

文章编号 :1004-4574( 2004 )01- 0044 - 06

# 土壤水分对沙尘暴的阈值反应 ——以内蒙古中西部地区为例

李 宁 顾 卫 , 谢 锋 杜子璇

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

**摘要** 以 2001 年 4 月至 2003 年 6 月内蒙古中西部地区逐时观测的土壤体积含水百分率资料为基础 , 论述了土壤体积含水百分率的时间变化规律及其对沙尘暴的阈值反应。得到的主要结论是 (1) 土壤体积含水百分率有着单峰型日波动反应 , 最高和最低值分别出现在午后 4 时和午前 9 时。(2) 土壤体积含水百分率的月际变化基本遵循以 1a 为周期作简单振动的变化规律 , 最低值出现在 3~4 月。土壤体积含水百分率全年波动介于 18.5%~37.3% 之间 , 年平均值为 26.5%。(3) 沙尘暴的发生在土壤体积含水百分率含量一定范围内并不随土壤含水量的降低而发生明显变化 , 但当土壤体积含水百分率低于 19.5% 时 , 则随着土壤体积含水百分率的降低而明显增加 , 表现为土壤体积含水百分率有明显的阈值反应。(4) 引进沙尘暴时度的概念研究了沙尘暴发生的持续时间 , 由沙尘暴时度与土壤体积含水百分率的指数关系发现 , 在时度大于 200min 和小于 120min 的两类沙尘暴中 , 土壤体积含水百分率每降低 1% , 沙尘暴时度将分别增加 19.94min 和 10.14min。

**关键词** 土壤水分 ; 沙尘暴 ; 阈值 ; 内蒙古

中图分类号 P461<sup>+</sup>.4 文献标识码 A

## Threshold value response of soil moisture to dust storm a case study of midwestern Inner Mongolia Autonomous Region

LI Ning ,GU Wei ,XIE Feng ,DU Zi-xuan

( Key Laboratory of Environmental Changes and Natural Disaster of Ministry of Education of China , College of Resources Science & Technology , Beijing Normal University , Beijing 100875 , China )

**Abstract** Based on hourly percentage of soil volume moisture date observed from April 1 2001 to June 30 2003 in midwest of Nei Mongol of China , the change regulation of percentage of soil volume moisture and its threshold response to dust storm are explained in this paper , from which some important results can be drawn as follows :(1) The daily variation of percentage of soil volume moisture shows a single peak. Its highest and lowest values occur at 4pm and 9am , respectively ;(2)The monthly variation in percentage of soil volume moisture shows a one year cycle , and its lowest value lies in period of March to April ; Its monthly mean value is waved between 18.5% and 37.3% , its annual mean value is 26.5% ;(3)Along with decrease of percentage of soil volume moisture , occurrence of dust storm increase only when the percentage lower than 19.5% , which shows as a threshold value in evidence ;(4)The duration of dust storm will increase 19.94 min and 10.14 min for the durations larger than 200 min and smaller than 120 min respectively as the percentage of soil volume moisture decrease 1% .

**Key words** 土壤水分 ; 沙尘暴 ; 阈值 ; Nei Mongol

收稿日期 2003-10-12 ; 修订日期 2003-12-09

基金项目 教育部科研专项基金资助项目

作者简介 倪秀娟 (1958- ) ,女 ,江苏镇江人 ,副教授 ,主要从事环境演变和灾害评估研究。

许多学者的研究<sup>[1~3]</sup>指出,产生沙尘暴的条件有3个,一是大风,这是构成沙尘暴的动力条件;二是强劲对流的不稳定空气状态,这是构成沙尘暴的局地热力条件;三是裸露于地表的沙尘物质,这是产生沙尘暴的物质条件。这3个条件是相辅相成、缺一不可的。而其中的物质条件就是沙尘暴源地区的下垫面状况。沙尘暴在风速大于某一量级时,要在强风通过区的地表沉积物粒径小、植被覆盖度低、地表破碎度高、土壤含水量差等条件下才能发生,也就是说,沙尘暴的产生与下垫面状况有密切的联系。因此对于某一区域来说,要想搞清沙尘暴发生发展的机理,必须要对沙尘暴源地区的下垫面状况做深入细致的研究。

在有关影响沙尘暴的下垫面因子的研究中,土壤体积含水百分率和植被覆盖率受到重视<sup>[1~4]</sup>。特别是土壤体积含水百分率,作为衡量地表干湿状况的重要指标,与沙尘暴发生日数之间存在着负相关关系<sup>[5]</sup>。在同样的气象条件下,沙尘暴途经区域下垫面的土壤质地及其湿度状况直接影响着沙尘暴的形成。然而,纵观土壤体积含水百分率研究的历史和现状发现,缺乏详尽的土壤体积含水百分率观测资料是影响这一问题研究进展的主要困难。由于精确的土壤体积含水百分率测定程序繁琐,目前在研究中通常所使用的土壤体积含水百分率资料大都为农业气象站提供的以旬作为时间单位的观测资料。但这些资料时间间隔大,无法用其解析土壤体积含水百分率的日变化特征,因此很难建立其与沙尘暴的时间对应关系。

针对这一问题,作者在沙尘暴发生频率较高的内蒙古自治区中西部,选择了3个代表地点,设置了土壤水分自动观测设备,进行了为期两年的逐时土壤体积含水百分率观测。本文根据这些土壤体积含水百分率观测资料,重点分析了内蒙古中西部地区土壤体积含水百分率的时间变化特点,以及土壤体积含水百分率对沙尘暴的阈值反应。

## 1 观测地点与数据来源

### 1.1 观测地点的选取

经由内蒙古自治区影响北京及华北地区的沙尘暴路径主要有两条,一条是北方路径,即二连浩特—苏尼特左旗—张家口—北京,一条是北西北路径,即阿拉善—乌海—准格尔旗—北京。为了把握沙尘暴易发区的土壤体积含水百分率与沙尘暴之间的关系,我们在这两条路径上选择了二连浩特、乌拉特中旗和乌海市作为观测地点(图1)进行土壤体积含水百分率的逐时自动观测。

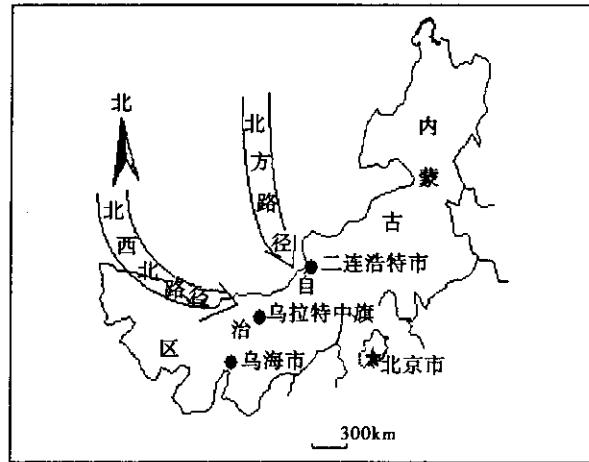


图1 观测地点位置示意图

Fig. 1 Location of observational plots

二连浩特、乌拉特中旗和乌海位于内蒙古自治区中西部地区,气候上属于干旱和很干旱气候类型。这里干旱少雨多大风,年沙尘暴日数最多可达10d,最少日数为5d,尤其在春季,降水量不足年降水量的15%,大风日数占全年大风日数的60%~80%,3~5月份湿润系数在0.02~0.30之间,地面蒸发量大,土壤含水量

少,加上土地风蚀沙化严重,植被盖度低,生态环境相当脆弱,为沙尘暴的频繁发生提供了较为适合的下垫面条件。观测地点的主要自然环境特征如表 1 所示。

表 1 观测地点的自然环境特征

Table 1 Natural environment characteristic of observational place

站名	土壤类型	植被类型	气候类型	年大风日数 /d	年降水量 /mm	年沙尘暴 日数/d
乌海市	灰漠土	草原化荒漠	很干旱较温和	32	168.5	22.7
乌拉特中旗	栗钙土	荒漠草原	干旱较温凉	53.3	209.1	8
二连浩特	棕钙土	荒漠草原	很干旱温凉	71.8	142.2	9.5

## 1.2 数据来源

使用的观测仪器为日本制 ADR 土壤水分计( UIZ - SM - 2X ),仪器安放在当地气象站的气象观测场内,探测深度为 0~10cm,数据获取的时间间隔为 1h。土壤体积含水百分率数据来自于在上述 3 个地点进行的土壤体积含水百分率观测,观测时间为 2001 年 4 月至 2003 年 6 月。取实测数据作为土壤的体积含水百分率,即

$$\text{土壤体积含水百分率} = [\text{土壤含水体积} (\text{m}^3) / \text{土壤总体积} (\text{m}^3)] \times 100\%。$$

气象数据取自上述 3 个地点气象站的同期地面气象观测。

## 2 土壤体积含水百分率的时间变化

土壤体积含水百分率的时空变化是各种环境因子综合作用的结果。降水是影响干旱半干旱区土壤体积含水百分率最重要的因素,气温、太阳辐射等也对土壤体积含水百分率产生一定的影响;此外,坡向、坡度、坡位等地形因子以及土壤特性、地表植被覆盖程度、土地利用情况等也与土壤体积含水百分率的空间分布差异有关。

### 2.1 土壤体积含水百分率的日变化比较

为了准确描述干旱半干旱区土壤体积含水百分率随降水和季节的变化特点,将上述观测资料分为干季(3~4 月)、湿季(6~8 月)两个时间段,分别对以上 3 地的土壤体积含水百分率的日变化特征进行统计。

图 2 是二连浩特干、湿季的平均土壤体积含水百分率日变化曲线。方差分析结果表明,乌海、乌拉特中旗的变动情况与此无明显差异(图略)。从图 2 可以看出,干、湿季的土壤体积含水百分率日变化幅度分别介于 18%~20% 和 32%~34% 之间;干、湿季土壤体积含水百分率的日变化形态十分相似,均表现为单峰型,上午 8 时为最低值,最高值均出现在午后 4 时左右;干、湿季土壤体积含水百分率平均值分别为 19.2% 和 33.1%,干季只是湿季的 58%;干、湿季土壤体积含水百分率变异系数分别为 1.89% 和 2.27%,这说明土壤体积含水百分率的稳定性在湿季比干季差。一些研究指出<sup>[9]</sup>,沙尘辐射冷却的正反馈效应在午后最强,而干旱半干旱区土壤体积含水百分率日变化最高值也出现在午后,这两者之间是否存在一种相互促进的效应,还有待于今后开展深入的研究。

二连浩特平均风速日变化的最高值出现在午后 2 时,而土壤体积含水百分率日变化最高值发生在午后 4 时,即与风的日变化曲线相比,土壤体积含水百分率的峰值存在 2h 左右的滞后。午后土壤体积含水百分率达到最高值之前,风速已上升至最高值,而沙尘暴强度的峰值与风速的峰值有较好的一致性,这使得绝大多数沙尘暴集中出现在午后,也表明土壤体积含水百分率的日变化对沙尘暴的发生和强度变化贡献甚微,风是主要影因子。  
万方数据

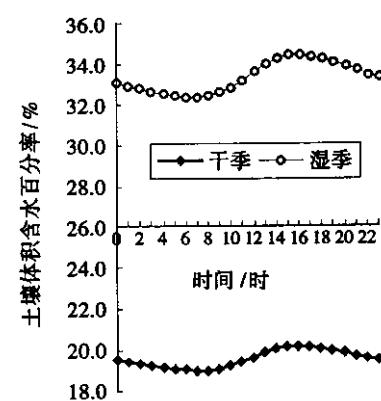


Fig. 2 Daily variation in percentage of soil volume moisture during dry and wet seasons in Erlianhaote

## 2.2 土壤体积含水百分率的月际变化

多数研究认为<sup>[4]</sup>,虽然沙尘暴的活动与冷空气活动有关,但最寒冷的冬季沙尘暴活动弱,而温度适中的春季沙尘暴却活动强。与沙尘暴有关的下垫面的参数及其时间变化规律的研究表明<sup>[5]</sup>,土壤湿度作为下垫面湿润状况的重要指标,与沙尘暴日数存在着负相关关系。为此用平均风速和土壤体积含水百分率的年变化,分析二者与沙尘暴的相互依赖关系。

图3表示二连浩特1981~2000年30a平均风速的月际变化。3~5月是平均风速最大的时期。

图4是二连浩特2001年4月至2002年3月土壤体积含水百分率的月际变化,可见,土壤体积含水百分率基本遵循以1a为周期作简单振动的变化规律,其值介于18.5%~37.3%之间,年平均值为26.5%。另一方面,在沙尘暴主要活动期的3~4月,土壤体积含水百分率在全年中为最低,到6~8月,由于降水和蒸散等的作用,土壤体积含水百分率开始走出低值区并逐渐回升。此后由于降水和气温的影响,土壤体积含水百分率的高值区在10月上旬逐渐消失。

显著水平的方差分析表明,3地的差异不显著。二连浩特的土壤体积含水百分率略高于其他两地。

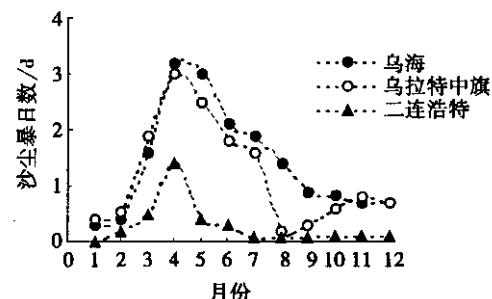


图3 沙尘暴日数的月变化

Fig. 3 Monthly variation of days occurring dust storm

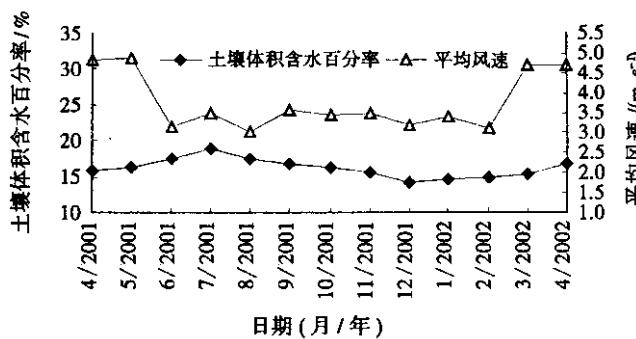


图4 土壤体积含水百分率与平均风速的月际变化

Fig. 4 Monthly variation in percentage of soil volume moisture and mean wind speed

3~5月,土壤体积含水百分率一般比该地区年平均土壤体积含水百分率低约1.5%,比其他季节少2.3%。这一时期的平均风速表现为一年中的极大值,这种风速与土壤体积含水百分率的明显反相关作用,能很好解释沙尘暴主要活动期在3~5月,而降水量最少的冬季沙尘暴的活动却不太频繁。因为在冬季的土壤解冻前,虽然土壤体积含水百分率不高,但地表不够疏松,风的强度也不如春季,沙土不易被沙土吹起;而在气温回升的3~5月,解冻后的土壤表层既干燥又疏松,土壤体积含水百分率出现全年中的最低值,而风速在这时表现为极大值,极易产生沙尘暴。如果前一冬季气温偏低,土壤冻结层厚,春季回暖较快,则升温后土壤解冻迅速,解冻后松土层也较厚,这种厚度大且疏松干燥的地表更易被大风扬起形成沙尘天气。

上述土壤体积含水百分率的日、月变化规律说明,这种风速与土壤体积含水百分率的波动反应说明沙尘暴在午后多发,主要原因取决于大风的动力因子,而发生季节集中在春季而不是降水少的冬季,与春季是一年中土壤体积含水百分率最低的季节有关。

## 3 沙尘暴对土壤体积含水百分率变动的阈值反应

特定时期的寒潮是沙尘暴发生的动力,它与处在特定状态的粉尘相结合是沙尘暴发生的必要条件。与

其说温度和降水量对沙尘暴的生成有重要影响。不如说温度和降水是改变土壤体积含水百分率的关键因素。因此土壤体积含水百分率应在沙尘暴的发生和强度上有所表现。

### 3.1 沙尘暴发生对土壤体积含水百分率的阈值反应

良好的植被覆盖和地形因素固然与沙尘暴有密切的关系，对沙尘暴的发生有阻挡作用，但充足的土壤体积含水百分率亦有明显的抑制作用。为解释这种抑制作用，将沙尘暴按其发生时间的长短进行数字化处理，从而研究土壤体积含水百分率对沙尘暴的发生和持续时间的抑制作用。

**沙尘暴时度** 沙尘暴强度定义为某期间内各向风沙历次风速记录的累计值( $\Sigma V$ )，类似地本文定义沙尘暴发生时间的累计值( $\Sigma t$ )为沙尘暴时度，如式(1)所示，表示沙尘暴发生的持续时间。即当持续时间为10min时记为10，30min时记为30，以此类推。以该定义为基础，统计研究区3个观测点上沙尘暴时度与土壤体积含水百分率的关系。

$$\text{沙尘暴时度}(\Sigma t) \text{ min} = \text{沙尘暴结束时间} - \text{沙尘暴开始时间} \quad (1)$$

从图5样本点的集聚效果看，明显可划分出沙尘暴发生时土壤体积含水百分率表现出的阈值。用点聚图方法并通过“显著”的 $X^2$ 统计检验，可将土壤体积含水百分率19.5%作为划分线。在小于19.5%的情况下，沙尘暴共发生了16次，集中了沙尘暴发生次数总合的94.1%，而且持续时间长的沙尘暴也都集中于此。相反，在土壤体积含水百分率大于19.5%时，只有1次沙尘暴发生，仅占总发生次数的5.9%。由此可认为该区在土壤体积含水百分率值小于19.5%时，沙尘暴发生的可能性明显增大。

从图5还可以看到，沙尘暴的发生和时度在一定土壤体积含水百分率含量范围内并不随土壤含水量的降低而发生明显变化，只有当土壤体积含水百分率低于阈值时，才随着土壤体积含水百分率的降低而增加，表现为土壤体积含水百分率对沙尘暴有明显的阈值反应。

### 3.2 沙尘暴时度对土壤体积含水百分率的阈值反应

点聚图分析还表明，图5表示的沙尘暴时度对土壤体积含水百分率的阈值反应明显存在两大类，一类是沙尘暴时度小于120min，集中在图5中沙尘暴时度的低值区，另一类是沙尘暴时度大于200min，集中在沙尘暴时度的高值区。该区中的沙尘暴时度随土壤体积含水百分率的变化明显比低值区中的变化更强。在显著水平上得到他们的最优关系式分别是 $y = 714.76e^{-0.0646x}$ ( $r = 0.856$ )(图6(a)，删除1个特殊样本)， $y = 1134.5e^{-0.2009x}$ ( $r = 0.506$ )(图6(b))。即沙尘暴时度随土壤体积含水百分率呈指数变化。对于时度大于200min的沙尘暴而言，其时度依赖土壤体积含水百分率变化的程度比时度小于120min的更强。当土壤体积含水百分率每减小1%时，这两类沙尘暴的强度将分别增加19.94min和10.14min。

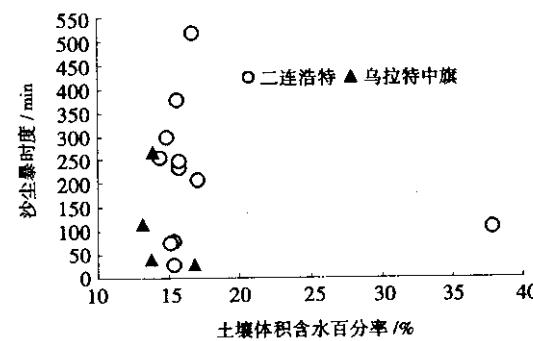


图5 土壤体积含水百分率与沙尘暴时度的关系

Fig. 5 Relation between percentage of soil volume moisture and duration of dust storm

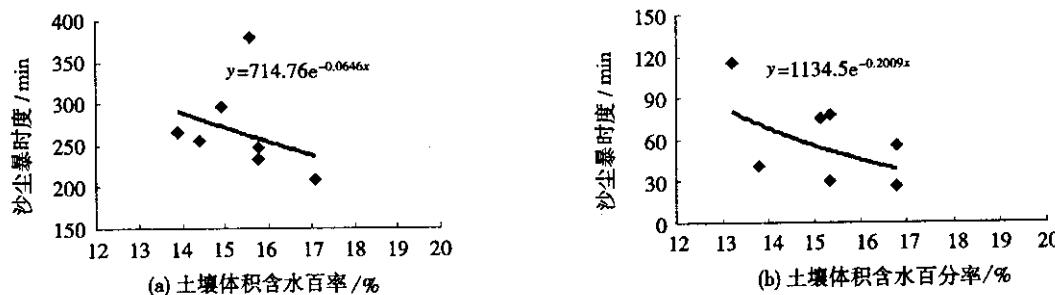


图6 沙尘暴时度随土壤体积含水百分率的变化

Fig. 6 Variation of time degree of dust storm with percentage of soil volume moisture

## 4 结论与讨论

土壤体积含水百分率的日变化呈单峰型,它们对干旱和降水的反应都很敏感,干湿季土壤体积含水百分率波动分别介于18%~20%和32%~34%之间,其平均值分别是19.2%、33.1%,干季的土壤体积含水百分率只是湿季土壤体积含水百分率的58%。

土壤体积含水百分率月变化基本遵循以1a为周期作简单振动的变化规律,最低值出现在3~4月。土壤体积含水百分率波动于18.5%~37.3%之间,年平均值为26.5%。

风速与土壤体积含水百分率有着一致的日波动反应说明沙尘暴在午后多发,主要原因取决于大风的动力因子,而其发生季节集中在春季而不是降水少的冬季,这与春季是一年中土壤体积含水百分率最低的季节有关。这时的土壤体积含水百分率比其他季节的湿度值少2.3%。

沙尘暴的发生在土壤体积含水百分率上有明显的阈值反应,其值为19.5%。不同地区的阈值上限存在差异,二连浩特为19.5%,乌拉特中旗为16.8%,乌海为16.3%。表明在这个区域内,乌拉特中旗和乌海需要更充足的水分供应才能有效抑制沙尘暴的发生。

沙尘暴时度是有助于分析沙尘暴持续时间的一个统计指标。对于时度大于200min的沙尘暴,其时度依赖土壤体积含水百分率变化的程度比时度小于120min的沙尘暴的更强。当土壤体积含水百分率每减小1%时,沙尘暴时度将分别增加19.94min和10.14min。

一些研究指出<sup>[9]</sup>,沙尘辐射冷却的正反馈效应在午后最强,而干旱半干旱区土壤体积含水百分率日变化最高值也出现在午后,这两者之间是否存在一种相互促进的效应,还有待于今后开展深入的研究。

## 参考文献:

- [1] 王涛,陈广庭,钱正安,等.中国北方沙尘暴现状及对策[J].中国沙漠,2001,21(4):322~327.
- [2] 叶笃正,丑纪范,刘纪远,等.关于我国华北地区沙尘天气的成因与治理对策[J].地理学报,2000,55(5):513~521.
- [3] 方宗义,朱福康,江吉喜,等.中国沙尘暴研究[M].北京:气象出版社,1997.
- [4] 顾卫,蔡雪鹏,谢峰,等.植被覆盖与沙尘暴日数分布关系的探讨——以内蒙古中西部地区为例[J].地球科学进展,2002,17(2):273~277.
- [5] 柏晶瑜,施小英,于淑秋.西北地区东部春季土壤体积含水百分率变化的初步研究[J].气象科技,2003,31(4):226~230.
- [6] 卢琦,杨有林.全球沙尘暴警世录[M].北京:中国环境科学出版社,2001.209~206.
- [7] 史培军,严平,袁艺.中国北方风沙活动的驱动力分析[J].第四纪研究,2001,21(1):41~47.
- [8] 吴晓京,陆均天,张晓虎,等.2001年春季沙尘天气分析[J].国土资源遥感,2001,3:8~10.
- [9] 胡金明,崔海亭,唐志尧.中国沙尘暴时空特征及人类活动对其发展趋势的影响[J].自然灾害学报,1999,8(4):49~56.
- [10] Dong Zhibao. Wind erosion in arid and semiarid China: An overview[J]. Journal of Research, 2000, 20(2):134~139.