

1960—2011 年河西走廊地表干湿状况的 时空变化及影响因素

刘扬¹, 杨永春^{1,2}, 张轲³, 孙彦猛³

(1. 兰州大学 资源环境学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州大学 西部环境教育部
重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 兰州大学 信息科学与工程学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: [目的] 为了探讨河西走廊地区地表干湿状况对气候变化的响应。[方法] 利用河西走廊地区 14 个气象站 1960—2011 年逐日气象数据, 基于 FAO 推荐的 Penman—Monteith 模型计算河西走廊各气象站的参考蒸散量和湿润指数, 采用 Sen's 斜率和 Mann—Kendall 趋势检验方法, 分析河西地区地表干湿的时空变化特征, 探讨影响湿润指数变化的主导因子。[结果] 河西走廊地表多年平均干湿指数为 0.00~0.56, 且 52 a 来河西走廊湿润指数整体呈增加趋势; 湿润指数的变化具有明显地域性差异。各季节湿润指数亦整体呈增加趋势, 以冬季增幅最大, 秋、春次之, 而夏季变化最小。[结论] 河西走廊地区气候属于干旱, 52 a 来湿润指数略有增大, 其主要原因是降水的增加和风速的减小。

关键词: 参考蒸散发; 湿润指数; Mann—Kendall 趋势检验; Sen's 斜率; 河西走廊

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)01-0054-07

中图分类号: P426.2

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.01.011

Temporal and Spatial Variation of Humidity and Its Influential Factors in Hexi Corridor During 1960—2011

LIU Yang¹, YANG Yongchun^{1,2}, ZHANG Ke³, SUN Yanmeng³

(1. College of Earth and Environmental Science, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China;

2. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu

730000, China; 3. College of Information Science & Engineering, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: [Objective] To explore the response of land surface humidity to the regional climate change in Hexi Corridor. [Methods] The daily meteorological data from 14 stations during the period from 1960 to 2011 were used to calculate the referential evapotranspiration and humid index for each site based on the Penman—Monteith model. The Sen's slope and Mann—Kendall trend test were used to analyze the temporal and spatial variation of humidity and its influential factors in the study area. [Results] The humid index of Hexi Corridor was around 0.00~0.56, and the humid index increased during the past 52 years. The humidity conditions showed a spatial variation due to the differences in climate and terrain. The seasonal humid index showed an increasing trend as a whole, with the greatest increases in winter, while smallest changes in summer. [Conclusion] Hexi Corridor is subject to arid climate, while the humid index increased slightly in the past 52 years due to the increase in precipitation and decrease in wind speed.

Keywords: reference evapotranspiration; humid index; Mann—Kendall trend test; Sen's slope; Hexi Corridor

在全球变暖背景下, 环境状况与区域差异是研究全球变化的区域响应、土地沙漠化、土地覆被变化等环境变动的基础^[1], 气候因子间的相互作用与制约产生了陆地表面的干湿状况。湿润指数可客观反映地

表水热收支状况, 是衡量区域干湿程度的重要指标, 一般而言, 区域的干湿状况可由蒸发与降水之关系决定^[2-3]。近年来, 在中国西北地区、青藏高原等一些区域针对地表蒸散及干湿状况及变化规律开展了广泛

收稿日期: 2013-12-06

修回日期: 2014-01-10

资助项目: 国家自然科学基金项目“制度非均衡供给与后进转型: 渐进制度改革背景下的中国西部城市生长转型的格局、模式与动力机制”(41171143)

第一作者: 刘扬(1987—), 女(汉族), 河北省衡水市人, 博士研究生, 研究方向为城市环境对气候变化的响应。E-mail: tifiyang@gmail.com。

通信作者: 杨永春(1969—), 男(汉族), 陕西省白水县人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事城市与区域发展研究。E-mail: yangych@lzu.edu.cn。

研究^[4-9],西北干旱半干旱区近 50 a 实测记录显示气候环境出现了 0.2 °C/10 a 的趋势升温^[4,8,10-11],降水显著增加,冰川消融加速,河川径流增加,植被有所改善等现象^[12]。河西走廊作为内陆干旱化研究的气候变化极度敏感区和生态脆弱区,气温和降水增幅表现出明显的空间差异^[8,13],水资源受气候变化影响而面临诸多问题。本文利用河西走廊地区主要气象站资料,结合彭曼模型计算区域尺度的参考蒸散量和湿润指数,探讨河西走廊地表干湿变化的程度及时空分布特征,为河川径流变化研究、绿洲农业结构调整等提供科学依据,尤其是为水资源的生态脆弱性评价提供科学的气候变化背景,同时对揭示西北地区由暖干向暖湿转型的气候科学集成研究有重要的现实价值。

1 数据资料与模型

1.1 资料选取

选取河西走廊的敦煌、安西、玉门镇、梧桐沟、酒泉、金塔、鼎新、高台、张掖、山丹、永昌、民勤、武威和乌鞘岭 14 个气象站的 1960—2011 年(其中梧桐沟站的数据为 1966—1988 年;金塔站的数据为 1989—2011 年)逐日平均气温、最高气温、最低气温、平均相对湿度、平均风速和日照时数等气象观测数据,部分缺测数据由邻近站点数据按差值订正法进行插补,按照(FAO)Penman—Monteith 模型在 Matlab 平台编程计算各气象站的逐日参考作物蒸散量,并基于降水数据计算月湿润指数,进而统计逐季(3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12—次年 2 月为冬季)和逐年地表湿润指数的时间序列。

1.2 参考蒸散与湿润指数的计算

本文首先采用 Penman—Monteith 模型^[14],计算参考作物蒸散发 ET_0 :

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

式中: ET_0 ——参考蒸散量(mm/d); Δ ——饱和水汽压温度曲线斜率(kPa/°C); G ——地表以下的土壤热通量[MJ/(m²·d)]; γ ——干湿常数(kPa/°C); U_2 ——2 m 高处的风速(m/s); e_s, e_a ——为饱和水汽压和实际水汽压(kPa); R_n ——净辐射[MJ/(m²·d)],由净短波辐射 R_{ns} 与净长波辐射 R_{nl} 之差得出,即:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (2)$$

Yin 等^[15]利用中国 81 个气象站的逐月辐射观测数据建立了适用于中国净短波辐射经验公式,即:

$$R_{ns} = (1 - \alpha)(0.2 + 0.79(\frac{n}{N}))R_0 \quad (3)$$

$$R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{\max,k}^4 + T_{\min,k}^4}{2} \right) (0.56 - 0.25 \sqrt{e_a}) (0.1 + 0.9(\frac{n}{N})) \quad (4)$$

式中: α ——地表反照率;FAO 推荐取 0.23^[14], T_{\max} , T_{\min} ——日最高气温和最低气温(K); σ ——Stefan—Boltzman 常数[4.903 × 10⁻⁹ MJ/(K⁴ m²·d)]; R_0 ——晴空太阳辐射(MJ/d); n ——日照时数(h); N ——可照时数(h)。

本文中计算 ET。以日尺度计算,然后累加获得月尺度的 ET₀。就湿润指数而言,定义月湿润指数 W 为月降水量 P 与月参考蒸散 ET_0 之比,即:

$$W = \frac{P}{ET_0} \quad (5)$$

式中: W ——月地表湿润指数; P ——月降水量(mm); ET_0 ——月参考蒸散量(mm)。

1.3 Sen's 斜率及 M-K 趋势检验

采用 Sen's 斜率、10 a 滑动平均,并结合非参数 Mann—Kendall 统计(简称 M—K)趋势检验法^[16]量化湿润指数的年、季变化率及变化程度,并通过 ArcGIS 的 IDW 插值得到湿润指数变化趋势的空间分布,从而进行地表干湿状况时间序列的空间差异分析。

Sen's 斜率是一种非参数趋势斜率计算方法,不受序列奇异值的影响,能很好的反应序列趋势的变化程度,而滑动平均可在一定程度上消除序列频繁随机起伏的影响,使水文变化的趋势性或阶段性更直观、明显,Sen's 斜率 K 的公式如下^[17]:

$$K = \text{median}(Q_j) \quad (6)$$

$$Q_j = \frac{x_j - x_k}{j - k} \quad (7)$$

式中: i ——常数取值为(1,2,⋯, N), N ——时间序列长度; x_j 和 x_k 则分别是 j 和 k 的序列之,且满足 $j > k$ 。

M—K 法^[17]是用来评估水文气候要素时间序列趋势的非参数检验方法,可以检验时间序列变化趋势的显著性,以适用范围广,人为性少,定量化程度高而著称,其检验统计量公式为:

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(X_i - X_j) \quad (8)$$

式中: $\text{sign}()$ ——符号函数, $X_i - X_j$ 小于、等于或者大于 0 时, $\text{sign}(X_i - X_j)$ 分别为 -1,0 和 1。就 S 而言:

$$Z = (S - 1) / \sqrt{n(n-1)(2n+5)/18} \quad (S > 0) \quad (9)$$

$$Z = 0 \quad (S = 0) \quad (10)$$

$$Z = (S + 1) / \sqrt{n(n-1)(2n+5)/18} \quad (S < 0) \quad (11)$$

Mann—Kendall 趋势检验的统计量 Z 为正值表示增加趋势,负值表示减少趋势。 Z 的绝对值在

≥1.28, 1.96, 2.32 时, 表明其显著性分别通过了信度 90%, 95% 和 99% 的显著性检验。

2 结果分析

2.1 地表多年平均湿润指数的空间分布

河西走廊地区多年平均湿润指数在 0.00~0.56 (图 1), 地表相对干旱, 其中玉门、安西及敦煌的湿润指数在 0.00~0.05, 为河西地区最为干旱的区域。整体而言, 地表干湿状况总体表现出明显的西北—东南差异, 即湿润指数以敦煌为最低值, 由此向东向南大致呈增加趋势, 乌鞘岭的湿润指数最高, 西北部疏勒河流域(玉门、安西、敦煌)、中部黑河流域(山丹、张掖、高台、酒泉、金塔、鼎新、梧桐沟)、东南部石羊河流域(武威、永昌、民勤、乌鞘岭)的平均湿润指数分别为 0.05, 0.11 及 0.28。

2.2 地表干湿状况的时空变化特征

2.2.1 年均湿润指数的空间变化

整体平均而言, 河西走廊年均湿润指数(14 个气象站均值)呈波状起伏的增大趋势(图 2), 52 a 均值为 0.136, 最高为 0.210 (2007 年), 最低为 0.066 (1962 年), 变化幅度较大, 20 世纪 60, 70 年代湿润指数距平为负距平, 80 年代后为正距平(表 1), 且自 70 年代以来有逐年增大趋势, 尤其是 1987 年以来, 大部分以正距平为主, 表明在 1987 年之前地表相对干旱, 之后有变湿趋势。湿润指数年际变化的 Sen's 斜率 K 为 0.001 2, 变化倾向率为 0.009/10 a, 且气候倾向率为增加趋势, 表明在气温升高和降水量增加的背景下, 河西走廊地表干旱状况有明显缓解。

河西走廊地表湿润指数年际变化趋势(图 3)及其显著性(Mann—Kendall 统计量 Z , 图 4)呈现一定的区域差异, 湿润指数距平在不同年代的变化特征亦存在空间差异(图 5)。河西走廊整体表现为变湿趋势, 年均湿润指数的 Sen's 斜率 K 在 0.000 0~0.005 5, 由西北到东南, 其变湿趋势增大。具体而言, 西北部疏勒河流域呈不明显的变湿趋势, Sen's 斜率 K 在 0.000 0~0.000 8; 中部黑河流域表现为南北差异, 自北向南变湿加强, 除酒泉以北地区变化不明显外, 其他大部分地区呈明显变湿趋势, 以张掖绿洲变湿最为显著; 东南部石羊河流域 Sen's 斜率 K 在 0.000 5~0.005 5, 除民勤以北地区不明显变湿,

其他大部分地区显著变湿, 其中乌鞘岭以南变湿最明显。

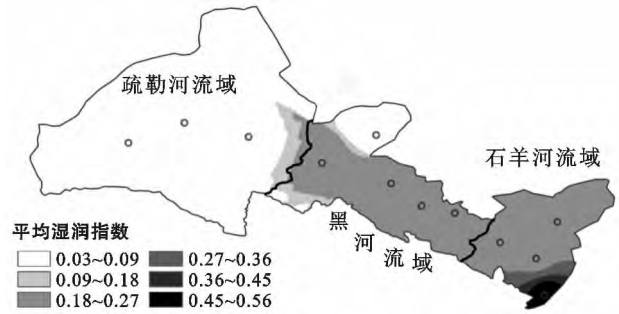


图 1 1960—2011 年河西走廊地表平均湿润指数的空间分布

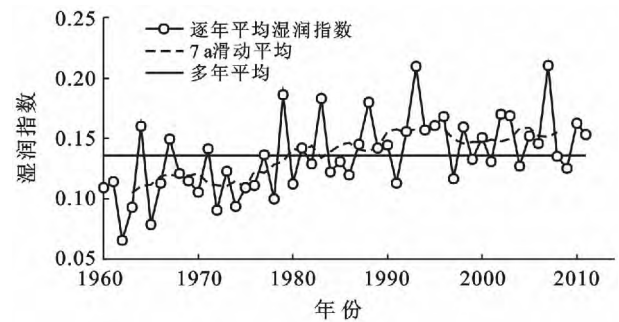


图 2 地表年均湿润指数的年际变化趋势(1960—2011 年)

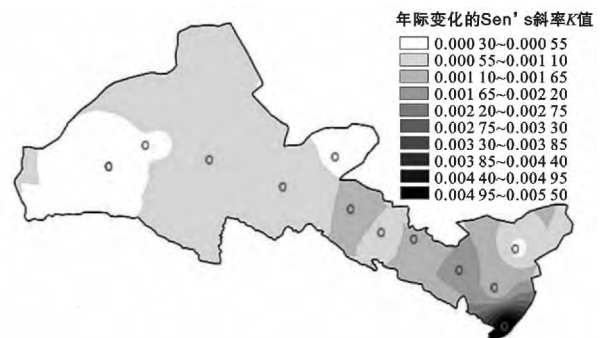


图 3 河西走廊地表年均湿润指数年际变化趋势的空间分布

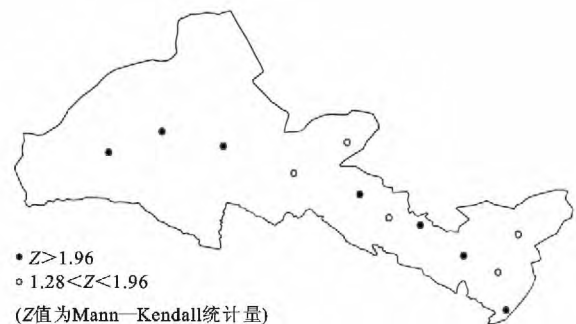


图 4 河西走廊地表年均湿润指数年际变化 Mann—Kendall 趋势检验的空间分布(1960—2011 年)

表 1 河西走廊地表年均湿润指数的年代际距平(1960—2011 年)

指标	1960s	1970s	1980s	1990s	2000—2011 年
年代平均湿润指数	0.112	0.119	0.141	0.152	0.153
年代湿润指数距平	-0.024	-0.016	0.005	0.016	0.017

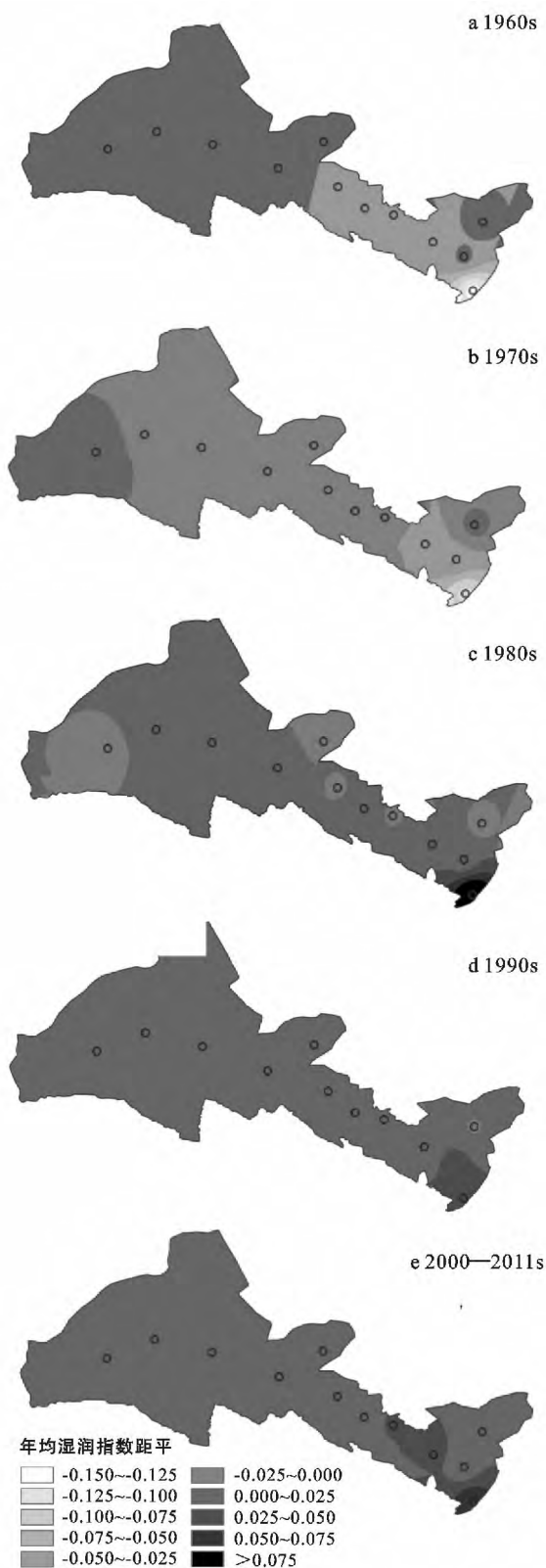


图 5 地表年均湿润指数距平的空间分布

2.2.2 季均湿润指数的空间变化 就季节而言(图 6),河西走廊春、夏、秋、冬 4 季多年平均湿润指数分别为 0.087,0.224,0.182 和 0.066,表明河西走廊整体以夏季最湿,秋季次之,春冬最小。季均湿润指数年际变化的 Sen's 斜率 K 分别为 0.001 5,0.000 4,

0.002 5和 0.002 8,暗示 4 个季节湿润指数均呈上升趋势,其中冬季增大幅度最大,秋季和春季增大趋势明显,但夏季增大趋势不太明显。春、冬季均湿润指数年代距平变化与年均湿润指数的变化趋势一致(表 2),即湿润指数都在 60,70 年代为负距平,80 年代以来为正距平,特别是 2000 年以后地表较大程度地变湿。夏季,湿润指数在 80 年代初之前呈波状缓慢增大趋势,之后出现 1983,1993 年 2 个极大值点及 1991,2001 和 2010 年 3 个极小值点,且正负距平交替出现,表明这一时段内湿润指数波动起伏但整体平缓增加。秋季,湿润指数呈波状起伏变化,在 80 年代中期之前呈波状缓慢下降趋势,之后波状上升趋势明显,正负距平波动变化较大。

表 2 河西走廊地表季均湿润指数的年代际距平

季均湿润指数/10 a	1960s	1970s	1980s	1990s	2000—2011 年
春季	-0.022	-0.045	0.018	0.025	0.041
夏季	-0.032	0.009	0.024	0.018	-0.016
秋季	-0.043	-0.008	-0.027	-0.025	0.086
冬季	-0.066	-0.066	0.023	0.031	0.065

河西走廊各季节湿润指数的变化趋势(Sen's 斜率 K ,图 7)及其显著性存在空间差异。春季,地表干湿状况由西北到东南变湿趋势增加,西北部疏勒河流域的 Sen's 斜率 K 在 0.000 4~0.001 0,中部黑河流域除鼎新以北地区、张掖气象站点周围地区呈不明显的变湿趋势外,其他大部分地区也显著变湿,Sen's 斜率 K 在 0.000 1~0.001 6,东南部石羊河流域季均湿润指数年际变化的 Sen's 斜率 K 在 0.000 5~0.007 0,除民勤以北地区不明显变湿,其他大部分地区显著变湿,其中乌鞘岭以南变湿最明显;夏季,平原地区除永昌气象站点周围地区呈明显的变湿趋势外,绝大部分地区均呈不显著的变湿趋势,Sen's 斜率 K 在 0.000 0~0.000 6;秋季的变化趋势空间分布与春季类似,西北部疏勒河流域得 Sen's 斜率 K 在 0.000 3~0.000 8,中部黑河流域除山丹气象站点周围地区呈明显的变湿趋势外,其他绝大部分地区均呈不明显变湿趋势,Sen's 斜率 K 在 0.000 3~0.003 0,东南部石羊河流域季均湿润指数年际变化的 Sen's 斜率 K 在 0.000 9~0.010 0,大部分地区呈不明显变湿,但乌鞘岭以南变湿最明显;冬季,中部的黑河中游的变湿趋势最明显,Sen's 斜率 K 在 0.000 5~0.004 5;除此之外,在西部的疏勒河流域也有明显的变湿趋势。

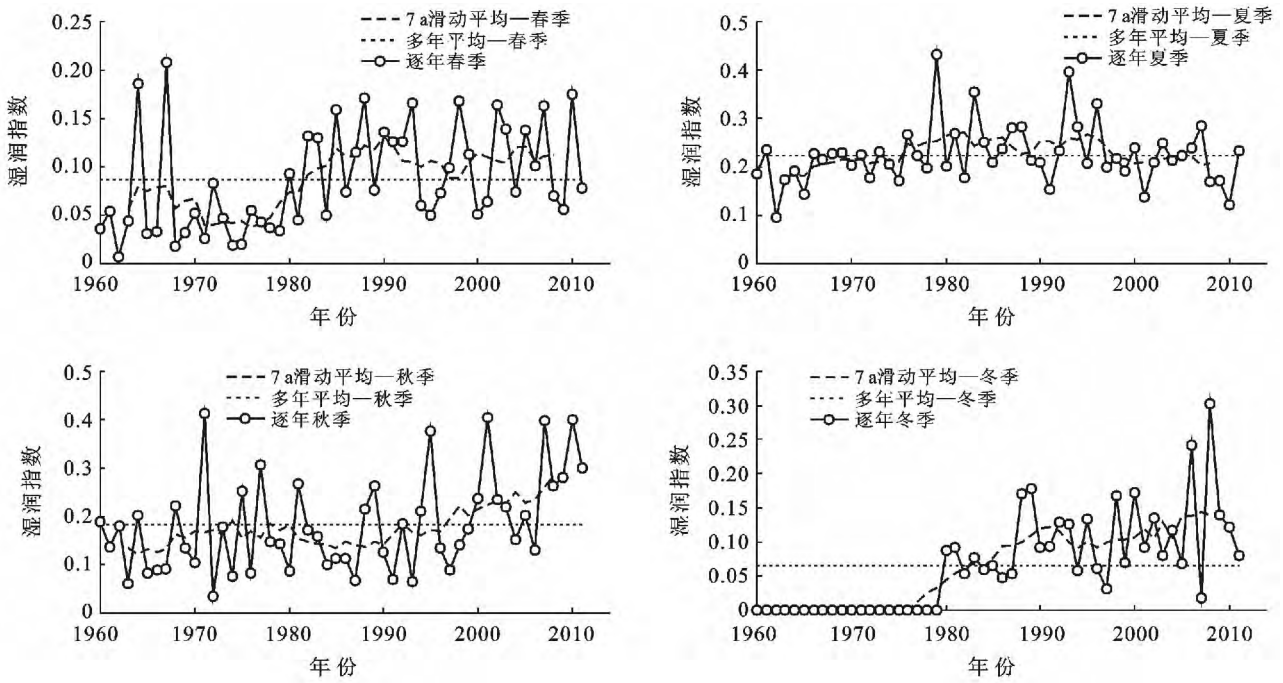


图 6 1960—2011 年地表季均湿润指数的年际变化趋势

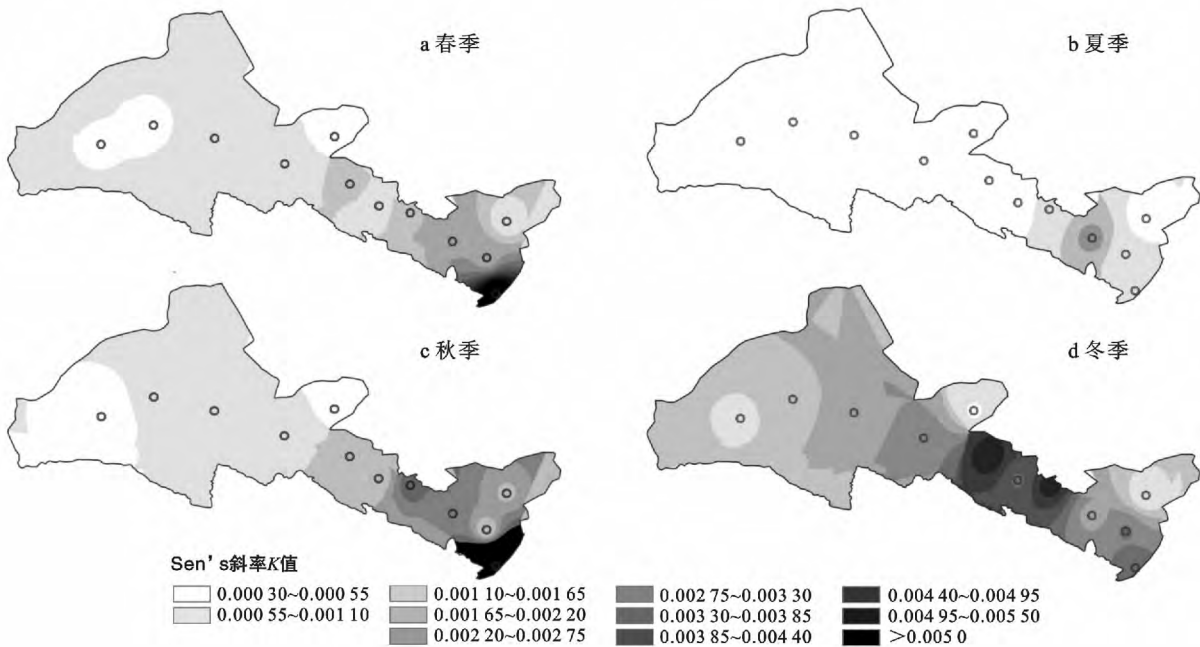


图 7 1960—2011 年河西走廊地表季均湿润指数年际变化趋势 (Sen's 斜率 K) 的空间分布

2.3 湿润指数变化的影响因子及相关分析

从湿润指数的定义公式来看,湿润指数的变化在很大程度上取决于降水量和潜在蒸散量的变化速率,而潜在蒸散量又受到各种气象要素综合作用的影响,如气温、风速、日照时数、相对湿度等,为了探讨河西走廊湿润指数增加的原因,除了选取直接相关的降水量以外,还选取了影响蒸发的 6 个气象要素(风速、平均气温、最高气温、最低气温、相对湿度和日照时数),根据公式(7)计算主要气象站湿润指数与各气象要素

的 Pearson 相关系数(表 3)。

就年平均相关系数而言,近 52 a 湿润指数与平均风速、平均气温、平均最高气温、平均最低气温、降水量、平均相对湿度、日照时数的相关系数分别为: -0.24, 0.09, -0.07, 0.22, 0.98, 0.46 以及 -0.21。各站与降水量、相对湿度呈现显著的正相关,西北部疏勒河流域、中部黑河流域和东南部石羊河流域气象站年 W 均与相对湿度相关性很强(分别为 0.44, 0.45, 0.47),表明对于干旱少雨的地区来说,湿润指

数增减与相对湿度的变化息息相关;湿润指数与降水量的空间分布规律非常相似,与降水量的相关系数接近于 1(通过了 0.01 的置信度检验),说明虽然河西走廊降水量少,蒸发强烈,但近 52 a 降水量在研究时段内呈显著增加趋势(降水增率为 3.94 mm/10 a),降

水仍对地表湿度起主导作用。湿润指数与日照时数、平均风速之间存在明显的负相关,表明日照时数和平均风速的减少对湿润指数增加有重要作用,而与气温的相关程度较弱,说明了气温的增高或降低对湿润指数的影响较小。

表 3 河西走廊主要气象站湿润指数的影响因子及相关系数

气象站	$W-U$	$W-T_{\text{mean}}$	$W-T_{\text{max}}$	$W-T_{\text{min}}$	$W-P$	$W-R_h$	$W-n$
鼎新	-0.141	0.119	-0.042	0.270	0.986**	0.274*	-0.293*
敦煌	-0.003	0.126	-0.035	0.234	0.994**	0.412**	-0.101
高台	-0.329*	0.180	0.009	0.334*	0.974**	0.547**	-0.363**
安西	-0.440**	0.091	0.057	0.112	0.982**	0.426**	-0.389**
金塔	0.134	-0.125	-0.386	0.093	0.961**	0.525*	-0.089
酒泉	-0.191	0.065	-0.097	0.225	0.989**	0.603**	-0.261
民勤	-0.232	0.128	-0.114	0.263	0.990**	0.466**	-0.099
山丹	-0.264	0.254	0.021	0.369**	0.985**	0.393**	-0.324*
乌鞘岭	0.154	0.056	-0.101	0.220	0.975**	0.555**	-0.399**
梧桐沟	-0.529*	-0.177	-0.308	-0.023	0.996**	0.307	-0.102
武威	-0.448**	-0.082	-0.208	0.036	0.969**	0.352*	-0.095
永昌	-0.363**	0.198	0.037	0.330*	0.980**	0.519**	0.162
玉门镇	-0.353*	0.283*	0.206	0.347*	0.989**	0.481**	-0.273
张掖	-0.412**	0.149	-0.008	0.265	0.984**	0.533**	-0.337*

注:*,**分别表示通过 0.05,0.01 的置信度检验; U 为年平均风速; T_{mean} 为年平均气温; T_{max} 为年均最高气温; T_{min} 为年均最低气温; P 为年降水量; R_h 为年平均相对湿度; n 为年日照时数。

3 讨论

地表干湿的估算对于区域气候变化研究、水资源评价与合理利用、农业灌溉和水利工程建设均有重要意义。因此,全球及区域尺度的地表干湿特征、机制与模拟一直是生态、水文、气象和农业等领域共同关注的热点问题,贯穿于气候变化、水量平衡、旱涝极端事件、农业灌溉与生态修复等各方面研究。然而,地表干湿又受到多种环境因素和生物因素的控制^[2,18],过程甚是复杂多变,特别在较大空间尺度上,更是难以测量或预测。一般而言,区域尺度的干湿度多利用降水与潜在蒸散发之比进行量度,而潜在蒸散发作为地球系统水循环的重要环节,是热量与水量平衡的关键参数,在生物圈—水圈—大气圈中发挥着不可或缺的作用,与降水共同决定着区域的干湿状况,并直接影响着全球与区域尺度的水量平衡和气候变化^[1]。事实上,潜在蒸发的估算方法众多,例如常用的 Priestley—Taylor 法^[19]等,而本文利用的 P—M 方法系联合国粮农组织推荐的方法^[14],具有较好的可信度^[18]。在全球变暖的背景下,中国变湿地区面积大于变干地区面积,但是干旱化进程大于湿润化进程。近十几年来西北大部分地区气候环境悄然发生了重大变化,出现了气温持续上升、降水显著增加、冰川消融

加速、河川径流增加、湖泊水位上升、面积扩大、洪涝灾害频发、植被有所改善等现象^[12],而河西地区又是甘肃省农业发展的核心区域,其气候变化对地表干湿的影响研究更为重要。2003 年施雅风等^[12]提出了西北地区从“暖干”即将转型为“暖湿”的观点,引起了学术界的广泛关注。基于此,作者利用降水与蒸散发之比,推出河西地区地表整体上有变湿趋势,这与前人的研究结果较为一致^[6,9]。而马柱国等^[20]利用 Palmer 干旱指数推出西北西部地表为变湿趋势、西北地区东部表现为变干趋势的结论;这可能是由于其计算方法与本文的方法略有差异所导致。与此同时,本文基于相关分析表明,河西地区的湿润指数增大主要是由于降水的增大和风速的减小所致。曹雯等^[21]通过敏感性分析表明,风速对西北地区蒸散发的变化贡献最大,河西走廊^[9]、天山^[10]等地的研究结果亦支持这一结论,即风速的减小是导致蒸散发减小的主要原因,本文研究发现,研究区风速主要呈现减小趋势,故导致了河西地区的蒸散发减小,这就使得区域内的水分支出部分减小,同时降水的略微增大,综合使得地表湿润指数增大。

4 结论

(1) 河西走廊地表多年平均干湿指数为 0.00~

0.56, 皆较为干旱, 区内呈现从西北—东南逐渐增大的趋势, 即疏勒河流域湿润指数最小, 石羊河流域最大。就季节而言, 河西走廊湿润指数以夏季最大, 秋季次之, 春冬最小。

(2) 整体而言, 1960—2011 年, 河西走廊年均湿润指数以 0.009/10 a 的速率呈现出增大趋势。具体而言, 湿润指数的增大主要发生在走廊东部的石羊河流域和中部的黑河流域的南部, 而走廊西部的疏勒河流域之湿润指数没有显著变化。

(3) 1960—2011 年, 各季节湿润指数亦皆表现出增大趋势, 其中以冬季增大幅度最大, 而夏季的增大幅度最小。具体而言, 春季、秋季湿润指数变化速率的空间分布与年湿润指数变化的空间分布相似。而夏季除永昌外, 其余地区变湿趋势不甚明显; 冬季则以黑河中游的变湿趋势最大, 并且疏勒河流域亦有明显变湿。

(4) 尽管研究时段内气温明显升高, 然降水的增多和风速的减小是导致研究区内湿润指数增大的主要原因。

[参 考 文 献]

- [1] 吴绍洪, 尹云鹤, 郑度, 等. 近 30 a 中国陆地表层干湿状况研究[J]. 中国科学: D 辑, 2005, 35(3): 276-283.
- [2] Ma Ning, Wang Naiang, Zhao Liqiang, et al. Observation of mega-dune evaporation after various rain events in the hinterland of Badain Jaran desert [J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(2): 162-170.
- [3] 郭燕红, 张寅生, 马颖钊, 等. 藏北羌塘高原双湖地表热源强度及地表水热平衡[J]. 地理学报, 2014, 69(7): 983-992.
- [4] 马宁, 王乃昂, 朱金峰, 等. 巴丹吉林沙漠周边地区近 50 a 来气候变化[J]. 中国沙漠, 2011, 31(6): 1541-1547.
- [5] 马宁, 王乃昂, 王鹏龙, 等. 黑河流域参考蒸散的时空变化特征及影响因素的定量分析[J]. 自然资源学报, 2012, 27(6): 975-989.
- [6] 黄小燕, 张明军. 中国西北地区地表干湿变化及影响因素[J]. 水科学进展, 2011, 22(2): 151-159.
- [7] 王乃昂, 马宁, 陈红宝, 等. 巴丹吉林沙漠腹地降水特征初步分析[J]. 水科学进展, 2013, 24(2): 153-160.
- [8] 马宁, 王乃昂, 李卓仑, 等. 1960—2009 年巴丹吉林沙漠南北缘气候变化分析[J]. 干旱区研究, 2011, 28(2): 242-250.
- [9] 贾文雄, 何元庆, 李宗省, 等. 祁连山及河西走廊地表干湿变化的时空分布[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2010, 35(2): 268-276.
- [10] 张明军, 李瑞雪, 贾文雄, 等. 中国天山山区潜在蒸发量的时空变化[J]. 地理学报, 2009, 64(7): 798-806.
- [11] 秦大河, 丁一汇, 王绍武, 等. 中国西部生态环境变化与对策建议[J]. 地球科学进展, 2002, 17(3): 314-319.
- [12] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152-164.
- [13] 贾文雄, 何元庆, 李宗省, 等. 祁连山及河西走廊气候变化的时空分布特征[J]. 中国沙漠, 2008, 28(6): 1151-1155.
- [14] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements [M]. Rome: United Nations Food and Agriculture Organization, 1998.
- [15] Yin Yunhe, Wu Shaohong, Zheng Du, et al, Radiation calibration of FAO56 Penman—Monteith model to estimate reference crop evapotranspiration in China [J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(1): 77-84.
- [16] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [17] 易湘生, 尹衍雨, 李国胜, 等. 青海三江源地区近 52 a 来的气温变化[J]. 地理学报, 2011, 66(11): 1451-1465.
- [18] 刘绍民, 孙中平, 李小文, 等. 蒸散量测定与估算方法的对比研究[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 161-167.
- [19] Priestley C H B, Taylor R J. On the assessment of the surface heat flux and evaporation using large-scale parameters[J]. Monthly Weather Review, 1979, 100(2): 81-92.
- [20] 马柱国, 符淙斌. 1951—2004 年中国北方干旱化的基本事实[J]. 科学通报, 2006, 51(20): 2429-2439.
- [21] 曹雯, 申双和, 段春峰. 西北地区生长季参考作物蒸散变化成因的定量分析[J]. 地理学报, 2011, 66(3): 407-415.