

中国北方过去 2000 年沙尘事件与气候变化^{*}

张自银 杨 保

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙漠与沙漠化重点实验室,兰州 730000)

摘要 文章依据冰芯、树木年轮等自然记录和历史文献记录,分析了中国北方不同地区近 2000 年的沙尘事件及其与气候变化的关系。结果表明,在干旱区西部,历史时期的沙尘变化主要受温度变化的制约,无论在 10 年尺度,还是百年尺度上,沙尘事件与温度变化均表现为显著的反相关,即气候寒冷期与沙尘频发事件相对应,气候温暖期与沙尘发生变弱期一致;在半干旱区,在 10 年尺度上温度和降水序列与沙尘发生频率均显著负相关,但在百年尺度上沙尘与降水变化的关系更为密切;在干旱区东部,沙尘与气候变化的关系具有明显的过渡性特征,气候变化对沙尘事件的作用主要在百年尺度上体现出来,沙尘与温度记录的负相关比降水更好,在 10 年尺度上气候与沙尘序列尽管也是负相关,但不显著。通过对现代气象记录的气温、降水变化和沙尘事件频数分析,其结果与历史时期情况基本一致。

主题词 气候变化 沙尘/沙尘暴 中国 过去 2000 年

中图分类号 P445.4, P467 **文献标识码** A

1 前言

利用冰芯、树木年轮、孢粉、湖泊沉积等自然记录和历史文献记录,很多学者对过去 2000 年中国北方气候环境变化做了大量的研究工作^[1~20]。这些成果既是古全球变化(PAGES)研究的一部分,同时又为全球气候环境变化的预测和模拟研究提供了重要的参考。近年来沙尘暴及沙尘天气在我国北方多发,给人民生活生产带来破坏,造成很大的经济损失。因此,对沙尘(暴)的发生、发展和成因机制的研究成为全球变化研究的热点之一^[21~29]。沙尘(暴)是自然气候环境的一部分,其消长变化反映了不同时期的气候环境变化。目前对近 50 年的沙尘事件与气候环境变化的关系,已经做了大量的研究工作^[30~38],但是对历史时期沙尘事件与气温、降水的综合研究还比较少^[39~41]。本文依据已有的气候和沙尘资料,试研究历史时期我国北方沙尘(暴)事件发生的规律与气候变化的关系,在 10 年、百年时间尺度上分析气候变化对沙尘事件发生的作用,以期对今后的沙尘(暴)事件的预测研究提供有价值的参考。

2 研究区域和资料来源

本文研究区域是中国北方干旱、半干旱地区。根据中国气象局 1978 年绘制的“中国气候区划图”,以及徐国昌等^[42]、王涛等^[43]模糊聚类分区,研究区可划分为干旱区东部、西部和半干旱区东部和西部。根据王绍武等^[44]重建的 1880~1998 年中国 35 个站的四季降水序列,我们计算了半干旱区东部和西部该时段的年降水相关,相关系数为 0.38,远超过 99% 的置信水平。因此,可将半干旱区东部和西部合并为整个半干旱区(图 1)。

干旱区西部,主要为新疆地区,地处欧亚大陆内陆,为典型的干旱气候区,其主要受西风环流和蒙古高压的影响,以古里雅冰芯记录(35°17'N, 81°29'E)为代用资料(表 1)。南疆主要为塔里木盆地塔克拉玛干沙漠地区,在研究该区域历史气候环境变化时,可用的自然指标记录和历史文献均较少,目前多用周边高山的冰川、树轮和湖泊等自然记录作代用资料。研究表明,古里雅冰芯中的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录能够指示新疆温度的变化,而冰川积累量是该地区降水变化的指示器^[45,46]。Thompson 等^[3,47]、

第一作者简介:张自银 男 26 岁 硕士研究生 自然地理专业 E-mail: zzy_ahgeo@163.com

* 中国科学院知识创新工程重要方向项目(批准号:KZCX3-SW-341)和中国科学院寒区旱区环境与工程研究所创新项目(批准号:2004106)共同资助

2006-07-04 收稿 2006-08-15 收修改稿

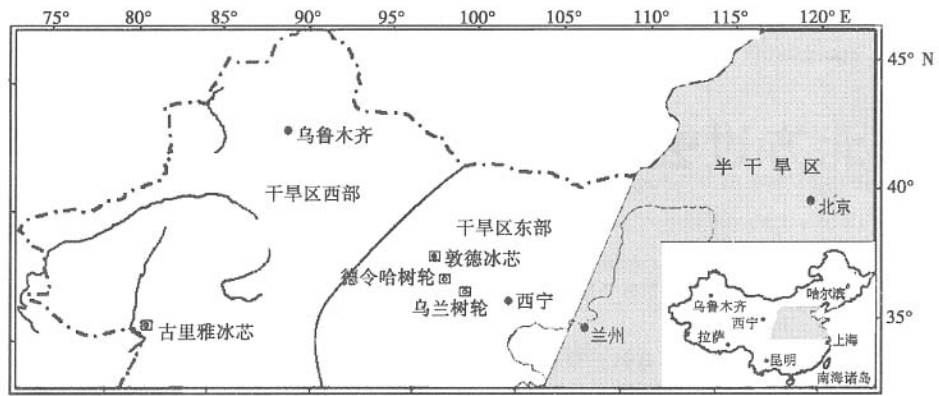


图 1 研究区域及代用资料点
右下角中国地图中阴影部分为史料记载的主要降尘地点范围^[7]

Fig. 1 Research area and proxy data sites

表 1 代用资料列表
Table 1 List of proxy data

序号	代用资料	资料类型	序列长度/ A. D.	分辨率/a	资料来源
1	古里雅冰芯积累量和 $\delta^{18}\text{O}$	冰芯	300 ~ 1990	10	姚檀栋 ^[2]
2	古里雅冰芯钙、镁离子含量	冰芯	280 ~ 1970	10	姚檀栋 ^[2]
3	敦德冰芯微粒含量	冰芯	1060 ~ 1090	10	Thompson 等 ^[3]
4	青海德令哈地区降水序列	树轮	1000 ~ 2000	1	邵雪梅等 ^[4]
5	中国 2000 年温度序列	多指标综合	0 ~ 2000	10	Yang 等 ^[1]
6	河北地区 1000 年干湿指数	史料	960 ~ 1970	10	张德二等 ^[9]
7	海河流域旱涝指数	史料	0 ~ 1970	10	严中伟等 ^[6]
8	北方降尘记录	史料	300 ~ 1930	10	张德二 ^[7]

姚檀栋等^[2, 39, 40, 48 ~ 52]、王宁练等^[53]研究指出,古里雅冰芯中的阴、阳离子记录是反映该区大气尘埃和沙尘的可靠指标。

干旱区东部,可利用的代用资料有敦德冰芯微粒记录(38°06'N, 96°24'E)、青海德令哈树轮重建降水序列和中国温度序列(见表 1)。植被是气候的一面镜子,反映的是树木生长受到气候的制约,降水和温度的变化影响树木的生长,进而影响地面植被状况。树轮指数是反映气温、降水变化的很好代用指标^[54 ~ 57],并且与标准化植被指数(NDVI)有着较好的相关性^[58],在植物生长主要受温度影响即温度驱动型地区,树轮宽度指数主要反映的是温度变化,在植被生长主要受降水影响的地区,则主要反映的是降水变化。根据树轮宽度指数重建的德令哈近千年降水量变化与敦德冰川积累量和微粒含量在低频变化上有较好的一致性,由于树轮资料定年的准确度高,所以该重建降水量变化是比较可靠的,并在一定程度上代表了该区域的降水量变化^[4, 5]。所选温度指标是一个利用多种替代指标重建的,能够比较

全面反映中国温度变化的序列^[1],这里用来代表干旱区东部气温变化具有比较高的可信度。由于敦德冰芯四周为沙漠、荒漠、戈壁的地理环境特征^[39, 40],因此敦德冰芯中的微粒含量很高,其对气候环境变化有着敏感的记录^[59],这里选用敦德冰芯微粒含量作为干旱区东部的沙尘指标。

在半干旱区,代用资料有海河流域旱涝指数、河北地区干湿指数、中国 2000 年温度序列,以及根据历史记载重建的北方降尘序列。沙尘事件在历史文献中常被记着“雨土”、“土霾”、“黄雾”等等,张德二^[7]根据史料整理出自公元 300 年以来的我国“雨土”情况。虽然整理的史料是全国范围的,但相对于中国东部,新疆、甘肃等西北地区历史文献记载比较少。根据文献[7]统计的降尘地点有 75% 以上是位于半干旱地区。由于史料对自然气象的记载是不完备的,在科学观念落后的封建社会只有特别严重的灾害性天气才会引起重视,才会有记载,这是很容易理解的,所以史料中记载的降尘事件主要是当时发生的严重沙尘暴或浮尘天气。因此,我们认为史

料降尘序列主要是代表半干旱地区历史时期强沙尘事件频数的。该区温度和降水的重建序列有很多,例如严中伟等^[6]利用历史文献中大旱大涝的记载为主要依据来确定 10 年平均旱涝等级序列,分 3 个主要级别重建海河流域近 2000 年的旱涝指数;张德二等^[9]根据史料记载的旱情、雨情等,分 5 个级别标准重建河北地区近 1000 年的干湿指数。这里选用海河流域旱涝指数来代表半干旱地区的降水情况,并选用河北地区干湿指数作参照,和全国温度指数来与沙尘指标作分析。

3 不同区域沙尘事件与气候变化

3.1 干旱区西部沙尘事件与气候变化的关系

图 2 为古里雅冰芯记录指示的干旱区西部近 2000 年来温度、降水和大气沙尘变化情况。从图 2 中可见,温度、降水的基本特征是冷干和暖湿组合,温度在波动中呈整体增暖趋势,降水在波动中整体呈持平趋势。姚檀栋^[2]根据 $\delta^{18}\text{O}$ 变化划分出了 7 次冷期和 8 次暖期,根据积累量变化划分出 4 次干期和 5 次湿期。 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量变化曲线表明大气尘埃是在波动中呈整体不断减少趋势,而且它们的含量变化有很高的一致性,相关系数为 0.72。其中在 1000 年前后 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量有一个明显的剧

烈大幅度波动期,先是剧烈增加,之后骤然减少,并随着气候的变暖持续减少,这是大气成分和环境变化的一个关键时期^[2]。为分析温度与降水在百年尺度上对沙尘事件发生的影响,对原数据进行 11 点滑动平均,然后求相关。温度和降水指标与反映沙尘的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量记录的相关系数见表 2。

表 2 各区域温度、降水指标与沙尘指标的相关系数
Table 2 Correlation coefficients of temperature, precipitation and sand-dust indices in different areas

相关系数	沙尘指标			
	干旱区西部		干旱区东部	半干旱区
	Ca^{2+}	Mg^{2+}	冰芯微粒含量	降尘频数
温度指标	R1	-0.38 **	-0.45 **	-0.15
	R2	-0.60 **	-0.72 **	-0.51 **
降水指标	R1	0.07	-0.18 *	-0.08
	R2	-0.07	-0.36 *	-0.22 *

* 显著性水平为 0.05
** 显著性水平为 0.01,均为双尾检验

在表 2 中,R1 为各指标原数据相关系数,反映的是 10 年尺度上的相关关系;R2 为 11 点滑动平均后的相关系数,反映百年尺度上的相关关系。可以看出,在干旱区西部,无论是 10 年还是百年尺度, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量与温度指标均表现为显著的负相

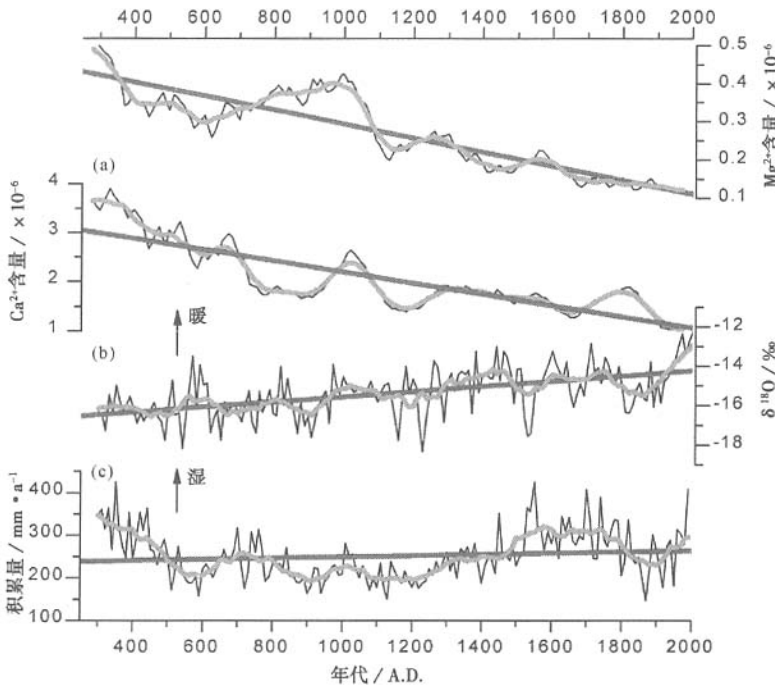


图 2 近 2000 年来古里雅冰芯 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量 (a) $\delta^{18}\text{O}$ (b) 以及积累量 (c) 记录^[2]
粗实线为 11 点滑动平均,直线为整体趋势线

Fig. 2 Ca^{2+} and Mg^{2+} contents (a), $\delta^{18}\text{O}$ (b), and ice accumulation (c) in the last 2000 years recorded from the Guliya ice core

关,而与降水指标的相关性则很低。表明不论 10 年还是在百年时间尺度上,该区都是温度变化对沙尘起主要影响。

3.2 干旱区东部沙尘事件与气候变化的关系

图 3 为敦德冰芯微粒含量、德令哈及乌兰树轮所反映的青海德令哈地区的降水和中国温度序列情况。从图 3 可以看出,近 1000 年来该区温度和降水变化都是在波动中呈现冷暖干湿多种组合,温度整体上有微略下降趋势,降水整体上趋于平衡。敦德冰芯中的微粒含量与温度和降水有着较一致的变化,微粒含量在波动中呈整体略微增加趋势。在近 1000 年的微粒含量序列中,有 5 次较多沙尘期,分别在 1120 ~ 1220A. D., 1400 ~ 1570A. D., 1680 ~ 1790A. D., 1830 ~ 1850A. D. 和 1950 ~ 1970A. D.。这与青海德令哈树轮重建降水序列^[4]中的少降水期 1097 ~ 1260A. D., 1261 ~ 1317A. D., 1429 ~ 1519A. D., 1634 ~ 1741A. D., 1781 ~ 1839A. D. 和 1916 ~ 1932A. D. 基本相对应,在降水量最少的两个时段 1465 ~ 1495A. D. 和 1700 ~ 1720A. D.,敦德冰芯的微粒含量记录也是高峰期。

在 10 年时间尺度上,该区温度和沙尘指标的相关性要略高于降水指标,但二者相关系数都不高(见表 2)。在百年时间尺度上,温度指标和沙尘指标的相关性远高于降水指标,并达到显著性水平

0.01。通过计算比较得出,该区温度、降水变化对沙尘作用有着较明显的 30 年滞后期,校正 30 年滞后期后,二者对沙尘指标的相关性系数分别为 -0.26 和 -0.24,均达到 0.05 的显著性水平,并且也是温度的作用稍大于降水。以上分析表明,在该区气候变化对沙尘事件的影响主要在百年时间尺度上体现出来,且沙尘指标与温度记录的负相关性比降水更好,虽在 10 年尺度上温度降水与沙尘序列尽管也是负相关,但不显著。这与干旱区西部有着相似性,两者都是温度对沙尘起主要作用,但在所起主要作用的程度上后者要小于古里雅冰芯。结合下面要讨论的半干旱区的相关情况,可以看出干旱区东部有着从西部干旱区到半干旱区的一个过渡性特征。

3.3 半干旱区沙尘事件与气候变化的关系

图 4 是近 2000 年来半干旱地区降水指标、中国温度序列和沙尘指标的对比。海河流域近 2000 年的旱涝指数在百年尺度上有 3 个跃变^[6],分别发生于公元 300 年附近由偏涝转向偏旱,公元 560 年附近由偏旱转向偏涝,公元 1140 年附近又由偏涝转向偏旱;而河北地区干湿指数在公元 1120 ~ 1300 年间也是一个显著的偏旱期。比较发现,河北地区干湿指数与海河流域旱涝指数相对应的近 1000 年时间里,二者有着比较好的一致性波动趋势,相关系数为 0.26。这说明海河流域旱涝指数能够反映半干

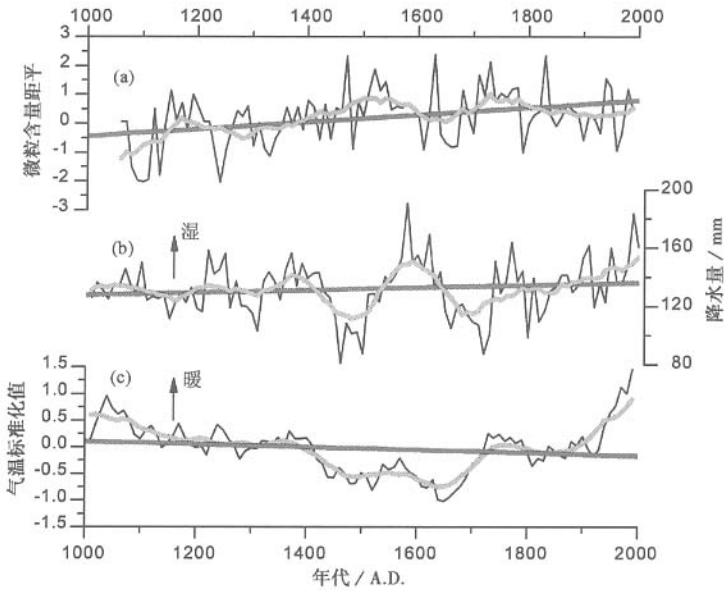


图 3 敦德冰芯微粒记录^[3](a)、德令哈及乌兰树轮重建降水序列^[4](b)和中国温度序列^[1](c)对比
图中曲线注解同图 2

Fig. 3 Comparison of Dunde ice-core microparticle content (a) with Delingha precipitation (b) and reconstructed all-China temperature series (c) during the last 1000 years
万方数据

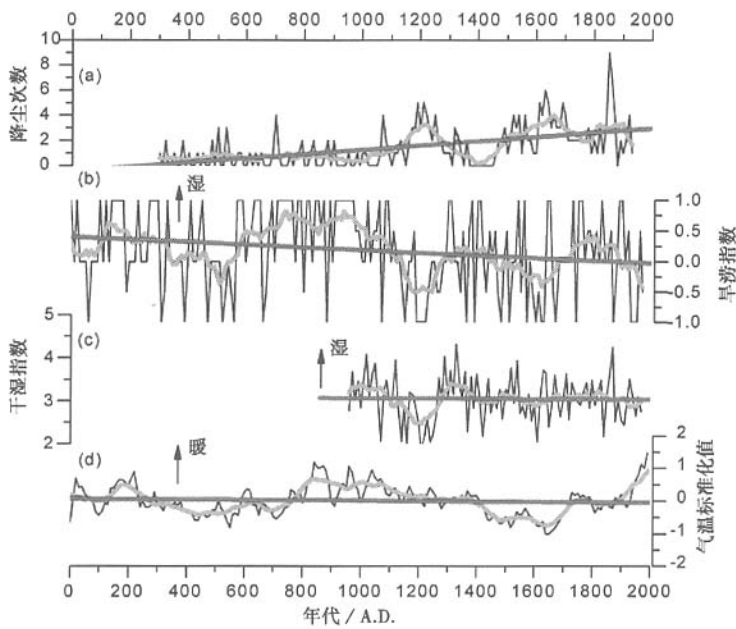


图 4 中国北方降尘记录^[7](a)、海河流域旱涝指数^[6](b)、河北地区干湿指数^[9](c)和中国气温序列^[1](d)对比

图中曲线注解同图 2

Fig. 4 Comparison of sand-dust event records of North China (a) ,drought/flood index of the Haihe River (b) , dry/wet index of Hebei Province (c) , and temperature index of China (d)

旱区的降水情况 ,该序列作为半干旱区降水指标是可靠的。史料记载的北方降尘有 3 个明显的多沙尘期 ,分别是 12 ~ 13 世纪、17 世纪、19 世纪。12 ~ 13 世纪的多沙尘期与降水指标所反映的 12 ~ 13 世纪的干旱期相对应(见图 4) ,从图 4 也可以看出 ,17 世纪、19 世纪也有着同样的对应关系。

在 10 年时间尺度上降水和温度指标均与沙尘指标呈显著负相关 ,但在百年时间尺度上降水指标与沙尘发生的关系更为密切(见表 2)。表明在百年时间尺度上该区是降水对沙尘起主要作用 ,这种相关不同于干旱区西部和东部。由于温度指标与降水指标在总体上也呈现了冷暖 - 干湿的组合形式 ,因此沙尘发生的阶段性变化与气候冷暖 - 干湿变化存在一致性。但在一些时间段上也有相反的表现 ,如在 1150 ~ 1280 A. D. 期间 ,则是很干但温度偏暖的组合 ,是一个明显的“ 暖干 ”组合 ,而这一时期沙尘记录是高峰期 ,这也佐证了该区是降水对沙尘起主要作用。除此之外 ,人类活动因素也对沙尘发生也有影响 ,例如 ,由于先前的大量开垦 ,在战乱时期使得大量农田抛荒致沙化 ,也是这一时期多沙尘的一个原因^[60]。

3.4 现代气象记录的近 50 年沙尘事件与气候变化

魏文寿等^[61]根据气象记录统计出南疆地区近

40 年沙尘暴发生情况 ,这一沙尘暴序列与南疆降水量和温度(南疆若羌、喀什、和田和巴楚 4 个站点平均)变化关系如表 3 和图 5a 所示。对比发现该区温度对沙尘暴的相关系数要高于降水 ,即在南疆地区温度变化对沙尘暴的影响要高于降水 ,这与历史时期的代用资料分析结果是一致的。图 5c 是半干旱区沙尘与气温、降水序列的比较 ,其中 ,沙尘记录来源于周自江等^[30]统计的全国 618 个气象站我国北方发生的典型强沙尘暴频数。结果表明 ,从 1954 到 2002 年 ,我国北方共发生 223 次典型强沙尘暴 ,主要位于干旱区(南疆盆地)和半干旱区(西北地区东部和华北地区北部)。这一沙尘序列与华北 16 个气象站年平均降水量滞后一年后相关性较高(见表 3)。现代气象记录中的强沙尘暴相当于历史文献记载的“ 雨土 ”、“ 黄雾 ”等现象 ,所以这一序列与

表 3 近 50 年气象记录的各区域温度、降水和沙尘相关系数

Table 3 Correlation coefficients of temperature , precipitation and sand-dust over the last 50 years

相关系数	沙尘		
	干旱区西部	干旱区东部	半干旱区
温度	-0.39 *	-0.35 *	-0.25
降水	-0.14 *	-0.44 **	-0.32 *

* 显著性水平为 0.05

** 显著性水平为 0.01 ,均为双尾检验

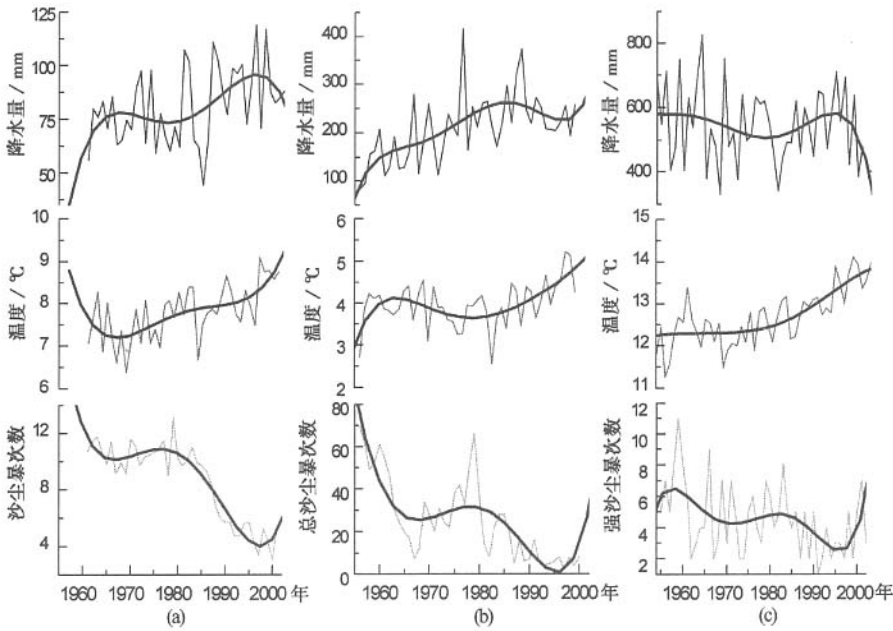


图 5 近 50 年来干旱区西部(a)、干旱区东部(b)和半干旱区(c)气候变化与沙尘暴次数的对比
细线为逐年变化值,粗线为 5 次多项式拟合曲线

Fig. 5 Comparison of climate change and times of sand dust in Western arid region (a), Eastern arid region (b), and semiarid region (c) over the last nearly 50 years

气候因子间的关系可以和历史时期降尘序列与气候变化的关系进行类比,而且结果也是一致的,即在半干旱区降水对沙尘暴的作用要高于温度。图 5b 是位于干旱区东部的青海德令哈气象站记录的总沙尘次数(浮尘、扬尘、沙尘暴之和,且三者的总体变化趋势比较一致)与该站记录的降水温度变化相对比,结果表明在该区降水和温度变化都对沙尘暴发生有很大的影响(见表 3),与前两者相比,同样有着过渡性的特征。

降水是通过改变地表含水量和植被来影响地表沙源物质的。例如,如果第 1 年是干旱,表土含水率降低,土壤干燥度增大而颗粒松弛,植物生长因缺水而干枯甚至死亡,导致地表植被退化,这就增加了第 2 年多沙尘暴的可能性,相反降水充足,地表植被较好,就会减少沙尘暴发生的可能性。在年际变化过程中,气温对沙尘的作用主要表现为降温导致冷空气入侵活动加强,可能会增加沙尘暴的多发。总体来看,近 50 年我国北方沙尘暴天气总体呈下降的趋势,但强与特强沙尘暴的发生有增加趋势^[32~36],例如 1993 年的“五·五”特大沙尘暴^[61]。在全球变暖背景下,各种气团活动频繁,气流的不稳定性增强,土地快速荒漠化,加上人类活动的影响,强与特强沙尘暴可能会成为今后主要的极端天气事件之一。

4 气候变化对沙尘作用的机制探讨

气候变化作为沙尘事件发生的背景因素,其对沙尘作用的物理机制相当复杂。沙尘暴发生必需具备 3 个条件:一是沙源,二是强风,三是热力不稳定的空气层结构^[62,63]。其中沙源是起沙的首要条件,强风是不可缺少的动力条件,不稳定的大气有利于强对流的发生和发展^[64]。气候变化主要是通过影响沙源和动力条件来作用于沙尘的发生:一方面是通过影响植物生长而改变地表植被覆盖度和影响表土含水率(土壤湿度),以及改变地表土壤颗粒松弛与固结程度,来影响沙尘暴发生的沙源条件;另一方面,通过高低纬大气冷热不均而产生气流的水平和垂直运动,为沙尘暴的发生提供必要的动力条件。

气候变化在不同的区域对沙尘的作用是不同的。干旱区出现沙尘暴次数的多少,主要取决于温度、降水和下垫面状况,而干旱区基本特征就是地表裸露多、降水很少。降温过程往往伴随着强冷空气入侵,风力强劲,而且,干旱区其地表裸露的条件始终存在,沙源丰富,所以降温往往会造成沙尘事件的发生。在半干旱区,降水量高于干旱区,植被覆盖度较好,但其生态环境脆弱,遇干旱时期植被退化严重,导致地表裸露增多,为起沙提供了沙源物质,增加了沙尘暴发生的可能性;另一方面,较高的降水,

直接增加了土壤湿度 ,使土壤颗粒固结程度提高 ,从而减少沙尘暴发生的可能性。因此 ,当温度和降水呈“冷干”组合时 ,就增加了沙尘发生的可能性 ,相反就会抑制沙尘的发生。

5 结论

从以上分析得出 ,在干旱区西部、干旱区东部和半干旱区历史时期沙尘事件与气候要素的演化过程中有着共同性 ,又有着地域差异性。代表干旱区西部的古里雅冰芯钙镁离子含量和代表干旱区东部的敦德冰芯微粒含量所反映的沙尘变化 ,与华北半干旱区史料记载的降尘频数 ,都反映了过去 2000 年我国北方沙尘(暴)的多发期、发生频率、强度与我国北方气候变化是相对应的 ,但是在不同区域 ,各要素波动的幅度和相关的程度上又有很大差异。

在干旱区西部 ,在 10 年和百年尺度上都是温度对沙尘起主要作用 ,表现为暖期沙尘事件较少 ,冷期沙尘事件频繁 ,而半干旱区是降水起主要作用 ,且主要体现在百年尺度上 ,表现为湿润期沙尘事件较少 ,干旱期则较多 ;干旱区东部与干旱区西部类似 ,在百年尺度上也是温度起主要作用 ,但在所起主要作用的程度上要小于干旱区西部 ,且有着从西部干旱区到华北半干旱区的一个过渡性特征。对近 50 年气象记录的气温、降水和沙尘分析 ,结果基本上与历史时期一致。

通过代用指标来分析历史时期的沙尘事件与气候变化的关系 ,有着本身的局限性 ,但是在没有直接观测记录的情况下 ,代用资料是十分可贵的。要更深入地去了解探索历史时期沙尘事件与气候演化的过程 ,利用相对可靠的自然记录和有限的史料记载是很有必要的 ,同时也还需要更多的工作。

参考文献(References)

1 Yang B , Braeuning A , Johnson K R *et al.* General characteristics of temperature variation in China during the last two millennia. *Geophysical Research Letters* , 2002 , **29**(9) : 1234 , doi :10. 1029/2001GL014485

2 姚檀栋. 古里雅冰芯近 2000 年来气候环境变化记录. 第四纪研究 ,1997 (1) 52 ~ 61

Yao Tandong. Climatic and environmental record in the past about 2000 years from the Guliya Ice Core. *Quaternary Sciences* , 1997 , (1) : 52 ~ 61

3 Thompson E M , Thompson L G , Dai J *et al.* Climate of the last 500 years : High resolution ice core records. *Quaternary Science Reviews* , 1993 , **12** : 419 ~ 430

4 邵雪梅 , 黄 磊 , 刘洪滨等. 树轮记录的青海德令哈地区千年

降水变化. 中国科学(D 辑) 2004 , **34**(2) : 145 ~ 153

Shao Xuemei , Huang Lei , Liu Hongbin *et al.* Precipitation variation from tree-ring records in Qinghai Delingha district in the last about 1000 years. *Science in China* (Series D) , 2004 , **34**(2) : 145 ~ 153

5 刘洪滨 , 邵雪梅 , 黄 磊等. 青海省海西州德令哈地区近千年来年降水量变化特征分析. 第四纪研究 2005 , **25**(2) : 176 ~ 183

Liu Hongbin , Shao Xuemei , Huang Lei *et al.* Statistical characteristics of annual precipitation variation during the past 1000 years in Delingha , Qinghai Province , China. *Quaternary Sciences* , 2005 , **25**(2) : 176 ~ 183

6 严中伟 , 李兆元 , 王晓春. 历史上 10 年 - 100 年尺度气候跃变的分析. 大气科学 , 1993 , **17**(6) : 663 ~ 672

Yan Zhongwei , Wang Xiaochun , Li Zhaoyuan. An analysis of decade-to century-scale climatic jumps in history. *Scientia Atmospherica Sinica* , 1993 , **17**(16) : 663 ~ 672

7 张德二. 我国历史时期以来降尘的天气气候学初步分析. 中国科学(B 辑) , 1984 , (3) 278 ~ 288

Zhang De'er. The preliminary meteorological analysis of the dust deposition in historical period in China. *Science in China* (Series B) , 1984 (3) : 278 ~ 288

8 张德二 , 孙 霞. 我国历史时期降尘记录南界的变动及其对北方干旱气候的推断. 第四纪研究 2001 , **21**(1) : 1 ~ 8

Zhang De'er , Sun Xia. Variations of the southern limits of dust fall records and inferred historical climate drought in Northern China. *Quaternary Sciences* , 2001 , **21**(1) : 1 ~ 8

9 张德二 , 刘传志 , 江剑民. 中国东部 6 区域近 1000 年干湿序列的重建和气候跃变分析. 第四纪研究 , 1997 (1) : 1 ~ 11

Zhang De'er , Liu Chuanzhi , Jiang Jianmin. Reconstruction of six regional dry/wet series and their abrupt changes during the last 1000 years in East China. *Quaternary Sciences* , 1997 (1) : 1 ~ 11

10 王绍武 , 龚道溢. 全新世几个特征时期的中国气温. 自然科学进展 2000 , **10**(4) 325 ~ 332

Wang Shaowu , Gong Daoyi. Several special phases temperature of China during Holocene. *Progress in Natural Science* , 2000 , **10**(4) : 325 ~ 332

11 施雅风 , 姚檀栋 , 杨 保. 近 2000a 古里雅冰芯 10a 尺度的气候变化及其与中国东部文献记录的比较. 中国科学(D 辑) , 1999 , **29**(增刊 1) : 79 ~ 86

Shi Yafeng , Yao Tandong , Yang Bao. Decadal climatic variations recorded in Guliya ice core and comparison with the historical documentary data from East China during the last 2000 years. *Science in China* (Series D) , 1999 , **29**(Suppl.) : 79 ~ 86

12 杨 保 , 康兴成 , 施雅风. 近 2000 年都兰树轮 10 年尺度的气候变化及其与中国其它地区温度代用资料的比较. 地理科学 , 2000 , **20**(5) 397 ~ 402

Yang Bao , Kang Xingcheng , Shi Yafeng. Decadal climatic variations indicated by Dulan tree-ring and the comparison with temperature proxy data from other regions of China during the last 2000 years. *Scientia Geographica Sinica* , 2000 , **20**(5) 397 ~ 402

13 姚檀栋 , 秦大河 , 田立德等. 青藏高原 2ka 来温度与降水变化——古里雅冰芯记录. 中国科学(D 辑) , 1996 , **26**(4) 348 ~ 353

Yao Tandong , Qin Dahe , Tian Lide *et al.* Temperature and

precipitation changes in the past 2000 years from the Tibetan Plateau—the Guliya Ice Core records. *Science in China* (Series D),1996 **26**(4) 348 ~ 353

14 Yao Tandong , Jiao Keqin , Tian Lide *et al.* Climatic and environmental records in Guliya Ice Cap. *Science in China* (Series B) , 1995 , **38**(2) : 228 ~ 237

15 Yao Tandong , Thompson L G , Shi Yafeng *et al.* Climate variation since the last interglaciation recorded in the Guliya ice core. *Science in China* (Series D) , 1997 , **40**(6) : 662 ~ 668

16 张丕远 , 葛全胜 , 张时煌等. 2000 年来我国旱涝气候演化的阶段性和突变. 第四纪研究 , 1997 (1) : 12 ~ 20

Zhang Peiyuan , Ge Quansheng , Zhang Shihuang *et al.* The modes and abrupt changes of climate in China during recent 2000 years. *Quaternary Sciences* , 1997 (1) : 12 ~ 20

17 Yao Tandong , Thompson L G , Jiao Keqin *et al.* Recent warming as recorded in the Qinghai-Tibetan cryosphere. *Annals of Glaciology* , 1995 **21** : 196 ~ 200

18 姚檀栋 , 徐柏青 , 段克勤等. 青藏高原达索普冰芯 2ka 来温度与甲烷浓度变化记录. 中国科学(D 辑) , 2002 **32**(4) 346 ~ 352

Yao Tandong , Xu Baiqing , Duan Keqin *et al.* Temperature and methane records over the last 2ka in Dasuopu ice core. *Science in China*(Series D) , 2002 **45**(12) : 1068 ~ 1074

19 徐柏青 , 姚檀栋 , Chappellaz J. 过去 2000 年大气甲烷含量与气候变化的冰芯记录. 第四纪研究 2006 **26**(2) : 173 ~ 184

Xu Baiqing , Yao Tandong , Chappellaz J. Atmospheric methane concentration and climate change recorded in ice cores over the past 2000 years. *Quaternary Sciences* , 2006 **26**(2) : 173 ~ 184

20 梁有叶 , 张德二. 我国西部地区过去 2000 年降水变化研究主要进展. 气象科技 2004 **32**(3) : 137 ~ 142

Liang Youye , Zhang De'er. Advancements in researches on precipitation variation in West China in past 2000 years. *Meteorological Science and Technology* , 2004 **32**(3) : 137 ~ 142

21 Zhang Xiaoye , An Zhisheng , Chen Tuo *et al.* Late Quaternary records of the atmospheric input of eolian dust to the center of the Chinese Loess Plateau. *Quaternary Research* , 1994 **41**(1) 35 ~ 43

22 Zhang Xiaoye , Arimoto R , An Zhisheng *et al.* Atmospheric trace elements over source regions for Chinese dust : Concentrations , sources and atmospheric deposition on the Loess Plateau. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics* , 1993 , **27**(13) : 2051 ~ 2067

23 张小曳. 亚洲粉尘的源区分布、释放、输送、沉积与黄土堆积. 第四纪研究 2001 , **21**(1) 29 ~ 40

Zhang Xiaoye. Source distributions , emission , transport , deposition of Asian dust and Loess accumulation. *Quaternary Sciences* , 2001 , **21**(1) 29 ~ 40

24 王式功 , 董光荣 , 陈惠忠等. 沙尘暴研究的进展. 中国沙漠 , 2000 **20**(4) 349 ~ 356

Wang Shigong , Dong Guangrong , Chen Huizhong *et al.* Advances in studying sand-dust storms of China. *Journal of Desert Research* , 2000 , **20**(4) 349 ~ 356

25 王 涛. 中国北方沙漠化过程及其防治研究. 中国科学院院刊 , 2002 (3) 204 ~ 205

Wang Tao. Researches in desertification and prevention of North China. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences* , 2002 (3) : 204 ~ 205

26 王 涛 , 朱震达. 中国北方沙漠化的若干问题. 第四纪研究 , 2001 , **21**(1) : 56 ~ 65

Wang Tao , Zhu Zhenda. Some problems of desertification in Northern China. *Quaternary Sciences* , 2001 , **21**(1) : 56 ~ 65

27 杨东贞 , 徐 敬 , 颜 鹏等. 北京城区和远郊区大气气溶胶的相似性研究. 第四纪研究 2005 **25**(1) 54 ~ 62

Yang Dongzhen Xu Jing , Yan Peng *et al.* On the similarity of the aerosol characteristics in city and suburb of Beijing. *Quaternary Sciences* , 2005 **25**(1) 54 ~ 62

28 史培军 , 严 平 , 袁 艺. 中国北方风沙活动的驱动力分析. 第四纪研究 2001 **21**(1) 41 ~ 47

Shi Peijun , Yan Ping , Yuan Yi. The driving force analyses of the blown-sand activity in Northern China. *Quaternary Sciences* , 2001 , **21**(1) 41 ~ 47

29 刘东生 , 韩家懋 , 张德二等. 降尘与人类世沉积——I : 北京 2006 年 4 月 16 ~ 17 日降尘初步分析. 第四纪研究 , 2006 , **26**(4) : 628 ~ 633

Liu Tungsheng , Han Jiamao , Zhang De'er *et al.* Falling dust and deposits in Anthropogene——I : Preliminary analyses of the dust fall in Beijing on April 16 ~ 17 , 2006. *Quaternary Sciences* , 2006 , **26**(4) : 628 ~ 633

30 周自江 , 章国材. 中国北方的典型强沙尘暴事件(1954 ~ 2002 年). 科学通报 2003 **48**(11) : 1224 ~ 1228

Zhou Zijiang , Zhang Guocai. Typical severe dust storms in Northern China during 1954 ~ 2002. *Chinese Science Bulletin* , 2003 , **48**(21) 2366 ~ 2370

31 周自江 , 王锡稳 , 牛若芸. 近 47 年中国沙尘暴气候特征研究. 应用气象学报 2002 **13**(2) : 193 ~ 200

Zhou Zijiang , Wang Xiwen , Niu Ruoyun. Climate characteristics of sandstorm in China in recent 47 years. *Journal of Applied Meteorological Science* , 2002 **13**(2) : 193 ~ 200

32 范一大 , 史培军 , 周俊华等. 近 50 年来中国沙尘暴变化趋势分析. 自然灾害学报 2005 **14**(3) 22 ~ 28

Fan Yida , Shi Peijun , Zhou Junhua *et al.* Research on change of dust storm in China in recent 50 years. *Journal of Natural Disasters* , 2005 **14**(3) 22 ~ 28

33 唐国利 , 巢清尘. 中国近 49 年沙尘暴变化趋势的分析. 气象 , 2003 **31**(5) 8 ~ 11

Tang Guoli , Chao Qingchen. Analysis on sandstorm variation in China for last 49 years. *Meteorological Monthly* , 2003 **31**(5) 8 ~ 11

34 乔 标 , 尹晓惠. 近 49 年中国北方典型强沙尘暴事件的分形特征与 R/S 分析. 中国人口 · 资源与环境 , 2005 **15**(2) 57 ~ 60

Qiao Biao , Yin Xiaohui. Time series fractal characteristics of severe dust storm in recent 49 years in North China. *China Population , Resources and Environment* , 2005 **15**(2) 57 ~ 60

35 方宗义 , 朱福康 , 江吉喜等编. 中国沙尘暴研究. 北京 : 气象出版社 , 1997. 1 ~ 15

Fang Zongyi , Zhu Fukang , Jiang Jixi *et al.* eds. Research of Chinese Sand Storms. Beijing : China Meteorological Press , 1997.

1 ~ 15

36 魏文寿 ,高卫东 ,史玉光等. 新疆地区气候与环境变化对沙尘暴的影响研究. 干旱区地理 ,2004 ,**27** (2) :137 ~ 141
Wei Wenshou , Gao Weidong , Shi Yuguang *et al.* Influence of climate and environment change on dust storms in Xinjiang , China. *Arid Land Geography* ,2004 ,**27** (2) :137 ~ 141

37 Wang Shigong , Wang Jinyan , Zhou Zijiang *et al.* Regional characteristics of three kinds of dust storm events in China. *Atmospheric Environment* ,2005 ,**39** (3) :509 ~ 520

38 周自江. 近 45 年中国扬沙和沙尘暴天气. 第四纪研究 ,2001 ,**21** (1) 9 ~ 17
Zhou Zijiang. Blowing-sand and sandstorm in China in recent 45 years. *Quaternary Sciences* ,2001 ,**21** (1) :9 ~ 17

39 刘纯平 ,姚檀栋 ,Thompson L G 等. 敦德冰芯中微粒含量与沙尘暴及气候的关系. 冰川冻土 ,1999 ,**21** (1) 9 ~ 14
Liu Chunping , Yao Tandong , Thompson L G *et al.* Microparticle concentration within the Dundee ice core and its relation to dust storm and climate since the Little Ice Age. *Journal of Glaciology and Geocryology* ,1999 ,**21** (1) 9 ~ 14

40 刘纯平 ,姚檀栋 ,谢树成. 祁连山敦德冰芯微粒变化特征和大气环境记录. 海洋地质与第四纪地质 ,1999 ,**19** (3) :105 ~ 113
Liu Chunping , Yao Tandong , Xie Shucheng. Characteristics of microparticle variation and records of atmospheric environment in Dundee Ice Core. *Marine Geology & Quaternary Geology* ,1999 ,**19** (3) :105 ~ 113

41 盛文坤 ,姚檀栋 ,李月芳等. 古里雅冰芯中钙离子含量及与气候变化关系. 冰川冻土 ,1999 ,**21** (1) :19 ~ 21
Sheng Wenkun , Yao Tandong , Li Yuefang *et al.* Variation of Ca²⁺ concentration within the Guliya Ice Core and its climate significance. *Journal of Glaciology and Geocryology* ,1999 ,**21** (1) :19 ~ 21

42 徐国昌 ,姚 辉 ,董安祥等. 中国干旱半干旱气候变化. 北京 :气象出版社 ,1997. 1 ~ 9
Xu Guochang , Yao Hui , Dong Anxiang *et al.* Climate Change in Arid and Semiarid Regions of China. Beijing : China Meteorological Press ,1997. 1 ~ 9

43 王 涛 ,杨 保 ,Braeuning A 等. 近 0.5ka 来中国北方干旱半干旱地区的降水变化分析. 科学通报 ,2004 ,**49** (9) 883 ~ 887
Wang Tao , Yang Bao , Braeuning A *et al.* Decadal-scale precipitation variations in arid and semiarid zones of Northern China during the last 500 years. *Chinese Science Bulletin* ,2004 ,**49** (8) :842 ~ 848

44 王绍武 ,龚道溢 ,叶瑾琳等. 1880 年以来中国东部四季降水量序列及其变率. 地理学报 ,2000 ,**55** (3) 281 ~ 293
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

45 Yang B , Braeuning A , Shi Y F *et al.* Evidence for a Late Holocene warm and humid climate period and environmental characteristics in the arid zones of Northwest China during 2. 2 ~ 1. 8 kyr B. P. *Journal of Geophysical Research* , 2004 , **109** , doi : 10. 1029/2003JD003787

46 王绍武 ,叶瑾琳 ,龚道溢. 中国小冰期的气候. 第四纪研究 ,1998 (1) 54 ~ 64
Wang Shaowu , Ye Jinlin , Gong Daoyi. Climate in China during the Little Ice Age. *Quaternary Sciences* ,1998 , (1) :54 ~ 64

47 Thompson E M. 911 years of microparticle deposition at the south pole : A climatological interpretation. Ohio State University Research Foundation , Institute of Polar Studies , Report 73 , 1980. 134

48 姚檀栋 ,鄯光剑 ,蒲建辰等. 古里雅冰芯中钙离子与大气粉尘变化关系. 科学通报 ,2004 ,**49** (9) 888 ~ 892
Yao Tandong , Wu Guangjian , Pu Jianchen *et al.* Guliya Ice Core Ca²⁺ and its relationship to atmospheric dust variation. *Chinese Science Bulletin* ,2004 ,**49** (9) :888 ~ 892

49 李月芳 ,姚檀栋 ,皇翠兰等. 古里雅冰帽中化学成分的空间变化. 冰川冻土 ,1993 ,**15** (3) 467 ~ 473
Li Yuefang , Yao Tandong , Huang Cuilan *et al.* Spatial variations of chemical species in Guliya ice core. *Journal of Glaciology and Geocryology* ,1993 ,**15** (3) :467 ~ 473

50 Liu Chunping , Yao Tandong , Thompson L G *et al.* Variation in microparticle concentrations preserved in the Dundee ice core and its relationship to dust storms and climate since the Little Ice Age. *Journal of Glaciology and Geocryology* ,1999 ,**21** (4) 385 ~ 390

51 Yao Tandong , Shi Yafeng , Thompson L G. High resolution record of paleoclimate since the Little Ice Age from the Tibetan ice cores. *Quaternary International* ,1997 ,**37** :19 ~ 23

52 Yao Tandong , Qin Dahe. Distribution of stable isotopes in Antarctic surface snow. *Chinese Science Bulletin* ,1995 ,**40** (11) :921 ~ 925

53 王宁练 ,Thompson L G , Davis M E. 近 1000 年来青藏高原南部和北部大气尘埃载荷变化的冰芯记录. 第四纪研究 ,2006 ,**26** (5) 752 ~ 761
Wang Ninglian , Thompson L G , Davis M E. Variations of atmospheric dust loading in the southern and northern Tibetan Plateau over the last millennium recorded in ice cores. *Quaternary Sciences* ,2006 ,**26** (5) :752 ~ 761

54 Mann M E , Bradley R S , Hughes M K. Northern hemisphere temperatures during the past millennium : Inferences , uncertainties and limitations. *Geography Research Letters* ,1999 ,**26** (6) :759 ~ 762

55 Briffa K R. Annual climate variability in the Holocene : Interpreting the message of ancient trees. *Quaternary Science Reviews* ,2000 ,**19** (1 ~ 5) :87 ~ 105

56 Jones P D , Osborn T J , Briffa K R. The evolution of climate over the last millennium. *Science* ,2001 ,**292** :662 ~ 667

57 Esper J , Cook E R , Schweingruber F H. Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability. *Science* ,2002 ,**295** :2250 ~ 2253

58 何吉成 ,邵雪梅. 德令哈地区树轮宽度指数与草地植被指数的关系. 科学通报 ,2006 ,**51** (9) :1083 ~ 1090
He Jicheng , Shao Xuemei. Relationships between tree-ring width index and NDVI of grassland in Delingha. *Chinese Science Bulletin* , 2006 , **51** (9) :1106 ~ 1114

59 姚檀栋 ,焦克勤 ,皇翠兰等. 冰芯所记录的环境变化及空间耦合特征. 第四纪研究 ,1995 (1) 23 ~ 31
Yao Tandong , Jiao Keqin , Huang Cuilan *et al.* Environmental records in ice cores and their spatial coupling features. *Quaternary*

Sciences ,1995 ,(1) :23 ~31

60 张德二. 历史记录的西北环境变化与农业开发. 气候变化研究进展 2005 ,1(2) 58 ~64

Zhang De'er. Historical records of environmental changes and agricultural development in Northwest China. *Advances in Climate Change Research* ,2005 ,1(2) :58 ~64

61 杨根生,王一谋.“ 五·五 ”特大风沙尘暴的形成过程及防治对策. 中国沙漠 ,1993 ,13(3) 68 ~71

Yang Gensheng ,Wang Yimou. The course ,cause of formation ,and cure and protection of the dust-storm on the fifth , May. *Journal of Desert Research* ,1993 ,13(3) 68 ~71

62 张仁键,韩志伟,王明星等. 中国沙尘暴天气的新特征及成因分析. 第四纪研究 2002 ,22(4) 374 ~380

Zhang Renjian , Han Zhiwei , Wang Mingxing *et al.* Dust storm weather in China : New characteristics and origins. *Quaternary Sciences* ,2002 ,22(4) :374 ~380

63 钱正安,蔡英,刘景涛. 中国北方沙尘暴研究的若干进展. 干旱区资源与环境 2004 ,18(1) :1 ~8

Qian Zheng'an , Cai Ying , Liu Jingtao *et al.* Some advances in dust storm researches in Northern China. *Journal of Arid Land Resources and Environment* ,2004 ,18(1) :1 ~8

64 胡隐樵,光田宁. 强沙尘暴微气象特征和局地触发机制. 大气科学 ,1997 ,21(5) 581 ~589

Hu Yinqiao , Mitsuta Y. Micrometeorological characteristics and local triggering mechanism of strong dust storm. *Scientia Atmospherica Sinica* ,1997 ,21(5) :581 ~589

DUST STORM EVENTS AND THEIR RELATION TO CLIMATE CHANGES
IN NORTHERN CHINA DURING THE PAST 2000 YEARS

Zhang Ziyin Yang Bao

(Key Laboratory of Desert and Desertification , Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute ,
Chinese Academy of Sciences , Lanzhou 730000)

Abstract

According to the “ Climate Regionalization Map of China ” compiled by China Meteorological Administration in 1978 , and fuzzy cluster zoning by Xu , *et al.* , we divided the research area into three sub-areas , the western arid region , the eastern arid region , and the semiarid region. Dust storm events and their relation to climate changes in North China during the past 2000 years were analyzed by using paleoclimate proxies , such as ice cores , tree rings , and historical documents. Dust storm events over the last 2000 years reflected by Ca^{2+} and Mg^{2+} contents recorded in the Guliya ice-core and microparticle concentration in the Dunde ice-core as well as dust storm events recorded in historical documents of China are compared with ice accumulation rates , $\delta^{18}O$, tree-ring width , and multi-proxy reconstructed temperature and precipitation sequences. We tried to quantify the contribution of temperature and precipitation to dust storm occurrences in different regions , to probe into the dust storm formation mechanism and develop a model of climate changes and dust storm events.

The results show that in the western arid region at both the decade timescale and the century timescale , the dust storm changes were mainly controlled by temperature changes during the past 2000 years and the dust storm events and temperature changes exhibite a significant negative correlation. In other words , the dust storm events were more frequent under cold climate than under warm climate. In the semiarid region , temperature and precipitation sequences were both significantly negatively correlated to dust storm at decade timescale. At century timescale however , precipitation changes have a closer correlation with dust storm events than temperature. In the eastern arid region , the relationship between dust storm events and climate changes displayed obvious transitional features , and the effects of climate changes on dust storm events were mainly manifested at century timescale. The negative correlation between temperature and dust storms was more obvious than that of precipitation and dust storms. On the other hand , although the climate and the dust storm sequences were also negatively correlation at decadal timescale , such negative correlation was not significant. Analysis of modern meteorological records over the last 50 years came to the roughly same conclusion.

Key words 气候 change , dust/dust storm , China , last two millennia