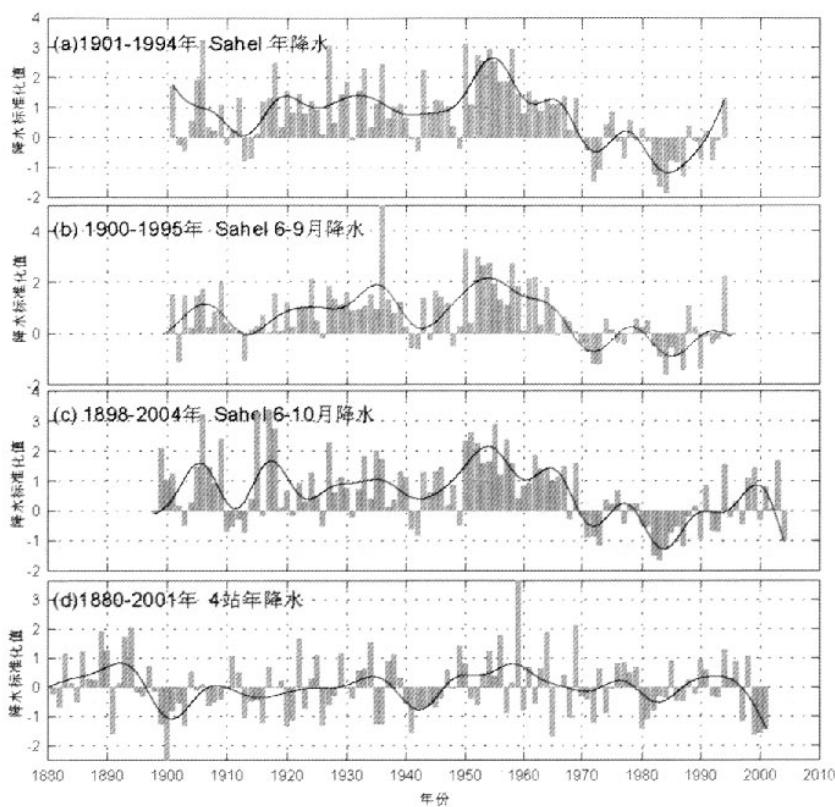


图2 研究区降水序列

Fig.2 Time-series of rainfall over the research areas

(a) $8^{\circ}\text{--}18^{\circ}\text{N}$, $20^{\circ}\text{W}\text{--}18^{\circ}\text{E}$ 年均降水量标准化序列^[15]; (b) $10^{\circ}\text{--}20^{\circ}\text{N}$, $15^{\circ}\text{W}\text{--}30^{\circ}\text{E}$ 平均 6~9 月降水量标准化序列^[13]; (c) $10^{\circ}\text{--}20^{\circ}\text{N}$, $20^{\circ}\text{W}\text{--}10^{\circ}\text{E}$ 平均 6~10 月降水量标准化序列^[14]; (d) 北京、呼和浩特、朝阳和太原等 4 站年均降水量标准化序列^[12]。(为便于比较, 参考时段均为 1961~1990 年, 实线表示年代际变化分量)。

(a) $8^{\circ}\text{--}18^{\circ}\text{N}$, $20^{\circ}\text{W}\text{--}18^{\circ}\text{E}$, annual rainfall^[15]; (b) $10^{\circ}\text{--}20^{\circ}\text{N}$, $15^{\circ}\text{W}\text{--}30^{\circ}\text{E}$, June-September^[13]; (c) $10^{\circ}\text{--}20^{\circ}\text{N}$, $20^{\circ}\text{W}\text{--}10^{\circ}\text{E}$, June-October^[14]; (d) annual rainfall of four stations^[12]。(Values are standardized by the mean of 1961~1990. Solid lines mean the inter-decadal components)

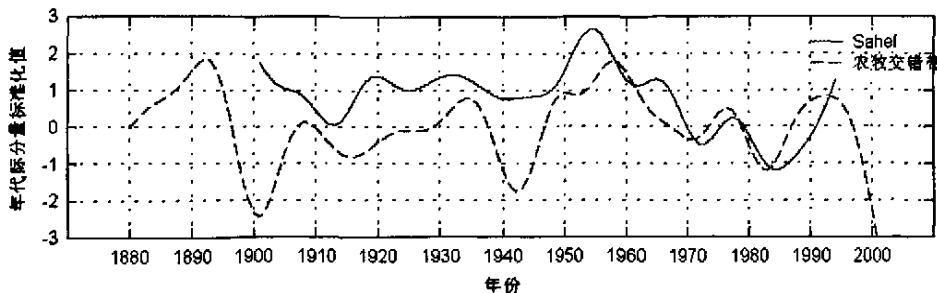


图3 研究区降水量年代际分量标准化值

Fig.3 The standard value of inter-decadal components for Sahel and agro-pasture zigzag zone in Northern China

文献[6]指出,非洲 Sahel 地区和中国农牧交错带降水的波动周期十分相近,存在 10yr 左右、20yr 左右的准周期,他们对降水量序列进行 5yr 平滑处理,发现两个地带平滑曲线基本相同,但非洲 Sahel 地区比中国农牧交错带提前 5yr 左右。我们通过对两个地区年降水序列年代际分量(10 年以上尺度分量)进行比较得出,两个地区降水量序列的年代际变化趋势有很大相似性(图 3),相关系数为 0.37。在 1908~1920 年,Sahel 地区和华北农牧交错带都是先减少然后增加;从 1920 年开始,非洲 Sahel 地区降水基本保持稳定,波动幅度较小,从 1930s 中期开始略微下降,而华北农牧交错带从 1920 年开始降水持续增长,到 1930s 后期突然减少,在 1940s 初期又开始增长;在 1950s 初期 Sahel 地区和华北农牧交错带降水都开始增长,从 1950s 中后期开始减少,一直持续到 1980s 中期后又开始增长,在 1970s 都经历了增加到减少的过程;从 1990s 中期开始华北农牧交错带开始急剧减少。两个地区年代际变化分量的一致性可能与全球尺度的海温异常和气温差异有关^[34]。严中伟等^[24,25]曾指出,20 世纪 20 年代和 60 年代全球范围的增温和降温导致亚非夏季风相应的增强和减弱。这说明全球的温度调整变化使得夏季风减弱,进而可能造成水汽输送量减少,导致北方干旱化发展。

3 植被覆盖

NDVI 指数可以较好反映地表植被覆盖的动态变化^[26]。通过对 NDVI 数据对比,不仅能够表示不同地区植被覆盖动态变化及其差异,而且能间接反映地区环境变化。本文采用的月最大值 NDVI 数据(UMD GLCF GIMMS-NDVIg 资料)分辨率为 8km×8km,资料下载网址是 <http://iridl.ideo.columbia.edu/SOURCES/.UMD/.GLCF/.GIMMS/.NDVIg/.global/.ndvi/>,该资料已经过大气订正等处理,具体技术细节可参考文献[27]。文献[26]指出,这套 NDVI 数据对于半干旱和干旱地区研究具有较高的精确度,与其他 NDVI 数据相比,有一定优越性。考虑到 NDVI 数据能与较长降水量序列对比,本文用 10°~20°N 和 15°W~10°E 所围区域 NDVI 平均值来表示 Sahel 地区 NDVI 变化。同样以(35°N, 109°E)、(41°N, 109°E)、(47°N, 121°E)和(41°N, 121°E) 4 个顶点围成的四边形区域 NDVI 平均值来代表华北农牧交错带的 NDVI 变化。降水和 NDVI 指数分析季节均为 6~10 月,时间长度为 1981~2003 年。

华北农牧交错带植被状况好于非洲 Sahel 地区,NDVI 指数前者明显高于后者(图略)。从区域整体来看,前者 NDVI 指数略微有增长趋势(0.57%/10yr),年际变化明显,年际间指数波动幅度较大。后者增长趋势明显(2.35%/10yr),年际变化不明显(表 1)。两个地区 NDVI 指数在 1998 年前有较好的一致性,在 1998 年后变化呈相反趋势,可能与两个地区降水量年代际变化有关(图版 II,图 4a)。从区域内部来看,NDVI 指数变化存在区域差异。非洲 Sahel 大部分地区 NDVI 指数表现为增长趋势(1982~2002 年),在马里、毛里塔尼亚和乍得等地 NDVI 指数增长率达 50%^[26,29],部分地区植被覆盖基本没有太大变化(图版 II,图 4b)。文献[26]指出,在 1980s 的早期和中期,Sahel 地区干旱最为严重,所以近 20 年植被覆盖增加可能是由于干旱发生后降水量增加而造成,而且降水量增加并没有消除长期干旱趋势。华北农牧交错带偏北和偏东地区植被覆盖增长比较显著,增幅高达 50% 左右,在南部有部分地区植被覆盖呈现下降趋势,降幅达到 20~30%,其余地区变化趋势不明显(图版 II,图 4c),与 Fang 等^[29]研究结果基本一致。Fang 等^[29]指出,山东、河南、河北和安徽等农业省份 NDVI 有明显的增加,主要

与农业产量、气候变化、城市化和农业发展有密切联系。

对于半干旱/干旱地区来说,降水量变化对植被动态变化有至关重要的作用。同时我们也认识到,植被覆盖变化与区域降水量的对应关系存在区域差异。因此有必要对两个地区降水与 NDVI 指数的关系进行对比分析。从图 5a、图 5b 以及表 1 可以看出,非洲 Sahel 地区和华北农牧交错带降水量与同期 NDVI 指数有非常好的一致对应关系,基本上为降水量偏多(少)年份,NDVI 指数也相应偏高(低),相关系数依次为 0.49 和 0.67,都通过 95% 信度检验。近二十多年非洲 Sahel 地区降水与 NDVI 指数都表现为增长趋势 (81.73% /10yr 和 2.35% /10yr),而华北农牧交错带降水与 NDVI 指数的增加趋势不太明显 (-2.00%/10yr 和 0.57%/10yr)。华北农牧交错带降水量略有下降趋势,但 NDVI 指数却有明显增加,二者相关系数为 0.67,通过 95% 信度检验。这说明该地区 NDVI 指数与降水量变化在年际尺度上存在很好响应,但当地种植活动及气温升高等因素使得 NDVI 指数显著增加^[30]。以上分析说明,降水变化是影响两个地区植被覆盖变化的重要因子,NDVI 指数在年际、年代际尺度上都对降水相应尺度变化存在明显响应。当然温度变化以及人类活动对华北农牧交错带 NDVI 指数变化存在一定影响作用。

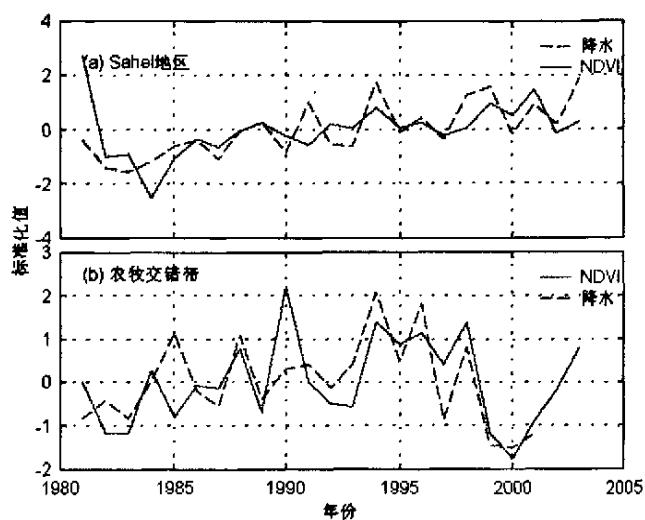


图 5 研究区 NDVI 指数与降水量标准化序列

Fig.5 Time-series of standard values of NDVI and rainfall over the research areas

(a) 非洲 Sahel 地区, (b) 华北农牧交错带 (虚线为降水量, 实线为 NDVI 指数)

(a) Sahel, (b) the agro-pasture zigzag zone. (The solid line means NDVI and the dashed line is for precipitation)

表 1 Sahel 地区和华北农牧交错带 NDVI 指数与降水量相关系数及其线性趋势

Tab.1 The correlation coefficient and linear trend of Sahel and agro-pastoral zone, significant above 95% confidence level are bold

	Sahel NDVI	Sahel 降水	华北 NDVI	趋势
华北 NDVI	0.01	—	—	0.57%/10yr
华北降水	—	0.24	0.67	-2.00%/10yr
Sahel NDVI	—	0.49	—	2.35%/10yr
Sahel 降水	—	—	—	81.73%/10yr

注: 相关系数及线性趋势显著水平超过 95% 用黑体表示

4 干旱趋势

Palmer 干旱指数(The palmer drought severity index, 简称 PDSI)在全球有广泛的应用^[3], 便于全球半干旱/半湿润地区之间的气候变化比较。我们用 PDSI 指数来反映两个地区近百年干旱情况的变化趋势。文中 PDSI 指数采用 Dai 等^[3]的工作, 分析季节为夏季^①。

非洲 Sahel 地区 PDSI 指数年代际变化明显, 具有非常明显的持续性, 其中 1910~1925 年、1935~1950 年和 1968~2003 年为严重干旱时期, 1895~1910 年、1950~1967 年为相对湿润时期(图 6b)。PDSI 指数存在长期减少趋势($-0.36/10\text{yr}$, 通过 99% 信度检验), 说明 Sahel 地区干旱一直在加剧。从图 6b 还可以看出, PDSI 指数与降水量的年代际变化趋势基本一致, 峰值与谷值对应很好, 而且降水量越少, 干旱越严重。这说明降水量年代际变化是影响非洲 Sahel 地区干旱的重要因素。

华北农牧交错带 PDSI 指数年代际变化也很明显, 1875~1883 年、1895~1914 年、1916~1935 年、1980~2003 年为严重干旱时段。1870~1874 年、1890~1894 年、1954~1962 年为相对湿润时段(图 6c)。PDSI 指数长期变化趋势不明显。降水量与 PDSI 指数年代际分量变化趋势基本一致。但是相同降水量可能引发不同程度的干旱, 这可能与夏季温度的年代际变化有关。值得注意的是, 在 1940 年左右, 两个地区 PDSI 指数的序列相关性出现反向关系(图 6a)。在 1940 年以后, 相关系数达到 0.41, 通过 99% 信度检验;而在 1940 之前, 相关系数为 -0.20, 未通过 95% 信度检验。

5 沙尘事件

极端干旱事件或降水偏少时期很可能为沙尘暴频次增加提供背景场, 对沙尘暴频次的年际尺度或年代际尺度变化有一定的影响。因此我们用沙尘暴、沙尘频次序列来反映非洲 Sahel 地区和农牧交错带的环境变化特征。非洲 Sahel 地区沙尘暴频次观测序列少而且时间较短, 加之战乱等原因, 序列存在中断现象。本文采用尼日利亚 Potiskum(1955~1979 年)、塞内加尔 Dakar(1966~1979 年)、苏丹 Elfasher(1950~1983 年)、毛利塔尼亚 Nouakchott(1960~1986 年)和马里(1952~1988 年)共 5 条序列^[32,33], 以及尼日尔沙漠干季沙尘频次序列(1925~1998 年)^[34], 具体位置见图 1a。华北沙尘暴频次序列由中国气象局提供。

非洲 Sahel 地区沙尘暴频次有明显的年际变化和年代际变化特征。从 1950s 后期沙尘暴频次逐渐增多, 到 1960 年达到一个峰值, 然后开始下降, 波动幅度较小(图 7a)。整个 1960s 沙尘暴频次都保持较低水平, 但是在 1960s 末期和 1970s 初期沙尘暴频次急剧增多。从 1970s 后期开始, 沙尘暴频次波动幅度加大, 年际变化更加明显(图 7a~d)。但不同区域表现为不同长期变化趋势, 尼日利亚沙尘暴频次逐渐减少(图 7a), 而其他区域则沙尘暴频次依然增多, 并在 1980s 初期达到峰值(图 7b~d)。这种区域差异主要是由沙尘暴频次与局地降水量关系的地域差异造成的。尼日尔沙漠干季沙尘事件频次反映了非洲 Sahel 地区沙尘频次年代际变化特征(图 8)。尼日尔沙尘频次从 1925~1944 年一直呈上升趋势, 在 1944 年后开始下

①取自 <http://www.cgd.ucar.edu/cas/catalog/climind/pdsi.html>

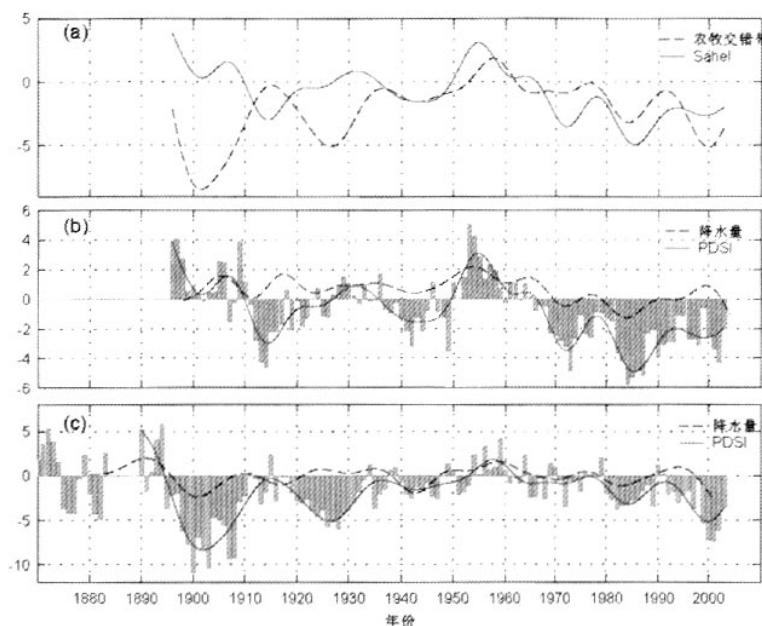


图 6 研究区 PDSI 和降水量年代际分量标准化值

Fig.6 The interdecadal components of PDSI and rainfall over the research areas

(a) Sahel 地区, (b) 华北农牧交错带, 实线和虚线依次表示 PDSI 指数和降水量. (c) PDSI 指数年代际分量
 (a) Sahel, (b) agro-pasture zigzag zone in Northern China, the solid line and dashed line are for the
 inter-decadal components of PDSI and precipitation, respectively. (c) The inter-decadal components
 of PDSI for Sahel and agro-pasture zigzag zone

降,一直到 1955 年左右开始回升,缓慢增加到 1973~1974 年后又开始下降,到 1979 年后开始上升,在 1986~87 年达到峰值后下降,下降到 1995 年后略微有所上升。总体来看,在 1973~1974 年左右尼日尔的沙尘频次均值存在突变,后期均值要明显高于前期均值。长期序列中包括 3 个峰值时段,依次为 1943~1945 年、1972~1974 年和 1985~1987 年。

Sahel 大部分地区沙尘暴频次与降水变化在年际尺度上对应较好,但在部分地区没有明显对应关系^[32]。毛利塔尼亚 Nouakchott 沙尘暴频次与前三年降水量线性相关系数为 -0.75,与上年降水量相关系数为 -0.53,这种关系在尼日尔也非常显著。Nouakchott 自 1968 年降水量极端少后沙尘暴频次急剧增加。1970 年和 1971 年降水只占 1949~1967 年平均降水的 32% 和 12%,导致年沙尘暴频次在 1970~1974 年从 6 天跃升为 65 天。随着 1975 年降水的增多,随后两年沙尘暴频次减少。在 1977 年、1982~1983 年的极端干旱事件导致随后年份沙尘暴频次急剧增加(图 7b)。苏丹沙尘暴频次在 1970 年左右开始突然增多,特别是 1972~1973 年的干旱事件导致随后 Elfasher 沙尘暴频次的显著升高,在 1974 年达到峰值。由于 1974 年降水量偏多,1975~1976 年沙尘暴频次降低(图 7c)。塞内加尔 Dakar 在 1968 年的低降水量标志着随后沙尘暴频次的增加趋势,在 1970 年沙尘暴频次达到峰值后保持稳定。在 1973~1975 年降水量相对回升,沙尘暴频次显著下降,到 1975 年后降水又明显减少,随后沙尘暴频次增多(图 7d)^[32]。文献[33]中图 5 表示,50~80 年代马里加奥(Gao)地区可见观测到的地面

沙尘事件频率呈稳定的上升趋势, 其上升趋势与 Sahel 同期降水波动有非常好的相关关系(图 9)。但在部分地区沙尘暴频次与降水量对应关系不太明显, 如尼日利亚 Potiskum 在 1970~1976 年沙尘暴频次与相应年降水量没有明显对应关系(图 7a)。主要原因是该地远离沙源地, 沙尘暴频次与局地降水量没有直接联系。但是 1960s 后期 Sahel 地区干旱事件导致沙尘暴频次增加。图 8 中尼日尔沙漠干季沙尘事件频次的 3 个峰值, 也恰好对应 Sahel 地区年降水量偏少时段, 尤其后两个时段是极端偏少时段。降水量持续偏少且程度越强, 则沙尘频次偏多。以上分析说明, 在年际尺度上 Sahel 地区降水量年际变化对沙尘、沙尘暴频次年际变化有显著作用, 但在部分地区与沙源地降水量有关;而在年代际尺度上 Sahel 地区极端干旱事件和降水量年代际变化都可能对沙尘频次长期变化趋势有重要影响。

前期和当前季节的温度变化也能通过影响下垫面等因素, 进而影响沙尘暴频次变化。Sahel 地区近百年温度变化比降水变化要单调一些, 除了在 1930~1950 年、1968~1974 年和 1975~1998 年年温度依次偏高达 0.7°C 、 0.3°C 和 0.5°C 左右外, 其余年份年温度基本不变(文献[35], 图 2)。从图中可以看出, 在 1930~37 年, 温度上升, 沙尘事件增加; 在 1938~1950 年温度持续下降, 沙尘事件偏多几年后, 也开始减少; 1968~1974 年温度偏高, 沙尘频次逐渐增多; 1975~1998 年期间, 沙尘频次偏多, 其中在 1985~1988 年为近百年沙尘频次最高的时期, 刚好与温度偏高时段重合。总的来看, 温度偏高(低)时期, 尼日尔沙尘频次偏多(少), 但是在年际尺度上温度变化与沙尘频次对应不是很好。这说明, 对于非洲 Sahel 地区沙尘事件频次, 温度变化可能在年代际尺度上有一定影响。

为进行对比, 我们也列出华北农牧交错带春季沙尘暴频次。考虑到我国沙尘暴主要发生

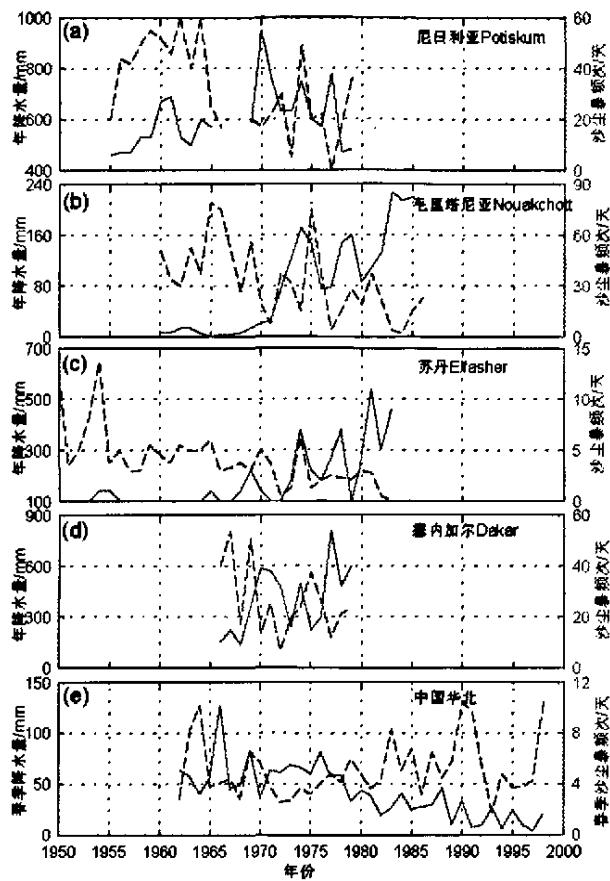


图 7 沙尘天气频次和沙尘暴频次

Fig. 7 Time-series of days with heavy haze and dust storms
(a) 年强沙尘天气, (b-d) 年沙尘暴^[27], (e) 华北春季沙尘暴频次。

虚线和实线依次为降水量和沙尘天气或沙尘暴频次

(a) Annual frequency of days with heavy dust haze, (b-d) dust storms^[27], (e) spring dust storms over the northern China.

The dashed lines and solid lines are for precipitation
and dust storms, respectively

在春季,所以本文用春季沙尘暴频次来表示全年沙尘暴频次变化。春季沙尘暴频次在1970s初期以前基本持平,从1970s末期急剧下降,然后从1980s开始缓慢下降。总的来看,春季沙尘暴频次呈减少趋势(线性趋势为 $\sim 1.2 \text{d/10yr}$,超过99%的显著水平),而降水量呈略微增加趋势(图7e)。说明降水量的长期增加是沙尘暴频次减少一个原因。

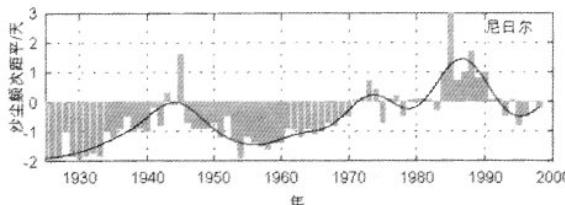


图8 干季(11~5月)沙漠沙尘频次距平^[24](实线为年代际分量)

Fig.8 Anomalies in dry season (Nov~May) desert dustiness^[24]
(The solid line means the interdecadal components)

华北农牧交错带春季沙尘暴频次与春季降水量相关系数仅为 ~ 0.28 ,未通过95%信度检验。说明降水量变化对沙尘暴频次存在重要影响,即降水量偏多,沙尘暴频次偏少。但在部分年份上二者反相关关系不明显。有研究指出,春季沙尘暴频次与前冬温度存在显著正相关关系,即温度偏高,沙尘暴频次偏多^[36,37]。说明温度变化也是华北沙尘暴频次变化的主要原因。

但是通过以上分析也可以看出,沙尘暴频次与降水、温度等气候因子在年际、年代际尺度上对应关系并不十分显著。如华北春季沙尘暴频次长期趋势明显减少,而降水量长期变化趋势不太明显。非洲 Sahel 地区在部分年份降水量与沙尘暴频次呈正反馈关系。说明除温度、降水等因子外,还有其他影响因子存在作用。文献[38]指出区域天气尺度变率与沙尘暴频次有较好关系,强烈或者频繁的天气过程将会导致沙尘暴频次增加。本文利用文献[38]中方法来计算非洲 Sahel 地区和华北农牧交错带 1000 hPa 高度场的天气尺度变率。其中非洲 Sahel 地区范围为 $10^{\circ}\text{~}20^{\circ}\text{N}$ 和 $15^{\circ}\text{W}\text{~}30^{\circ}\text{E}$,华北地区为 $105^{\circ}\text{~}120^{\circ}\text{E}$, $35^{\circ}\text{~}45^{\circ}\text{N}$ 。前者计算时段为第一年11月至次年5月,与图8一致,后者为3~5月。

从图10a可以看出,非洲 Sahel 地区天气尺度变率长期线性趋势并不明显,但存在明显的年代际变率。天气变率从1950s中期开始持续增加,到1970s中期达到峰值后下降,下降至1980s后期开始上升,一直到1990s初期又开始下降,在1990s后期又略有增加。从1950~1970s中期天气变率与图8中沙尘天气频次都表现为增加趋势,且达到峰值,说明天气尺度变率是该时段影响沙尘暴频次的重要因素。但我们也看到,天气变率后期峰值及变化趋势与沙尘频次变化对应不是很好。而且从1970s后期开始沙尘频次急剧增加,远远高于前面任何一个时期,天气变率虽然有小幅度增加,但是仍然低于1970s中期。这说明对于非洲 Sahel 地区沙尘暴频次来说,降水量变化可能起到重要作用,但天气变率作用也不容忽视。

华北天气变率年际变化比较突出,与沙尘暴频次相关系数为0.50,通过99%信度检验。说明大气环流的天气变率对华北沙尘暴频次有强烈影响,天气变率强时,沙尘暴频次增加,

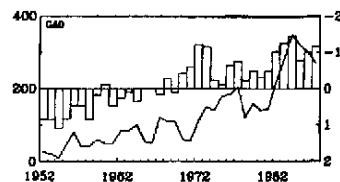


图9 马里加奥地区沙尘频次变化及 Sahel 地区降水量^[24](降水量为标准化值,其纵坐标轴反序以便对比)

Fig.9 Frequency of dust occurrence from 1957 to 1987 at Gao (solid line, left vertical axis) compared to rainfall anomalies (bargraph, right vertical axis, the axis is inverted) for the Sahelian region as a whole^[24]

反之亦然。同时天气变率有明显的长期减少趋势($-75\text{m}^2/10\text{yr}$), 说明天气变率的长期减弱, 是造成华北沙尘暴频次减少的一个重要原因(图 10b)。

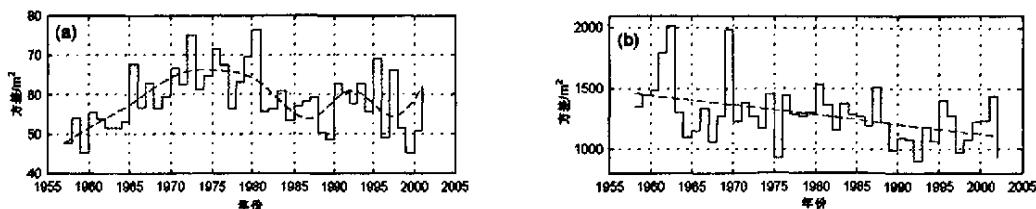


图 10 研究区 1000 hPa 高度天气尺度分量方差

Fig.10 Regional means of synoptic variances at 1000 hPa level

(a) 非洲 Sahel 地区(虚线为天气变率年代际分量); (b) 华北农牧交错带(虚线为长期趋势)

(a) Sahel(the dashed line is for the inter-decadal components of synoptic variances); (b) agro-pasture zigzag zone(the dashed line means the long-term linear trends of synoptic variances)

6 结论和讨论

以上分析得出, 非洲 Sahel 地区和华北农牧交错带年降水量序列年代际变化趋势有很大相似性。前者年降水量在 1950 年以前存在明显的年际变化特征, 从 1960s 中期开始主要以年代际变化为主; 其大部分地区 NDVI 指数表现为增长趋势; 降水量年代际变化是影响该地区干旱的重要因素, 温度变化也存在一定作用; 该地区沙尘暴频次年际、年代际变化与降水量相应尺度变化有密切关系, 年均温变化和天气变率对沙尘暴频次年代际变化可能存在一定影响。后者年降水量以年际变化为主要特征, 存在明显的低频波动; 该带偏北和偏东地区植被覆盖增长比较显著, 南部有部分地区植被覆盖呈现下降趋势; 降水量年代际变化是影响该地区干旱的重要因素, 但相同降水量可能引发不同程度的干旱; 该带春季沙尘暴频次与前冬温度变化及天气变率有密切联系, 与春季降水量也有一定关系。

严中伟等^[34]指出, 北非 Sahel 地区和华北农牧交错带可能存有内在关联。关于这一现象的机理和原因, 最初人们猜测可能是 Hadley 环流的南北变动造成了北非等热带或者副热带地区带状的降水变化一致性, 或者是海气系统的自然变率所致。黄刚^[35]指出在亚非季风带上存在着一个年代际的大气环流遥相关波列, 由于此波列的作用, 使我国华北地区发生的干旱与北非 Sahel 地区的干旱化存在着明显关联现象。研究结果只是从观测资料分析得到, 关于南、北半球气温差或海温差的减少如何导致亚非季风带北界的南移和季风减弱, 及亚非季风带上的年代际大气遥相关波列的形成机理等问题, 应从机理和数值模拟方面进一步探讨。

参考文献

- [1] Ye Duzheng, Chen Panqin. The primary study of global change of China. Beijing: Meteorology Press, 1992.
- [2] Zhang Lansheng, Fang Xiuqi, Ren Guoyu, et al. Environmental changes in the north China framing-grazing transitional zone. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing), 1997, 4(1-2): 127~136.
- [3] Yan Zhongwei, Ji Jinjun. Climatic jump over the northern hemisphere in 1960s I: Summer precipitation and temperature. Sciences in China (B), 1990, 97~103.
- [4] Yan Zhongwei, Ji Jinjun, Ye Duzheng. Climatic jump over the northern hemisphere in 1960s II: Sea level pressure and

- height at 500 hPa level. *Sciences in China (B)*, 1990, 8, 879~885.
- [5] Song Yan, Ji Jinjun. The interdecadal abrupt change of the African~Asian summer monsoon in the 1960s. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2001, 25(2): 200~208.
- [6] Shi Peijun, Ha Si. Comparison between Holocene environmental changes in north China agro~pastoral zone and Africa Sahelian belt. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing)*, 2002, 9(1): 121~128.
- [7] Ren B H, Lu R Y, Xiao Z N. A possible linkage in the interdecadal variability of rainfall over North China and the Sahel. *Advances in Atmospheric Science*, 2004, 21(5): 699~707.
- [8] Huang Gang. Global climate change phenomenon associated with the droughts in North China. *Climatic and Environmental Research*, 2006, 11(3): 270~279.
- [9] Folland C K, Palmer T N, Parker D E. Sahel rainfall variability and worldwide sea temperature, 1901~85. *Nature*, 1986, 320: 602~606.
- [10] Taylor C M, Lambin E F, Stephane N, et al. The influence of land use change on climate in the Sahel. *Journal of Climate*, 2003, 24(15): 3615~3629.
- [11] Wang Jing'ai, Xu Xia, Liu Peifang. Land use and land carrying capacity in ecotone between agriculture and husbandry in Northern China. *Resources Science*, 1999, 21(5): 19~24.
- [12] Shi Peijun, Gong Daoyi. Variability of summer rainfall over northern China and its association with thermal conditions of early stage underlying surface. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(3): 21~215.
- [13] Wang Shaowu, Gong Daoyi, Ye Jinlin, et al. Seasonal precipitation series of Eastern China since 1880 and the variability. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(3): 281~293.
- [14] Hulme M. Recent climatic change in the world's dry lands. *Geophysical Research Letters*, 1996, 23: 61~64.
- [15] Janowiak J E. An investigation of inter-annual rainfall variability in Africa. *Journal of Climate*, 1988, 1: 240~255.
- [16] Nicholson S E. An overview of African rainfall fluctuations of the last decade. *Journal of Climate*, 1996, 9: 1463~1466.
- [17] Nicholson S E, Palao I M. A re-evaluation of rainfall variability in the Sahel Part I: Characteristics of rainfall fluctuations. *International Journal of Climatology*, 1993, 13: 371~389.
- [18] Hulme M, Doherty R, Ngara T, et al. African climate change: 1900~2100. *Climate Research*, 2001, 17: 145~168.
- [19] Nicholson S E. Long-term changes in African rainfall. *Weather*, 1989, 44: 46~56.
- [20] Hulme M. Climatic perspectives on Sahelian desiccation: 1973~1998. *Global Environmental Change*, 2001, 11: 19~29.
- [21] Dai A G, Wigley T M L. Global patterns of ENSO-induced precipitation. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27: 1283~1286.
- [22] Ward M N. Diagnosis and short-lead time prediction of summer rainfall in tropical North Africa at interannual and multi-decadal timescales. *Journal of Climate*, 1998, 11: 3167~3191.
- [23] Dai A G, Lamb P J, Trenberth K E, et al. The recent Sahel drought is real. *International Journal of Climatology*, 2004a, 24: 1323~1331.
- [24] Yan Zhongwei, Nicole P M. On the relationship between global thermal variations and the wet/dry alterations in the Asian and African monsoon areas. *Acta Geographica Sinica*, 1995, 50(5): 471~479.
- [25] Yan Zhongwei, Li Zhaoyuan, Wang Xiaochun. An Analysis of Decade to Century scale Climatic Jumps in History. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1993, 17(6): 663~671.
- [26] Herrmann S M, Anyamba A, Tucker C J. Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate. *Global Environmental Change*, 2005, 15: 394~404.
- [27] Tucker C J, Pinzon J E, Brown M E, et al. An extended AVHRR 8-km NDVI data set compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(20): 4485~4498.
- [28] Olaoson L, Eklundh L, Ardoe J. A recent greening of the Sahel trends, patterns and potential causes. *Journal of Arid Environments*, 2005, 63: 556~566.
- [29] Fang J Y, Piao S L, He J S, et al. Increasing terrestrial vegetation activity in China, 1982~1999. *Science in China(C)*, 2004, 47(3): 229~240.
- [30] Gong D Y, Shi P J. Inter-annual changes in Eurasian continent NDVI and its sensitivity to the large-scale climate variations in the last 20 years. *Acta Botanica Sinica*, 2004, 46 (2): 186~193.
- [31] Dai A G, Trenberth K E, Qian T T. A global data set of Palmer Drought Severity Index for 1870~2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming. *Hydrometeorology*, 2004, 5: 1117~1130.

- [32] Goudie A S, Middleton N J. The changing frequency of dust storms through time. *Climatic Change*, 1992, 20: 197~225.
- [33] N'tchayi G M, Bertrand J J, Nicholson S E. The Diurnal and Seasonal Cycles of Wind-Borne Dust over Africa North of the Equator. *Journal of Applied Meteorology*, 1997, 36: 868~882.
- [34] Ben Mohamed A. Wind Erosion in Niger: Extent, Current Research and Ongoing Soil Conservation Activities. In: Sivakumar M V et al, eds. *Wind Erosion in Africa and West Asia: Problems and Control Strategies*. Aleppo: ICARDA, 1998. 125~133.
- [35] Hulme M. Recent climatic change in the world's drylands. *Geophysical Research Letters*, 1996, 23: 61~64.
- [36] Quan Linsheng, Shi Shaoying, Zhu Yafen, et al. Temporal-spatial distribution characteristics and causes of dust-day in China. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(4): 477~485.
- [37] Qian W H, Quan L S, Shi S Y. Variations of the dust storm in China and its climatic control. *Journal of Climate*, 2002, 15: 1216~1229.
- [38] Mao Rui, Gong Daoyi, Fan Yida. Influences of synoptic variability on spring sand storm frequency in North China. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(1): 12~20.

Comparison Analysis of Environmental Changes Between Sahel and Agro-pastoral Zone in Northern China

MAO Rui, GONG Daoyi, FANG Qiaomin

(Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, College of Resources Science & Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract: Sahel is similar to agro-pastoral zone in Northern China in some aspects concerning environmental characteristics and environmental change, and there are some obvious linkages between them. The comparison analysis between them in precipitation, vegetation, drought events and dust storms can help better understand the variability of environment and climate in semiarid/arid regions in China and Sahel. Their interdecadal changes of precipitation have the similar trends. For Sahel, the interannual variability in precipitation is dominant before 1950s, while the interdecadal changes are outstanding from the mid of 1960s. A large portion of Sahel shows an increasing trend in NDVI. The interdecadal change of precipitation may be an important factor for the occurrence of drought, and temperature may also play roles in the formation of drought. The dust storm frequency has some evident relationship with precipitation on the inter-annual and interdecadal timescales, and the annual mean temperature and synoptic variability also have some influence on it. In agro-pastoral zone in Northern China, the interannual change is an outstanding characteristic in annual precipitation. In the north and east part of the zone vegetation experiences the increasing trend, and the south part shows a decreasing trend. The interdecadal change of precipitation played a role in the forming of drought events, but the same amount precipitation reduction may cause different drought in intensity. The spring dust storm frequency has tight relationship with previous winter temperature and synoptic variability, and also has some link with spring precipitation.

Key words: sahel; agro-pastoral zone in Northern China; environmental change; comparison analysis

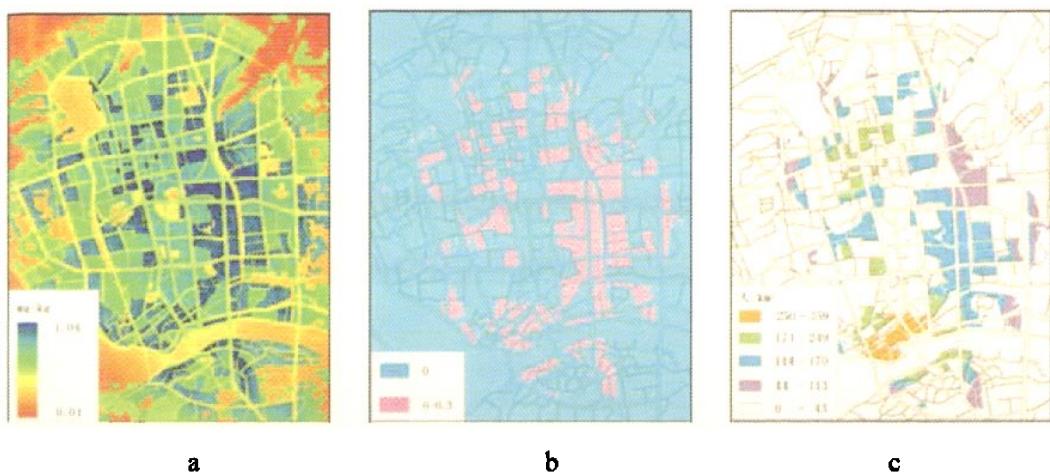


图 6 2002 年福州市 NO_x 污染物健康风险评估结果

(a-成年人日平均摄入剂量分布(mg/kg); b-健康风险评估结果; c-健康效应评估结果(人/km²))

Fig6 Health risk assessment result from nitrogen dioxide in Fuzhou City in 2002
 a-adult absorb mean dosage distribution per day (mg/kg); b-health risk assessment result;
 c-health effect assessment result (Pop/ km²)

毛 睿 等: 近百年中国华北农牧交错带与非洲 Sahel 地区环境变化的比较分析

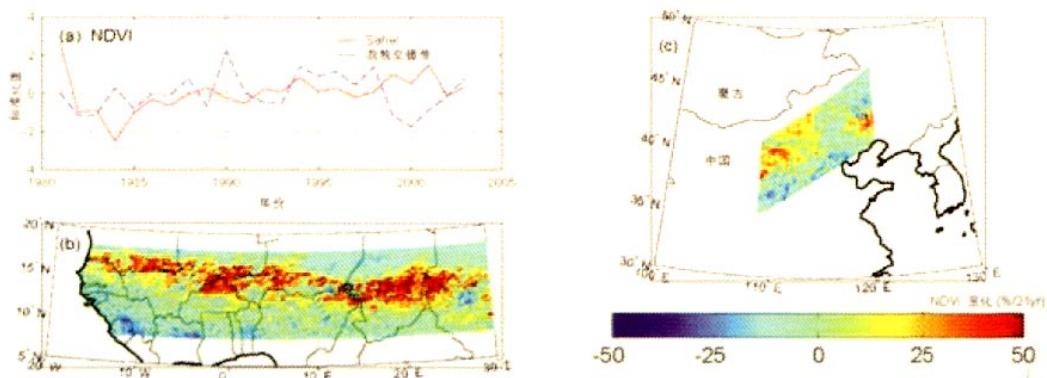


图 4 研究区夏季 NDVI 指数

(a)非洲 Sahel 地区和华北农牧交错带 NDVI 标准化值, (b) Sahel NDVI 指数变化趋势,
 (c)中国华北农牧交错带 NDVI 指数变化趋势

Fig.4 Summer NDVI over the Sahel and agro-pasture zigzag zone in Northern China
 (a) Standard value of summer NDVI, (b)Overall trends in vegetation greenness for Sahel,
 (c) Overall trends in vegetation greenness for agro-pasture zigzag zone