

河北省沙尘天气时空分布特征及影响因素分析

王仁德, 邹学勇, 程宏, 吴晓旭

(北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室 中国沙漠研究中心, 北京 100875)

摘要: 利用 20 个基础气象站 1980—2006 年的气象观测数据, 对河北省沙尘天气的时空分布特征及其影响因素进行了分析研究。结果表明, 河北省沙尘天气以扬沙为主; 在空间分异上, 沙尘天气自西向东发生频次递减, 西北部和南部是沙尘天气的高发区, 东部是沙尘天气的低发区, 各类沙尘天气的高发中心不尽相同。在年际变化上, 扬沙、浮尘和沙尘暴 3 类沙尘天气均呈逐年波动减少的趋势, 春季发生次数最多; 气候周期性变化是造成沙尘天气年际年内变化的主要原因, 大风与沙尘源地的耦合决定了沙尘天气的空间分布特征。

关键词: 沙尘天气; 时空分布; 影响因素; 河北省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2009)06-0057-07

中图分类号: P425.5

Spatiotemporal Characteristics of Sand-dust Weather and Its Influence Factors in Hebei Province

WANG Ren-de, ZOU Xue-yong, CHENG Hong, WU Xiao-xu

(State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, and China Desert Research Center, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Based on meteorological data from 21 weather stations in Hebei Province from 1980 to 2006, spatiotemporal characteristics of sand-dust weather and its influence factors are analyzed. Analyses indicate that dust-blowing is the dominating type of sand-dust weather. In spatial scale, the occurring frequency of sand-dust weather decreases from west to east, with the highest values in northwest and south and the lowest in east. Different sand-dust weathers have different high-frequency centers. Periodicity of climate change is the main reason causing annual and seasonal changes of sand-dust weather. The coupling character of gale and sand-dust source determines the spatiotemporal distribution of sand-dust weather. In time scale, three kinds of sand-dust weathers take on a trend of annually fluctuating decrease and seasonally occur most in spring.

Keywords: sand-dust weather; spatiotemporal characteristic; influence factor; Hebei Province

沙尘天气是一种灾害性的天气过程, 沙尘天气的出现, 不仅造成大气污染^[1-3], 破坏生态环境^[4], 影响交通运输^[5], 危害人们的身心健康^[6-8], 对气候变化也产生一定的影响^[9-10], 因此引起社会各界的广泛关注。众多学者从不同角度对这一问题进行了广泛研究。丁瑞强^[11-12]、钱正安^[13]等研究了近 50 a 来我国沙尘天气的变化趋势, 王式功^[14]、钱维宏^[15]等研究了我国沙尘天气变化的时空分布特征, 邱新法^[16]、延昊^[17]等利用遥感数据或者地面气象资料分析研究了我国风沙活动的路径和源地, 许炯心^[18]、张莉^[19]等对我国沙尘天气的成因及变化进行了分析, 申元村^[20]、路明^[21]等则提出了我国风沙灾害的防治策略。河北省地处我国北方半干旱风蚀沙化区的外围, 经常受

到东移南侵沙尘的影响, 是沙尘天气的多发区^[3], 同时也是风沙灾害危险指数较高区^[20]。

此前, 已有学者对这一地区的沙尘天气进行了研究, 叶笃正等^[5]研究了华北地区沙尘天气的成因和治理对策, 指出影响华北地区的沙尘天气主要发源于内蒙古中西部和河北西北部, 毛睿^[22]探讨了春季天气变率对华北沙尘暴频次的影响, 尤凤春^[23]分析了河北省的沙尘暴天气成因, 指出有利的大气环流形式和较强冷空气频繁南下是造成沙尘暴明显偏多的主要原因, 付桂琴^[24]分析了河北省西北大风沙尘暴天气特征, 柴东红^[25]等分析了石家庄地区沙尘天气特征。本文利用气象站观测资料对河北省沙尘天气的时空分布特征做进一步的研究, 并就其影响因素进行了分析。

收稿日期: 2009-03-13

修回日期: 2009-05-14

资助项目: “十一五”国家科技支撑项目“沙区人居环境安全保障与工程防沙技术研究”(2006BAD26B03)

作者简介: 王仁德(1980—), 男(汉族), 河北省黄骅市人, 博士研究生, 主要从事灾害防治和生态恢复方面的研究。E-mail: wangrende@res.cn.

1 沙尘天气的时空特征

在气象学中,将沙尘天气分为浮尘、扬沙和沙尘暴 3 个等级^[5]。浮尘指在无风或风力较小的情况下,尘土、细沙均匀地浮游在空中,使水平能见度小于 10 km;扬沙指由于风力较大,将地面沙尘吹起,使空气相当混浊,水平能见度在 1~10 km。沙尘暴指强风把地面大量沙尘卷入空中,使空气特别混浊,水平能见度低于 1 km。沙尘暴又可分为沙暴和尘暴,沙暴指强风把大量沙粒吹入近地面气层所形成的携沙风暴,而尘暴则指大风把大量尘埃及其它细粒物质卷入高空(一般可高达 3~4 km 甚至 9 km 或更高)所形成的风暴^[26]。

我国的沙尘暴主要发生在北方干旱、半干旱区,沙尘暴可波及到半湿润、湿润区^[20],并且影响到河北省的

沙尘暴事实上主要是尘暴^[20, 24]。本研究对 20 个基准气象站 1980—2006 年沙尘天气数据的分析结果表明,河北省各地沙尘天气发生的类型、频次和强度不尽相同,并且表现出一定的时空规律性,本研究对此规律性进行了分析。

1.1 沙尘天气的类型特征

河北省沙尘天气以扬沙为主,浮尘次之,沙尘暴最少。扬沙天气的发生频次占沙尘天气总频次的 60% 以上,有些地区甚至达到 80%,并且越往东扬沙所占比例越高(表 1)。石家庄市是所统计的 20 个气象站点中唯一扬沙天气所占比例低于 50% 的站点(40%),但在剔除由扬沙引起的浮尘天气后,扬沙所占比例也达到 50% 以上。扬沙是大风将地面沙尘吹起后形成的,沙尘物质主要来源于本地。河北省沙尘天气以扬沙为主,说明了本地源对沙尘天气具有重要影响。

表 1 1980—2006 年河北省各地沙尘天气发生情况统计

站点	沙尘天气/次	浮尘比例	扬沙比例	沙尘暴比例	站点	沙尘天气/次	浮尘比例	扬沙比例	沙尘暴比例
霸州	159	0.19	0.77	0.04	青龙	37	0.38	0.62	0.00
保定	360	0.16	0.81	0.03	饶阳	353	0.05	0.79	0.16
泊头	209	0.17	0.78	0.05	石家庄	362	0.58	0.40	0.02
承德	92	0.43	0.50	0.07	唐山	63	0.22	0.67	0.11
丰宁	214	0.31	0.60	0.09	围场	93	0.37	0.60	0.03
怀来	233	0.18	0.79	0.03	蔚县	218	0.22	0.75	0.02
黄骅	225	0.12	0.84	0.05	邢台	633	0.26	0.72	0.02
乐亭	55	0.15	0.84	0.02	张北	388	0.06	0.68	0.27
南宫	269	0.09	0.86	0.06	张家口	392	0.11	0.82	0.07
秦皇岛	81	0.30	0.70	0.00	遵化	165	0.47	0.56	0.00

1.2 沙尘天气的区域特征

尽管河北全省沙尘天气均以扬沙为主,但不同地区之间仍然存在显著差异(图 1)。河北省境内存在两个沙尘天气高值中心。一处位于河北省的西北部,以坝上高原区为中心,包括张家口市的西北大部 and 承德北部。另一处位于河北省南部,以邢台市为中心,包括石家庄市和邯郸市大部及保定市和衡水市一部,沙尘天气发生的频次明显多于西北部。从 1980—2006 年沙尘天气发生日数的统计来看,位于河北省南部的邢台市累计发生沙尘天气日数是西北部张家口市的 1.6 倍,这显然不同于之前人们普遍认为的河北省西北部是受风沙灾害影响最严重地区的观点。

沙尘天气自西向东呈逐渐减少的趋势,浮尘、扬沙和沙尘暴均呈类似的变化趋势。位于西部的坝上高原和太行山南部山前平原是各种沙尘天气的高发区,向东逐渐减少,到靠近渤海的秦皇岛、唐山地区达到最低值。位于河北省最东端的秦皇岛市沙尘天气发生频次不及西部的邢台市的 1/7。

浮尘、扬沙、沙尘暴的高发区各异,与沙尘天气的高发区也不相同。浮尘天气主要发生于河北省的中南部地区,以石家庄市为中心,包括石家庄、邢台、邯郸的大部分地区。扬沙天气高发中心有两处,一处位于河北省南部,以邢台市为中心,另一处位于河北省西北部,以张家口市为中心,其中南部扬沙区的范围更广,频次更高。沙尘暴高发中心也有两处,一处位于河北省西北部,以张北县为中心,范围和影响强度均较大,另一处位于河北省中南部,较强中心位于保定南部、石家庄东北部、衡水北部、沧州西部附近,范围较广,但强度相对较小。

根据沙尘天气区域差异,大体上可将全省划分为 3 个沙尘天气的类型区。一是西北部以扬沙和沙尘暴为主的沙尘天气高发区,范围主要包括张家口的坝上地区和坝下间山盆地地区。这一地区沙尘天气以扬沙为主,但是沙尘暴也占有相当大的比重,浮尘天气发生频率很低。二是河北省南部太行山前以扬沙和浮尘为主的沙尘天气高发区,范围涉及邢台市、石

家州市、邯郸市和衡水市的大部分地区。这一地区沙尘天气以扬沙为主, 但浮尘也占有相当大的比重, 沙尘暴发生频率相对较低。三是河北省中东部以扬沙为主的沙尘天气低发区, 范围较广, 包括了秦皇岛市、

唐山市、沧州市、廊坊市的全部和承德市、保定市、衡水市的一部分地区, 是 3 个类型区中范围最大的一个。这一区域扬沙发生频次相对较高, 浮尘和沙尘暴发生频率都很低。

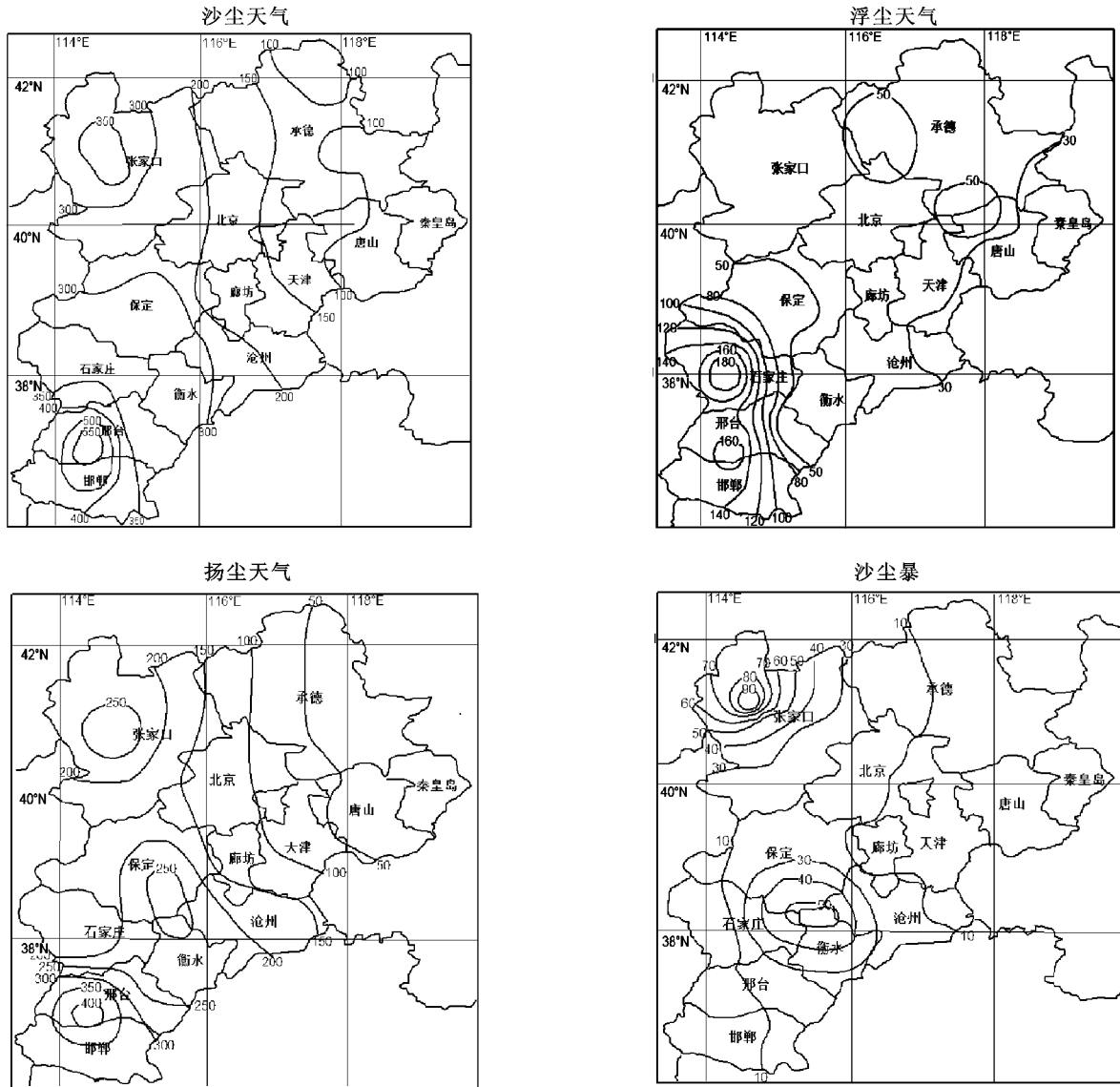


图 1 河北省 1980—2006 年沙尘天气、浮尘、扬沙及沙尘暴日数分布

1.3 沙尘天气的年际变化

对各沙尘天气类型区的数据分析表明(图 2), 河北省沙尘天气 1980—2006 年总体呈波动减少趋势, 并且全省变化趋势基本一致。1980—1990 年是沙尘天气的高发期, 之后逐渐减少, 20 世纪 90 年代后期达到最低值, 2000—2002 年进入一个小高发期, 之后迅速减少, 至 2006 年一直保持在一个较低的水平上。浮尘、扬沙和沙尘暴均具有与沙尘天气类似的年际变化趋势, 说明 3 者尽管表现形式不同, 却可能受相同气候变化过程控制。气象数据表明我国北方春季沙尘日数的增减与大风日数的增减一致^[5]。

1.4 沙尘天气的年内变化

河北省沙尘天气具有显著的年内变化特点, 并且浮尘、扬沙、沙尘暴变化趋势基本相同。数据分析表明(图 3), 春季是沙尘天气的多发季节, 4 月达到顶峰, 盛夏和初秋沙尘天气出现最少, 8 月达到低谷。沙尘天气的这种变化趋势显然受到气候要素的季节变化影响。

受东亚季风的影响, 春季冷暖气团在河北省境内频繁交汇, 大风频发, 加之春季降水稀少, 气温回升较快, 表土解冻, 土壤干燥、质地疏松; 此时植被尚未萌发枝叶, 很容易发生沙尘天气。夏秋季节东南风占主

导,降水集中、雨量大,地表湿润,植被覆盖度高,不易起沙,因此很少发生沙尘天气。

2 影响因素分析

从河北省沙尘天气形成的沙尘源来看,可分为远源和近源沙尘天气。远源沙尘天气的沙尘源在河北

省境外,经大风吹起和长距离输送后影响河北省,形成的沙尘天气类型是浮尘或者尘暴。近源沙尘天气的沙尘源在河北省境内,经大风吹起后影响当地和下风向的一定地区,形成的沙尘天气类型是主要是扬沙。河北省沙尘天气的时空分布特征是由这两种来源的沙尘相互叠加,共同作用形成的。

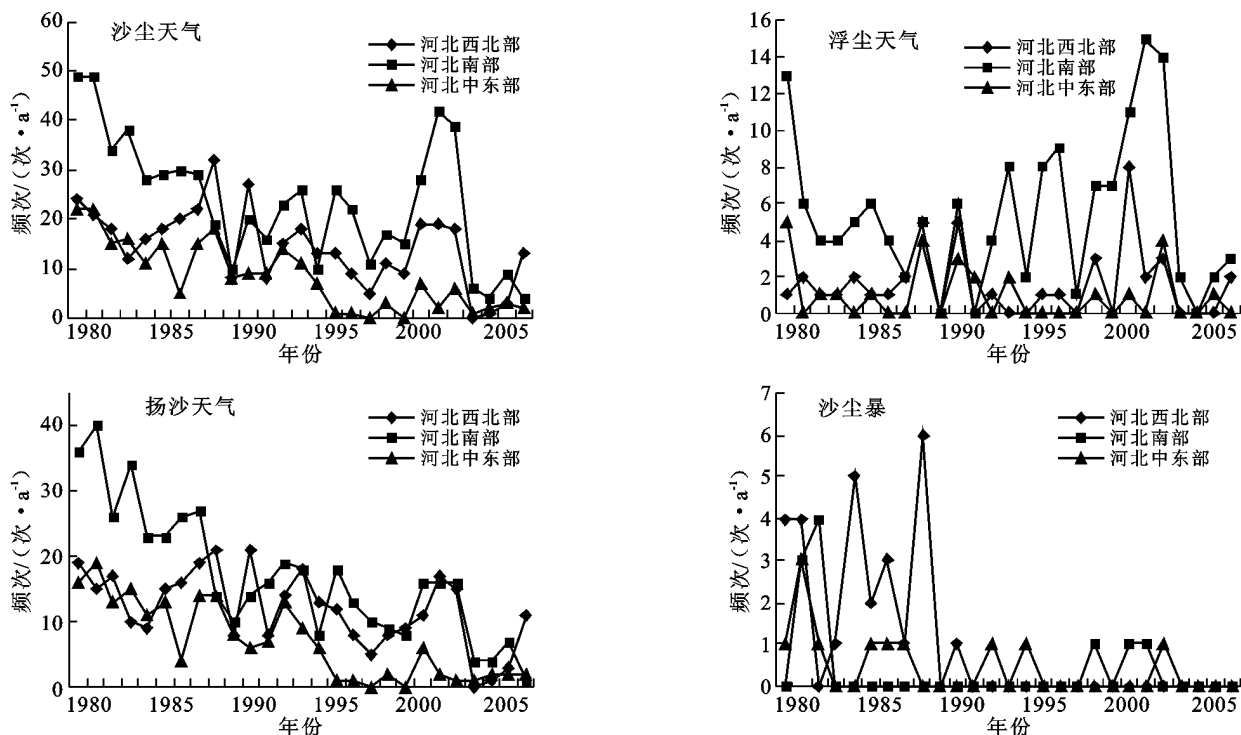


图 2 1980—2006 年河北省各地区沙尘天气年际变化

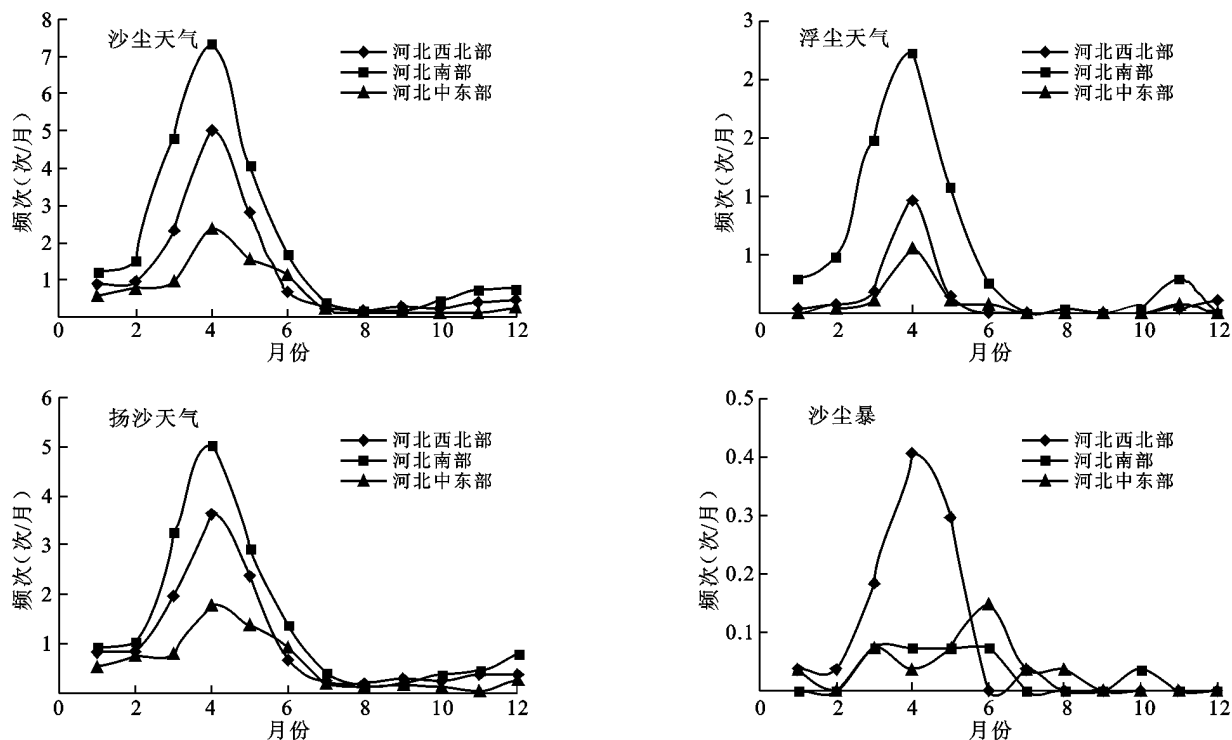


图 3 河北省各地区沙尘天气年内变化

2.1 气候周期性变化是造成沙尘天气年际年内变化的主因

气象站的数据分析表明,河北省沙尘日数的增减与春季大风日数的增减有较好的一致性,二者相关系数达到0.62,通过99%信度(图4)。而大风通常都是由强烈的天气过程造成的,是气候周期性变化的反映。有研究表明,华北地区沙尘天气的年际变化与北极涛动(AO)、太平洋—北美遥相关型(PNA)和北半球极涡面积(PVA)等大气环流因子的年际变化具有较好的相关性^[28]。厄尔尼诺事件和反厄尔尼诺事件作为年际尺度上对全球大气环流和气候异常影响最强的信号,通过影响环流异常,进而影响沙尘暴的发生频次。AO和PNA等能够反映厄尔尼诺事件强弱的大气环流因子与华北地区沙尘暴发生频次的相关性反映了ENSO事件对华北地区沙尘天气年际变化的影响。当发生厄尔尼诺事件后,春季东亚副热带西风急流强度偏弱,而偏弱的急流对于天气系统的发生和强度是不利的。因此,可以减少沙尘天气频次。反

之,当反厄尔尼诺事件发生时,春季东亚冷空气活动加强,沙尘天气发生频次增加。从1950年以来的记录来看,在当前全球气候变暖背景下,反厄尔尼诺现象频率趋于变少,强度趋于变弱,华北地区沙尘天气的发生频次也呈波动减少的趋势。2000年处在20世纪最强的一次厄尔尼诺事件以后反厄尔尼诺事件的高峰期,冷空气势力很强,造成寒潮大风频繁发生,沙尘天气明显增多^[5]。由此可见,全球尺度的气候周期性波动及其影响下的大气环流因子的年际波动是造成华北地区(包括河北省)沙尘天气年际变化的主因,其它任何因素都不足以在如此大的空间范围内引起沙尘天气发生如此长周期的波动。

河北省属温带大陆性季风气候,大气环流的季节性变化明显,造成了沙尘天气的年内周期性变化。冬春季受蒙古高压的影响,冷空气活动频繁,大风日数较多,地表土壤干燥、质地疏松,植被还未完全形成,各种沙尘天气发生频率较高。夏秋季受太平洋低压影响,降水丰富,地表湿润,植被覆盖度高,沙尘天气很少发生(图4)。

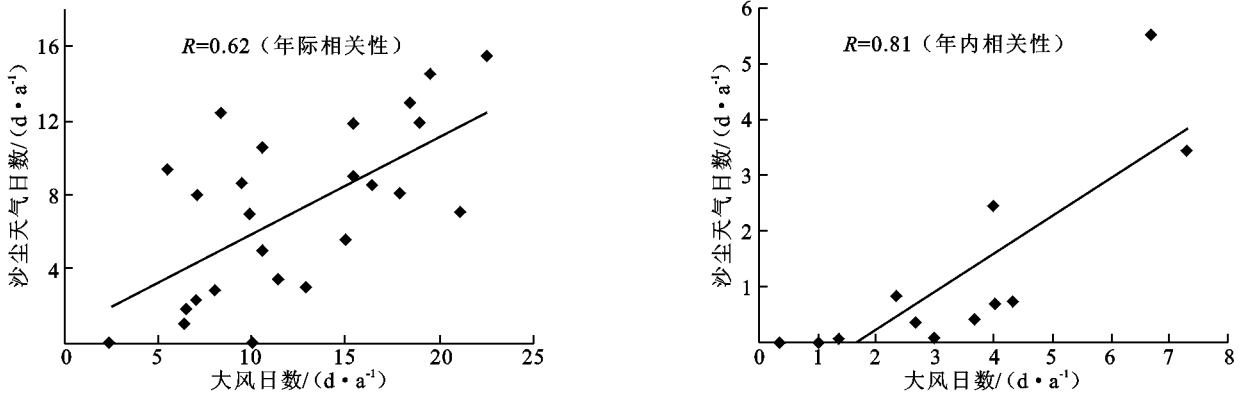


图4 河北省沙尘天气日数与春季大风天气日数的年际年内关系

2.2 区域大气环流特征影响沙尘天气的空间分布

受地形、沙尘源地和区域大气环流的影响,沙尘主要通过西北路径和偏西路径两条路线影响河北省。偏西路径沙尘天气一般起源于蒙古国和我国内蒙的中西部或新疆北部,受偏西气流引导,沙尘主体向东移动影响华北地区,西北路径沙尘天气一般起源于蒙古国或我国内蒙古西部,受西北气流引导,沙尘主体自西北向东南方向移动并影响华北地区^[27]。以2006年春季为例,在影响河北省的12次沙尘天气过程中,西北路径有6次,偏西路径有3次,合计占沙尘天气发生总频次的75%(表2)。偏西路径主要过境河北省的中南部地区,西北路径主要主要过境河北省的西北部地区,给这两个地区带来大风和沙尘天气,使这两个地区成为河北省的沙尘天气高发区。自西向东

随着风力强度逐渐减弱,携带的沙尘量也不断减少,造成沙尘天气发生频率和强度降低,因此河北省沙尘天气呈自西向东逐渐减少的趋势。需要指出的是,在影响河北省沙尘天气的两条路径中,西北路强度更大,影响范围更广,对河北省沙尘天气的影响也更显著,已有的研究表明^[25],石家庄市的沙尘天气有80%是由西北气流引起的。

2.3 下垫面特性是影响风沙活动的另一重要因素

沙尘天气的发生不仅需要足够强劲持久的风力,还需要地表丰富的松散干燥的沙尘。河北省西北部和中南部之所以成为沙尘天气的高发区,大风与地面较丰富沙(尘)源相耦合是重要的决定性因素。河北坝上地区大面积草原被开垦为农田,草场退化也比较严重,春季地表土壤干燥,缺少植被覆盖,从而为扬沙

和沙尘暴天气的发生提供了丰富的沙尘源,使这一地区及其下风向一定范围成为扬沙和沙尘暴天气的中心,但这一地区不具备产生浮尘天气的地形和气象条件,因此浮尘天气发生频次较低。中南部是河北省的一个少雨区(另一少雨区为河北坝上),冬春季土壤亦比较干燥,绝大多数河流干涸断流,河滩裸露,为沙尘天气的发生提供了物质基础。大风日数较多,但强度

较小,因此近源沙尘天气以扬沙为主,沙尘暴发生频次相对较少。

上游效应引起的浮尘天气与就地扬沙后浮尘天气叠加,又使这一地区成为浮尘天气的高发区。河北省其它地区,尤其是东部地区沙尘源和大风日数较以上两个地区均偏少,因此沙尘天气发生频次较低,成为沙尘天气的低发区。

表 2 2006 年春季影响河北省沙尘天气过程统计

时间(月-日)	天气类型	路径	影响地区	时间(月-日)	天气类型	路径	影响地区
03-10	浮尘、扬沙	西北	河北大部	04-14	扬沙、浮尘	局地	河北北部
03-17	扬沙	西北	河北北部	04-17	扬沙	西北	河北北部
03-25	扬沙	西北	河北北部	04-22—24	扬沙	偏北	河北北部
03-27	扬沙、浮尘	西北	河北全部	04-30	扬沙、浮尘	西北	河北北部
04-08	扬沙	偏西	河北南部	05-16—17	浮尘、扬沙	偏西	河北大部
04-11	扬沙、浮尘	偏西	河北中部	05-19—20	扬沙、浮尘	局地	河北北部

3 结论

河北省境内的大气沙尘颗粒物既有外来成分,也有境内成分。沙尘天气的时空分布特征是由这两种来源的沙尘相互叠加,共同形成的。沙尘天气类型以扬沙为主,浮尘次之,沙尘暴最少,说明该地区不仅受到上风向沙尘源地的影响,本地的风蚀起沙作用也是导致沙尘天气发生的重要原因。

春季是沙尘天气的多发季节,盛夏和初秋沙尘天气出现最少,沙尘天气的年内变化显著。沙尘天气从1980—2006年总体呈波动减少的趋势,浮尘、扬沙和沙尘暴均有类似的年际变化趋势,说明3者尽管表现形式不同,但却受相同的气候变化过程控制。沙尘天气的年际变化和春季大风日数的增减相一致,而大风日数的增减是气候周期性变化的反映。厄尔尼诺事件与反厄尔尼诺事件交替发生导致的东亚季风的强弱变化和大气环流因子的改变是造成寒潮大风和沙尘天气年际变化的主要原因,其它任何因素都不足以在如此大的空间范围内引起沙尘天气发生如此长周期的波动。

大风携带的沙尘主要通过偏西和西北两条路径影响河北省,给河北省的中南部和西北部地区带来大风和沙尘天气,使这两个地区成为河北省的沙尘天气高发区,其中西北路沙尘天气发生次数更多、强度更大。自西向东随着风力强度逐渐减弱,沙尘天气的发生频率递减。大风与地面沙尘源耦合作用决定了沙尘天气的空间分布特征。根据沙尘天气区域差异,大体上可将全省划分为3个沙尘天气的类型区,即西北部以扬沙和沙尘暴为主的沙尘天气高发区,南部以扬

沙和浮尘为主的沙尘天气高发区和中东部以扬沙为主的沙尘天气低发区。减少河北省沙尘天气的发生,除了继续加强对境外沙尘源区生态环境的综合治理外,还应重点做好河北省西北部和中南部沙尘源地的治理工作。

[参 考 文 献]

- [1] 张加云, 刘晓东. 一次强沙尘暴活动对中国城市空气质量的影响[J]. 中国沙漠, 2008, 28(1): 161-169.
- [2] 王建鹏, 王式功. 沙尘天气对西安市空气质量影响的研究[J]. 中国沙漠, 2008, 28(1): 161-169.
- [3] 张迪, 孙继松, 王华. 2004年北京市沙尘天气对空气质量影响的对比分析[J]. 气象科技, 2005, 33(6): 533-537.
- [4] 陈广庭. 北京强沙尘暴史和周围生态环境变化[J]. 中国沙漠, 2002, 22(3): 211-213.
- [5] 叶笃正, 丑纪范, 刘纪远, 等. 关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 513-521.
- [6] 孟紫强, 胡敏, 郭新彪, 等. 沙尘暴对人体健康影响的研究现状[J]. 中国公共卫生, 2003, 19(4): 471-472.
- [7] 马雁军, 齐丽, 扬虹斌, 等. 大气污染对呼吸系统疾病的影响研究[J]. 辽宁气象, 2002(2): 33-34.
- [8] 李君, 范雪云. 沙尘暴特性及对人体健康影响[J]. 中国煤炭工业医学杂志, 2004, 7(9): 897-898.
- [9] 高庆先, 任阵海, 李占青, 等. 中国北方沙尘气溶胶时空分布特征及其对地表辐射的影响[J]. 资源科学, 2004, 26(5): 2-10.
- [10] 庄国顺, 郭敬华, 袁蕙, 等. 2000年我国沙尘暴的组成、来源、粒径分布及其对全球环境的影响[J]. 科学通报, 2001, 46(3): 100-106.
- [11] 丁瑞强, 王式功, 尚可政, 等. 中国春季沙尘暴的趋势变化及年代际变化[J]. 高原气象, 2004, 23(5): 660-666.

- [12] 丁瑞强, 王式功, 尚可政, 等. 近45 a我国沙尘暴和扬沙天气变化趋势和突变分析[J]. 中国沙漠, 2003, 23(3): 306-310.
- [13] 钱正安, 宋敏红, 李万元. 近50年来中国北方沙尘暴的分布及变化趋势分析[J]. 中国沙漠, 2002, 22(2): 106-111.
- [14] 王式功, 王金艳, 周自江, 等. 中国沙尘天气的区域特征[J], 地理学报, 2003, 58(2): 193-200.
- [15] 钱维宏, 朱亚芬, 时少英, 等. 中国沙尘天气变化的时空分布特征及其气候原因[J]. 地理学报, 2001, 56(4): 477-485.
- [16] 丘新法, 曾燕, 缪启龙. 我国沙尘暴的时空分布规律及其源和移动路径[J]. 地理学报, 2001, 56(3): 317-322.
- [17] 延昊, 王长耀, 牛铮, 等. 东亚沙尘源地、沙尘输送路径的遥感研究[J]. 地理科学进展, 2002, 21(1): 90-94.
- [18] 许炳心. 黄土高原地区沙尘暴形成的自然地理因素: I 影响因素分析[J]. 中国沙漠, 2005, 25(4): 547-551.
- [19] 张莉, 丁一汇, 任国玉, 等. 我国北方沙尘天气演变趋势及其成因[J]. 应用气象学报, 2005, 16(5): 583-592.
- [20] 申元村, 杨勤业, 景可, 等. 我国的沙尘暴、尘暴灾害及其防治[J]. 中国减灾, 2001, 11(2): 27-30.
- [21] 路明. 我国沙尘暴发生成因及其防御策略[J]. 中国农业科学, 2002, 35(4): 440-446.
- [22] 毛睿, 龚道溢, 范一大. 春季天气变率对华北沙尘暴频次的影响[J]. 地理学报, 2005, 60(1): 513-521.
- [23] 尤凤春, 史印山, 付桂琴, 等. 河北省沙尘暴天气成因分析[J]. 高原气象, 2005, 24(4): 642-647.
- [24] 付桂琴, 尤凤春. 河北省西北大风沙尘暴天气特征分析[J]. 河北气象, 2004, 23(1): 2-4.
- [25] 柴东红, 宋晓辉, 李国翠, 等. 石家庄地区沙尘天气分析[J]. 中国沙漠, 2008, 28(2): 377-380.
- [26] 杨前进. 沙尘暴沉降物的粒度特征及其环境意义[J]. 中国沙漠, 2004, 24(1): 47-50.
- [27] 张小曳. 2006年春季的东北亚沙尘暴[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 18-19.
- [28] 毛睿, 龚道溢. 华北春季沙尘暴频次与环流年际变率的相关分析[J]. 高原气象, 2007, 26(5): 1023-1030.

(上接第45页)

- [7] 赵文智, 白四明. 科尔沁沙地围封草地种子库特征[J]. 中国沙漠, 2001, 21(2): 204-208.
- [8] 赵丽娅, 李锋瑞. 沙漠化过程土壤种子库特征的研究[J]. 干旱区研究, 2003, 20(4): 317-321.
- [9] 程积民, 万惠娥, 胡相明. 黄土高原草地土壤种子库与草地更新[J]. 土壤学报, 2006, 43(4): 679-683.
- [10] 徐海量, 李吉玖, 王增如. 塔里木河下游土壤种子库的空间分布特征分析[J]. 水土保持学报, 2007, 21(6): 183-186.
- [11] 贾笃敬, 张映生, 张自和, 等. 高寒地区优良豆科牧草阴山扁蓿豆一些性状的研究[J]. 甘肃农学报, 1984(1): 63-69.
- [12] 赵成章, 樊胜岳, 殷翠琴. 毒杂草型退化草地植被群落特征的研究[J]. 中国沙漠, 2004, 24(4): 507-512.
- [13] 傅家瑞. 种子生理[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [14] 张景光, 王新平, 李新荣, 等. 荒漠植物生活史对策研究进展与展望[J]. 中国沙漠, 2005, 25(3): 306-314.
- [15] 邵新庆, 王堃, 吕进英. 华北农牧交错带退化草地土壤种子库动态变化[J]. 草业科学, 2005, 22(11): 8-11.
- [16] 白文娟, 焦菊英, 张振国. 安塞黄土丘陵沟壑区退耕地土壤种子库特征[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(2): 65-72.
- [17] 吕世海, 卢欣石. 呼伦贝尔草地风蚀沙化植被生物多样性研究[J]. 中国草地学报, 2006, 28(4): 6-10.
- [18] Roberts H A. Seed banks in soils. In: *Advances in Applied Biology* [M]. London: Academic Press, 1981: 1-55.
- [19] 沈有信, 赵春燕. 中国土壤种子库研究进展与挑战[J]. 应用生态学报, 2009, 20(2): 467-473.
- [20] Caballero I, Olano J M, Loidi J, et al. Seed bank structure along a semi-arid gypsum gradient in Central Spain [J]. *Journal of Arid Environments*, 2003, 55(2): 287-299.
- [21] 赵凌平, 程积民, 万惠娥. 黄土高原典型草原区草地土壤种子库的动态分析[J]. 水土保持通报, 2008, 28(5): 60-65.
- [22] 谢晋阳, 陈灵芝. 中国暖温带若干灌丛群落多样性问题的研究[J]. 植物生态学报, 1997, 21(3): 197-207.
- [23] 孙海群, 朱志红, 乔有明, 等. 不同海拔梯度小嵩草甸植物群落多样性比较研究[J]. 中国草地, 2005(5): 18-22.