

# 黑河流域 1960—2009 年平均风速时空变化特征

何旭强<sup>1</sup>, 张勃<sup>1</sup>, 赵一飞<sup>1</sup>, 刘秀丽<sup>1,2</sup>, 张调风<sup>1</sup>, 汪宝龙<sup>1</sup>

(1. 西北师范大学 地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 忻州师范学院 地理系, 山西 忻州 034000)

**摘要:** 利用黑河流域气象站点 1960—2009 年的逐月、逐年的风速观测资料, 运用 Mann—Kendall 检验法和反距离加权插值法(IDW)及相关分析法对黑河流域平均风速时空变化特征进行了分析。结果表明, 近 50 a 来黑河流域年平均风速呈减小趋势, 其变化趋势指标  $\beta$  值为  $-0.01$ ; 春、夏、秋、冬季平均风速均表现为下降趋势,  $\beta$  值分别为  $-0.012$ ,  $-0.011$ ,  $-0.007$  和  $-0.008$ 。年代际变化在 60—70 年代为正距平, 80 年代以后为负距平。年内变化表现为偏双峰型, 第 1 峰值远大于第 2 峰值, 分别出现在 4 月和 11 月。空间变化上, 上游山区年平均风速呈上升趋势, 平均每年增加  $0.01$  m/s; 中游和下游均表现为下降趋势, 降幅在  $0.005 \sim 0.029$  m/s, 同时在不同季节空间差异明显。年平均风速突变发生在 1985 年左右, 春、夏、秋、冬季突变分别出现在 1986, 1984, 1983 和 1985 年。年、春季风速下降与平均气温、平均最低/最高气温以及潜在蒸散有关, 夏、秋季平均最高气温的影响变小, 而冬季仅有潜在蒸散通过了 0.01 的显著性检验, 说明风速下降是造成黑河流域冬季潜在蒸散量减小的主要因素。

**关键词:** 黑河流域; 平均风速; Mann—Kendall 检验; 空间分布; 相关分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)04-0242-06

中图分类号: P425.4

## Temporal and Spatial Characteristics of Average Wind Speed Changes in Heihe River Basin from 1960 to 2009

HE Xu-qiang<sup>1</sup>, ZHANG Bo<sup>1</sup>, ZHAO Yi-fei<sup>1</sup>, LIU Xi-ru<sup>1,2</sup>, ZHANG Tiao-feng<sup>1</sup>, WANG Bao-long<sup>1</sup>

(1. College of Geographic and Environmental Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. Department of Geography, Xinzhou Teacher's University, Xinzhou, Shanxi 034000, China)

**Abstract:** Monthly and annually wind speed data from nine meteorological stations over Heihe River Basin, observed by the China Meteorological Administration from 1960 to 2009, were used to analyze the spatial and temporal variability of average wind speed. Mann—Kendall methods, inverse distance weighted (IDW), and correlation analysis were employed. The result showed a decreasing trend in annual average wind speed during the past 50 years, and the  $\beta$  value was  $-0.01$ . Decreasing tendency in wind speed occurred in four seasons (spring, summer, autumn and winter) as well, and the  $\beta$  values were  $-0.012$ ,  $-0.011$ ,  $-0.007$  and  $-0.008$ , respectively. Interdecadal change of wind speed in the 1960s and 1970s showed positive anomalies, while a negative anomaly was showed since 1980s. The intra-annual variation of wind speed appeared as partial bimodal. Meanwhile, these two peaks existed in April and November, respectively, and the first peak was much larger than the second one. Spatially, slightly increasing trend was showed in the upper reaches with an average rate of  $0.01$  m/s, while decreasing trend were showed in the middle and lower reaches with an average rate of  $0.005$  and  $0.029$  m/s, respectively. At the same time, the trends in different regions varied significantly in four seasons. Abrupt change in annual wind speed occurred in 1985, while abrupt change in four different seasons occurred in 1986, 1984, 1983 and 1985, respectively. Decreasing trend in annual and spring wind speed was correlated with average temperature, average maximum temperature, average minimum temperature and potential evapotranspiration, but this correlation declined in summer and autumn. Only potential evapotranspiration in winter affected wind speed significantly at the 0.01 level. All this indicated that, decreased wind speeds was the main factor that leading to the decrease of potential evapotranspiration in

收稿日期: 2012-07-03

修回日期: 2012-09-25

资助项目: 国家自然科学基金项目“水资源约束下的黑河流域土地利用/覆盖变化模拟研究”(40961038); 生态经济学省级重点学科(5002-021); 西北师范大学知识与科技创新工程项目(NWNU-KJXG-03-66)

作者简介: 何旭强(1987—), 男(汉族), 甘肃省天水市人, 硕士研究生, 主要从事区域环境与资源开发研究。E-mail: he123hw@126.com。

通信作者: 张勃(1963—), 男(汉族), 甘肃省庆阳市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事区域环境与资源开发研究。E-mail: zhangbo@nwnu.edu.cn。

Heihe River Basin in recent 50 years.

**Keywords:** Heihe River Basin; average wind speed; Mann—Kendall test; spatial distribution; correlation analysis

风能是一种高效清洁,具有极大发展潜力的新能源。近年来,在常规能源短缺和全球生态环境恶化的制约下,世界各国越来越重视风能资源的开发利用<sup>[1-3]</sup>。在对风能资源进行评价分析中,研究风速这一气象要素的变化将起到至关重要的作用。然而,气候变化研究多从气温和降水着手,对其他要素如风速等气象变量的研究相对较弱<sup>[4]</sup>。因此,寻求风速在过去历史阶段的变化规律,进而更好地利用风能这种可再生且无污染的绿色能源,对缓解当前的人口、资源、环境等诸多压力具有重要的意义。

近年来,众多学者对风速的研究已经取得了可观的成果。一方面,在全球气候变暖的背景下,全国风速存在着逐年变小的趋势<sup>[5-7]</sup>。任国玉<sup>[6]</sup>对 1956—2002 年全国风速资料研究表明,全国风速每 10 a 减小的速率大于 0.1 m/s,平均风速在 1969 年出现突变,在这之前变化不明显,之后显著增强,自 1974 年开始明显下降;全国风速仅云南西部有少量增加。江莹<sup>[8]</sup>还对全国风向变化特征进行了分析,并指出中国冬季偏北风和夏季偏南风均呈减小趋势。另一方面,目前的研究重点主要是针对大尺度、大区域上风速变化,但对于揭示区域风速更细致的变异特征,特别是各地风速突变点的信息,对揭示风速变化趋势仍很有意义。荣艳淑等<sup>[9]</sup>、刘苏峡等<sup>[10]</sup>先后对华北地区气象测站的实测风速资料进行统计分析;李艳等<sup>[11]</sup>研究了 1961—2007 年重庆地区风速的气候变化;王毅荣<sup>[12]</sup>通过研究河西走廊风速的变化认为风速没有显著的下降趋势,但存在阶段性变化;黄小燕等<sup>[13]</sup>认为西北地区近 50 a 平均风速呈减小趋势,变化率为  $-0.009 \text{ m}/(\text{s} \cdot \text{a})$ ,并指出风速与气温之间存在一定的相关性。

黑河流域位于河西走廊中部,因受到蒙古—西伯利亚高原反气旋的影响,是世界上同纬度最干旱地区之一。流域内生态环境极度脆弱,常出现干热风、大风和沙尘暴,对人畜、农田、植被造成了极大的危害。因此,研究该地区风的变化特征可以降低风带来的自然灾害的受灾程度,对指导农业也起到至关重要的作用,且该区风能资源很丰富,在当今世界能源空前紧张的现状下,可以作为新型能源来开发利用。然而目前该区对于风速变化研究相对较少。因此,通过 Mann—Kendall 法、空间插值以及相关分析等手段,对黑河流域 1960—2009 年近 50 a 来风速变化进行分析,旨在揭示流域尺度上风速的时空变化特征,从而指导流域内农事更加科学合理的运作。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 数据来源

所用数据来自中国气象局国家气象信息中心,并且经过了较为严格的质量控制,包括极值检验和时间一致性检验。黑河流域 1960—2009 年 9 个气象观测站(祁连站、托勒站、野牛沟站、鼎新站、高台站、酒泉站、山丹站、张掖站、额济纳旗站)逐月、逐年实测风速资料,金塔站、梧桐沟站以及吉珂德站因气象数据不全,缺失太多,所以并未涉及到本研究中。并按 3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季和 12 月至翌年 2 月为冬季生成逐季序列。潜在蒸发通过 1998 年世界粮农组织(FAO)推荐并修正的 Penman—Monteith 模型<sup>[14]</sup>估算。为了研究方便,将祁连、托勒和野牛沟划为上游,高台、酒泉、山丹和张掖划为中游,鼎新、额济纳旗划为下游。

### 1.2 研究方法

1.2.1 Mann—Kendall 非参数检验法 本文采用 Mann—Kendall(M—K)非参数检验法<sup>[15]</sup>对黑河流域近 50 a 来风速的变化趋势进行研究。M—K 法是一种非参数统计检验方法,在给定的  $\alpha$  置信水平上,如果  $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$  ( $Z$  为一个正态分布的统计量),则拒绝原假设,即在  $\alpha$  置信水平上,时间序列数据存在明显的上升或下降趋势。其变化趋势的大小用  $\beta$  表示,若  $\beta > 0$ ,表示呈上升趋势;若  $\beta < 0$ ,表示呈下降趋势。

对风速变化趋势的空间分布是采用地统计中的 IDW 插值方法计算的,它基于相近相似原理,以插值点与样本点间的距离为权重进行加权平均,离插值点越近的样本点赋予的权重越大,此方法非常适合于本研究中的空间变量。所用工具是 ArcGIS 9.3 地理数据分析软件,主要用到其中的地统计(geostatistical analysis)模块。

1.2.2 Mann—Kendall 突变检验法 利用 Mann—Kendall 法<sup>[16]</sup>对黑河流域风速变化进行突变检测。给定显著性水平  $\alpha = 0.05$ ,临界值  $u_{0.05} = \pm 1.96$ 。将  $UF_k$  和  $UB_k$  两个统计量序列曲线和  $\pm 1.96$  两条直线绘制在一张图上。通过分析绘制出的  $UF_k$  和  $UB_k$  曲线图来明确突变时间和突变区域。若  $UF_k$  或  $UB_k$  的值大于 0,则表示序列呈上升趋势,小于 0 则表示呈下降趋势。当它们超过临界值线时,表示上升或下降趋势显著。超过临界线的范围确定为出现突变的时间区域。如果  $UF_k$  和  $UB_k$  两条曲线出现交点,且

交点在临界线之间,则交点对应的时刻即为突变开始的时刻。

## 2 结果分析

### 2.1 风速的时空趋势分析

2.1.1 风速的年际变化 图 1 给出了 1960—2009 年黑河流域平均风速变化趋势。由图 1 可见,1960—2009 年黑河流域年平均风速为 2.43 m/s,最大风速出现在 1972 年,为 3.07 m/s;最小风速为 1.99 m/s,出现在 1994 年,极差 1.08 m/s,表明年平均风速变化幅度较大。由最小二乘法得到线性回归方程:

$$y = -0.01x + 2.69 \quad (R^2 = 0.25)$$

由回归方程可以看出,年平均风速总体呈下降趋势,风速变化率为  $-0.1 \text{ m}/(\text{s} \cdot 10 \text{ a})$ ,并呈阶段性变化。由图 1 可以看出,1982 年以前黑河流域绝大部分地区风速呈增加趋势,而此后逐渐呈下降趋势,1994 年降至最低。之后下降幅度有所减弱,尤其是 2004 年以后已经接近多年平均值。这表明自 20 世纪 80 年代以来,黑河流域风速呈下降趋势,直到近几年才有所缓解,这使得近 30 a 来该区的风能储量处于较低的水平。这一结果与中国沙尘暴减少的总体趋势是一致的<sup>[17-18]</sup>。

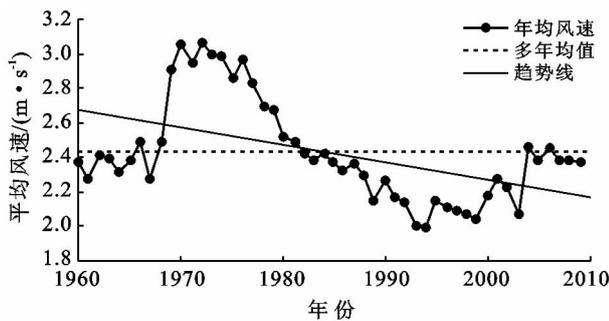


图 1 黑河流域 1960—2009 年平均风速变化趋势

近年来,随着气象站所在区域城市化进程的不断加快,造成气象站位置及海拔高度发生相应的变化,从而影响实测风速的大小,可见地形的高低起伏对风速的影响不可忽视。利用多元线性回归分析拟合出年平均风速与经、纬度及海拔高度的回归方程,并结合 ArcGIS 地统计分析模块得到风速随地形变化的 DEM 空间分布图可以看出,黑河流域平均风速最小值出现在流域中部,且自中游平原区向南北两边递增。而风速的年际变化可以更好地说明不同区域间风速的空间差异。如图 2 所示,近 50 a 黑河流域年平均风速呈下降趋势, $\beta$  值为  $-0.01$ ,并出现南北差异,即由上游到中游、再到下游逐渐减小的趋势。上游年平均风速呈上升趋势,但有自西向东升高幅度减

小的变化,其中托勒站  $\beta$  值最大,为 0.01。中游年平均风速整体呈下降趋势,但基本上变化幅度不大,其中高台站风速下降趋势最明显,其  $\beta$  值为  $-0.022$ 。下游年平均风速也呈下降趋势,额济纳旗站风速降低幅度是最大的, $\beta$  值为  $-0.029$ 。

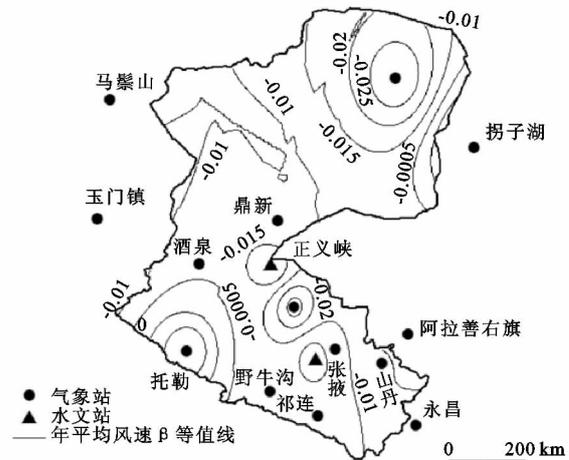


图 2 黑河流域 1960—2009 年年平均风速序列  $\beta$  等值线

2.1.2 风速的年代际距平变化 为了更好地说明黑河流域年平均风速的时间序列变化特征,通过年代际距平进一步分析。由表 1 可知,年平均风速在 20 世纪 60 年代和 70 年代为正距平,80 年代以来为负距平。说明 20 世纪 80 年代以前,年平均风速较大,风能储量较丰富,80 年代以后风速减小,风能储量也逐渐降低。从各季节来看,春季与冬季风速年代际距平变化基本相同,在 20 世纪 60 年代为负距平,70 年代为正距平,80 年代以后为负距平,说明 70 年代风速相对较高;夏季、秋季与全年距平变化基本相同,20 世纪 60 年代和 70 年代为正距平,80 年代以后为负距平,说明全流域夏季、秋季风速在 20 世纪 80 年代以后减小较为显著。总体而言,黑河流域风速在 20 世纪 60 年代冬春季为负距平、夏秋季为正距平,70 年代均为正距平,80 年代以来均呈减小趋势。

表 1 黑河流域季节、年风速的年代际距平 m/s

年代	春季	夏季	秋季	冬季	全年
1960—1969	-0.02	0.04	0.03	-0.02	0.01
1970—1979	0.56	0.51	0.39	0.45	0.48
1980—1989	-0.01	-0.08	-0.07	-0.05	-0.05
1990—1999	-0.39	-0.35	-0.25	-0.30	-0.33
2000—2009	-0.14	-0.12	-0.10	-0.08	-0.11

2.1.3 风速的年内变化 总体而言,黑河流域风速变化表现为偏双峰型,且第一峰值远大于第二峰值(图 3)。近 50 a 来,春季(每年 3—5 月份)风速最大,平均风速达到 2.95 m/s,最大峰值出现在 4 月,这可

能与流域春季多沙尘暴有直接关系;第二峰值出现在每年的 11 月。从流域分区来看,中游和下游风速年内变化与全年一样都属于偏双峰型,中游平原区,风速年内变化与全流域风速变化具有很好的一致性,下游地区平均风速高达 3.17 m/s,这可能与该区深居内陆,气候干燥有关。而上游属于单峰型,其最大峰值也出现在 4 月份,最低值出现在 12 月份。

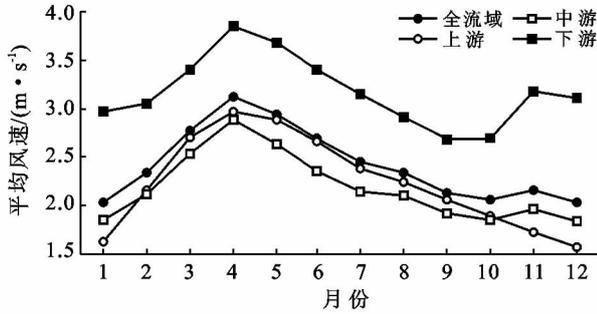


图 3 黑河流域 1960—2009 年平均风速年内分布

2.1.4 风速的季节变化 对研究区内 9 个气象站及周边临近站点 1960—2009 年平均风速进行了 Mann—Kendall 趋势统计检验,并借助地理分析软件 ArcGIS 9.3 将计算所得的 Kendall 倾斜度  $\beta$  值制成

四季风速序列等值线图(图 4)。由图 4 可以看出:  
 (1) 黑河流域春季平均风速呈下降趋势, $\beta$  值为  $-0.012$ 。上游山区风速呈微弱上升趋势,其托勒站  $\beta$  值为  $0.001$ 。中游和下游平原区均为下降趋势区,变化幅度最大的是高台站和额济纳旗站, $\beta$  值分别为  $-0.028$ 和  $-0.029$ 。  
 (2) 黑河流域夏季平均风速呈下降趋势,平均每年减小  $0.011$  m/s。流域内仍是上游托勒站有上升趋势, $\beta$  值  $0.008$ ;其余站点均为下降趋势,下游额济纳旗站的风速下降幅度最为明显,其  $\beta$  值为  $-0.033$ 。  
 (3) 秋季风速表现为下降趋势, $\beta$  值为  $-0.007$ 。上游山区为上升趋势,野牛沟站变化趋势不明显,托勒站仍为上升趋势, $\beta$  值为  $0.01$ 。中游平原区,除了酒泉站变化不明显外,其余站点均通过了 95% 的置信度检验,高台站降低最为明显,其  $\beta$  值为  $-0.021$ 。下游平原区呈明显下降趋势,额济纳旗站下降更为明显, $\beta$  值为  $-0.025$ 。  
 (4) 冬季风速平均每年下降  $0.008$  m/s。上游山区风速呈不明显上升趋势,仅托勒站通过了显著性检验, $\beta$  值为  $0.013$ 。中游的高台和山丹两站以及下游的鼎新、额济纳旗都具有明显下降趋势,其余站点下降趋势不明显。下游的额济纳旗站风速降低趋势更加显著, $\beta$  值为  $-0.021$ 。

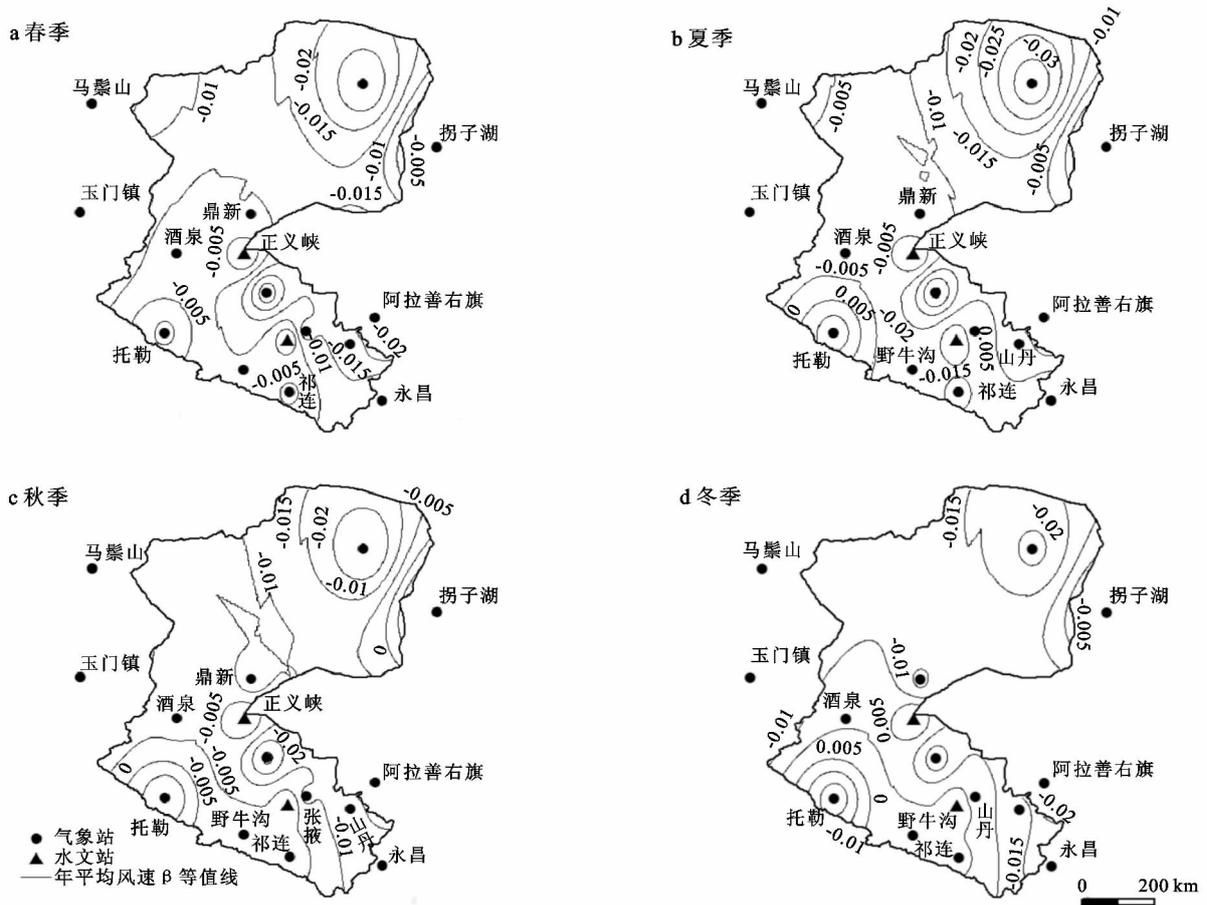


图 4 黑河流域 1960—2009 年各季节平均风速序列  $\beta$  等值线

## 2.2 风速变化的突变分析

图 5—6 为 1960—2009 年黑河流域年和季节平均风速的 Mann—Kendall 突变检验, 给定显著性水平  $\alpha=0.05$ , 临界线  $U=\pm 1.96$ 。

由图 5 可见, UF 和 UB 曲线相交于 1985 年左右, UF 和 UB 相交后 UF 于 1990 年超过负临界值 ( $-1.96$ ), 说明黑河流域平均风速在 1985 年发生了突变, 从 1985 年开始平均风速逐年减小。各季平均风速也发生了明显的突变, 并与全年突变情况基本相同(图 6)。春季在 1986 年左右发生了突变, 并从 1993 年风速开始显著下降; 夏季突变发生在 1984 年, 自 1991 年开始显著下降; 由图 6 可知, UF 与 UB 曲线相交于 1983 年左右, 并且相交后 UF 于 1993 年突破置信度为 0.05 的临界线  $-1.96$ , 因此可以认定

1983 年为秋季风速明显减小的突变点; 冬季近 50 a 来风速突变显著, 突变发生在 1985 年左右, 大约在 1994 年开始风速表现为显著减小的趋势, 这与全年风速突变发生的时间相同。

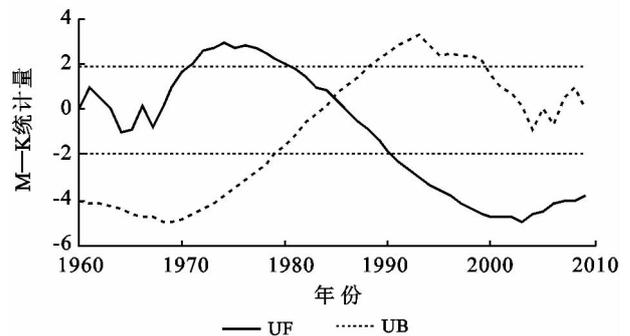


图 5 黑河流域 1960—2009 年年平均风速系列的 Mann—Kendall 趋势变化

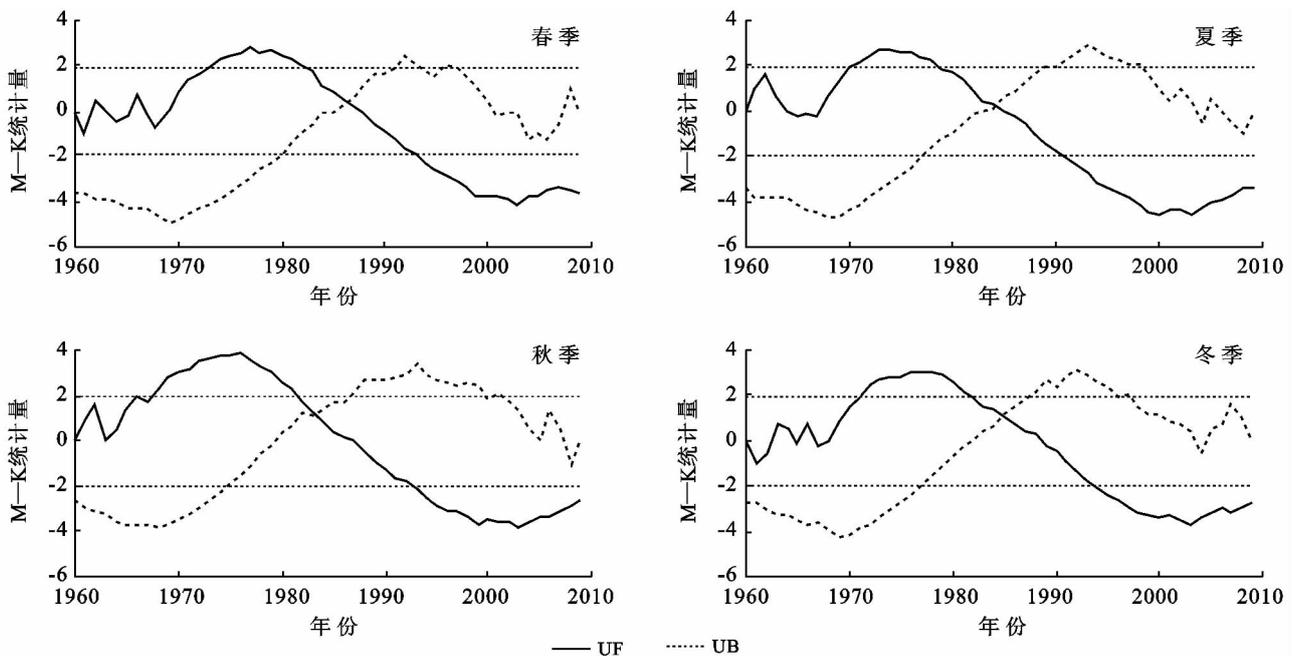


图 6 黑河流域 1960—2009 年季节平均风速的 Mann—Kendall 趋势变化

## 2.3 风速变化与其他气候因子的关系

平均风速的变化与很多因素有关, 气温升高会对风速的减小产生一定的影响, 而在一些地区风速变化是潜在蒸散减小的主导因素。从表 2 可以看出, 黑河流域年平均风速与平均气温、平均最高气温、平均最低气温呈显著负相关关系, 与潜在蒸散呈显著正相关关系, 而与相对湿度、日照时数相关性不明显。从四季变化可以看出, 平均风速的减弱与潜在蒸发的降低有直接关系。春季平均气温、平均最低气温以及潜在蒸散均通过了 0.01 的显著性检验, 平均最高气温通过了 0.05 的显著性检验, 而平均风速与相对湿度和日照时数关系不明显, 所以春季风速的减弱是与平均

气温、平均最低/最高气温的上升以及潜在蒸散的降低有关; 同理, 夏季和秋季风速的减弱与平均气温、平均最低气温的上升以及潜在蒸散的降低有关; 而冬季仅有潜在蒸散通过了 0.01 的显著性检验, 其余要素均未通过, 说明冬季平均风速的减弱是造成黑河流域潜在蒸散降低主导因素。

## 3 结果讨论

本研究主要采用趋势分析, M—K 检验及空间插值法对黑河流域 1960—2009 年风速变化特征进行分析, 并结合平均气温、平均最高/最低气温、相对湿度、日照时数及潜在蒸散资料, 发现黑河流域 1960—

2009 年平均风速总体呈现下降趋势,这一研究结果与全国风速<sup>[5]</sup>及西北地区风速<sup>[13]</sup>变化表现为减小趋势的研究结果一致,而在全球气候变暖的大背景下,大气环流的变化是引起风速减小的主要原因<sup>[19]</sup>,而寒潮、沙尘暴等极端事件的出现也可能是造成风速减小的原因,东亚冬季风的减弱会造成中国寒潮发生频率也减小,使得大风日数减小,从而引起近地面风速降低<sup>[5]</sup>;

在下垫面状况不变或变化不大的情况下,大风天气的减小会引起沙尘暴次数减少,进而使得风速减小<sup>[20]</sup>。

随着人口逐渐增多,人居环境发生变化,城市化进程也不断加快,处于城中心的气象站观测记录在一定程度上也会受到城市化因素的影响<sup>[21]</sup>;而台站环境变化,如台站迁移、仪器高度变化以及台站微观环境变化也是造成风速减小不可忽视的因子<sup>[22]</sup>。

表 2 黑河流域 1960—2009 年平均风速与各要素的相关系数

项目	平均气温	平均最高气温	平均最低气温	相对湿度	日照	潜在蒸散
全年	-0.439**	-0.394**	-0.410**	-0.105	0.022	0.575**
春季	-0.454**	-0.301*	-0.484**	-0.203	0.063	0.522**
夏季	-0.345*	-0.258	-0.404**	-0.122	-0.035	0.397**
秋季	-0.340*	-0.269	-0.314*	-0.145	0.123	0.430**
冬季	-0.201	-0.219	0.154	0.119	-0.147	0.396**

注: \* 表示通过了 0.05 置信度检验, \*\* 表示通过了 0.01 置信度检验。

另外,受局部地形差异影响,在时间和空间上风速会出现较大的波动,个别站点表现为上升趋势,如上游托勒站,其  $\beta$  值介于 0.001~0.013;下游因海拔较低,使得风速下降趋势明显。研究发现风速下降是流域潜在蒸散减小的主导因素,黄河流域有类似的研究<sup>[23]</sup>,可见搞清楚风速变化的原因对指导农事有极其重要的作用。由于数据来源有限,本研究仅对流域内平均风速的时空变化特征进行分析,然而大风、大风日数、瞬时大风事件、干热风及沙尘暴的研究更有意义。受气候变化、天气系统、局地地形和下垫面性质的影响,河西地区大风日数在空间上呈西多东少分布<sup>[24]</sup>。同时,大风会诱发沙尘暴天气的出现,对河西走廊沙尘暴及其影响因子研究发现黑河流域未来沙尘暴呈波动变化趋势,且大风的时间变化可以决定沙尘暴随时间的变化<sup>[25]</sup>。因此,在生态环境极度脆弱的黑河流域,风速变化对农业生产的影响研究,风能的开发利用以及风速与遥感的结合研究,并由此引起的干热风、大风、沙尘暴等极端自然灾害等方面的分析,将是该流域下一步需要重点研究的问题。

## 4 结论

(1) 黑河流域近 50 a 来平均风速呈减小趋势。年代际变化在 20 世纪 60—70 年代为正距平,80 年代以来为负距平。年内变化表现为偏双峰型,第一峰值远大于第二峰值,分别出现在 4 和 11 月。

(2) 空间分布上,上游山区年平均风速呈微弱上升趋势,平均每年增加 0.01 m/s;中游和下游均表现为下降趋势,降幅在 0.005~0.029 m/s,同时在不同季节空间差异明显。

(3) M—K 检验得到黑河流域年平均风速在 1985 年左右发生了明显的突变,四季突变情况与全年基本相同。春季、夏季、秋季的突变时间分别为 1986, 1984 和 1983 年左右,而冬季突变时间为 1985 年左右,与全年的突变时间相同。

(4) 年、春季风速的减弱是与平均气温、平均最低/最高气温的上升以及潜在蒸散的降低有关,夏、秋季平均最高气温的影响变小,而冬季仅有潜在蒸散通过了 0.01 的显著性检验,说明风速下降是造成黑河流域冬季潜在蒸散减小的主导因素。

### [参 考 文 献]

- [1] McVicar T R, Van Niel T G, Li L T, et al. Donohue. Wind speed climatology and trends for Australia, 1975—2006: Capturing the stilling phenomenon and comparison with near-surface reanalysis output[J]. *Gophysical Research Letters*, 2008, 35(20):1-6.
- [2] 侯建朝,谭忠富,谢品杰,等.世界风能资源开发现状和政策分析及对我国的启示[J]. *中国电力*, 2008, 41(9): 65-68.
- [3] 程兴宏,朱蓉,何晓凤,等.基于 GIS 技术的陆上风能资源开发制约因素分析:以甘肃省酒泉风电基地为例[J]. *资源科学*, 2010, 32(7):1272-1279.
- [4] 刘苏峡.气候变化研究更应注重风速变化[EB/OL]. [2008-11-13](2009-04-09). <http://www.sciencenet.cn/htmlpaper/200811131050494854073.html>.
- [5] 王遵娅,丁一汇,何金海,等.近 50 年来中国气候变化特征的再分析[J]. *气象学报*, 2004, 62(2):228-236.
- [6] 任国玉,郭军,徐铭志,等.近 50 年中国地面气候变化基本特征[J]. *气象学报*, 2005, 63(6):942-956.

(下转第 252 页)

系,相关系数为 0.95。由于受到植物根系等因素的影响,前期含水率和细颗粒含量对林地、草地、耕地的入渗率影响不明显,而对滑坡体、泥石流堆积体、裸地等土体的稳定入渗率有显著影响。影响林地、草地、耕地等土体的稳定入渗率的因素除了与土体的物理性质有关外,还与土体的有机质含量和根系有关,且根系影响明显大于细颗粒的影响,从而导致根系发育土体内的细颗粒含量对土体入渗影响不大。此外,土体表面结皮显著降低研究区土体的入渗。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 崔鹏,庄建琦,陈兴长,等. 汶川地震区震后泥石流活动特征与防治对策[J]. 四川大学学报:工程科学版,2010,42(5):10-19.
- [2] 许强. 汶川大地震诱发地质灾害主要类型与特征研究[J]. 地质灾害与环境,2009,20(2):86-93.
- [3] 唐川,梁京涛. 汶川震区北川 9·24 暴雨泥石流特征研究[J]. 工程地质学报,2008,16(6):751-758.
- [4] 熊立华,郭生炼. 分布式流域水文模型[M]. 北京:中国水利水电出版社,2004.
- [5] 吴钦孝,韩冰,李秧秧. 黄土丘陵区小流域土壤水分入渗特征研究[J]. 中国水土保持科学,2004,2(2):1-5.
- [6] 陈洪松,邵明安,张兴昌,等. 野外模拟降雨条件下坡面降雨入渗,产流试验研究[J]. 水土保持学报,2005,19(2):5-8.
- [7] 余斌,马煜,张健楠,等. 汶川地震后四川省都江堰市龙池镇群发泥石流灾害[J]. 山地学报,2011,29(6):738-746.
- [8] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京:中国水利水电出版社,2004.
- [9] 吕刚,吴祥云. 土壤入渗特性影响因素研究综述[J]. 中国农学通报,2008,24(7):494-499.
- [10] 郑纪勇,邵明安,张兴昌. 黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征[J]. 水土保持学报,2004,18(3):53-56.
- [11] 田积莹,黄义端,雍绍平. 增加土壤渗透,减少水土流失[J]. 水土保持通报,1988,8(3):25-30.
- [12] 张保华,何毓容,周红艺,等. 长江上游亚高山针叶林土壤水分入渗性能及影响因素[J]. 四川林业科技,2003,24(1):61-64.
- [13] 邵明安,王全九. 土壤物理学[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [14] 王国梁,刘国彬,周生路. 黄土丘陵沟壑区小流域植被恢复对土壤稳定入渗的影响[J]. 自然资源学报,2003,18(5):529-534.
- [15] 闫东锋,杨喜田. 豫南山区典型林地土壤入渗特征及影响因素分析[J]. 中国水土保持科学,2011,9(6):43-50.
- [16] Moore I. Effect of surface sealing on infiltration[J]. Trans. ASAE,1981,24(6):1546-1561.
- (上接第 247 页)
- [7] 李艳,王元,汤剑平. 中国近地层风能资源的时空变化特征[J]. 南京大学学报:自然科学版,2007,43(3):280-290.
- [8] 江滢,罗勇,赵宗慈. 近 50 年我国风向变化特征[J]. 应用气象学报,2008,19(6):666-672.
- [9] 荣艳淑,梁嘉颖. 华北地区风速变化的分析[J]. 气象科学,2008,28(6):655-658.
- [10] 刘苏峡,邱建秀,莫兴国. 华北平原 1951 年至 2006 年风速变化特征分析[J]. 资源科学,2009,31(9):1486-1492.
- [11] 李艳,耿丹,董新宁,等. 1961—2007 年重庆风速的气候变化特征[J]. 大气科学学报,2010,33(3):336-340.
- [12] 王毅荣,张存杰. 河西走廊风速变化及风能资源研究[J]. 高原气象,2006,25(6):1196-1202.
- [13] 黄小燕,张明军,王圣杰,等. 西北地区近 50 年日照时数和风速变化特征[J]. 自然资源学报,2011,26(5):825-835.
- [14] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements[C]. Rome: Food & Agriculture Org., 1998.
- [15] 康淑媛,张勃,郭玉刚,等. 1959 年至 2008 年石羊河流域日照时数时空变化特征[J]. 资源科学,2011,33(3):483-488.
- [16] 符淙斌,王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学,1992,16(4):482-493.
- [17] 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[J]. 中国人口·资源与环境,2005,15(2):57-60.
- [18] 王存忠,牛生杰,王兰宁. 中国 50 a 来沙尘暴变化特征[J]. 中国沙漠,2010,30(4):933-939.
- [19] 江滢,罗勇,赵宗慈,等. 近 50 年中国风速变化及原因分析[C]//中国气象学会. 2007 年中国气象学会年会论文集,2007:80-89.
- [20] 李耀辉,张存杰,高学杰. 西北地区大风日数的时空分布特征[J]. 中国沙漠,2004,24(6):715-723.
- [21] 刘学锋,江滢,任国玉,等. 河北城市化和观测环境改变对地面风速观测资料序列的影响[J]. 高原气象,2009,28(2):433-439.
- [22] 吴增祥. 气象台站历史沿革信息及其对观测资料序列均一性影响的初步分析[J]. 应用气象学报,2005,16(4):461-467.
- [23] 马雪宁,张明军,王圣杰,等. “蒸发悖论”在黄河流域的探讨[J]. 地理学报,2012,67(5):645-656.
- [24] 姚正毅,王涛,陈广庭,等. 近 40 a 甘肃河西地区大风日数时空分布特征[J]. 中国沙漠,2006,26(1):65-70.
- [25] 孙然好,刘清丽,陈利顶,等. 河西走廊沙尘暴及其影响因子的多尺度研究[J]. 中国沙漠,2010,30(3):648-653.