

文章编号: 1000-0240(2010)06-1226-08

# 黄河源区地表湿润指数及与气象因素的敏感性分析

侯文菊<sup>1</sup>, 李英年<sup>2</sup>

(1. 青海省气象局 果洛州气象台, 青海 果洛 814000; 2. 中国科学院 西北高原生物研究所, 青海 西宁 810001)

**摘 要:** 应用 Penmar Monteith 模型计算了黄河源区地表潜在蒸散, 分析了区域 1961–2009 年 49 a 来地表湿润指数的变化特征和趋势, 并进行影响地表湿润指数的气象因素敏感性分析. 结果表明: 49 a 来黄河源区年地表湿润指数呈减小趋势, 其中 20 世纪 60 年代相对湿冷, 70 年代半湿冷, 80 年代为弱暖湿型, 90 年代暖干化明显. 但进入 21 世纪初, 特别是 2003 年以来, 黄河源区降水增多, 湿润指数上升, 表现为暖湿型的气候特征. 不同季节湿润指数变化略有不同, 比较而言, 49 a 来地表湿润指数在冬春季呈增加趋势, 夏秋季呈减小. 湿润指数对降水量、日照时数和相对湿度的响应最为敏感.

**关键词:** 黄河源区; 地表湿润指数; 气候变化; 敏感性分析

中图分类号: P426.2 文献标识码: A

## 0 引言

近百年来, 全球气温有明显的上升趋势. IPCC 第四次评估报告中指出<sup>[1]</sup>, 近 100 a(1906–2005 年)全球平均地表温度上升了 0.74 °C, 1850 年以来最暖的 12 个年份有 11 a 出现在近期的 1995–2006 年, 过去 50 a 升温率几乎是过去 100 a 的 2 倍. 因此, 研究者在地域分异和全球变化的研究过程中, 对陆地表层干湿状况给予了极大的关注, 并对中国的干湿状况进行过研究探讨<sup>[2–14]</sup>, 发现不同地区其干湿状况随年际进程变化略有差异: 如 1971–2000 年中国大部分地区最大可能蒸散近 30 a 来呈减少趋势<sup>[2]</sup>, 以西北、青藏高原、西南、华中中部和东北南部地区减少趋势显著, 仅东北、华北和沿海局部地区略有增加; 干湿指数变化趋势具有显著的区域性, 华北、柴达木盆地和华南沿海地区略有增加, 新疆北部部分地区和藏东川西滇北地区增加趋势显著, 其他地区有所降低; 从地域来看, 100°E 以东地区, 半干旱区和半湿润区的分界线在波动中向东向南扩展, 半干旱区面积扩大, 半湿润区面积缩小, 气候趋向干旱化; 100°E 以西地区, 极端

干旱区面积在缩小, 湿润指数略有增大.

由于长期的气候变化和人类活动, 黄河源区的草地已经出现大范围的退化以及局部的沙化现象, 导致草群中优良牧草比例降低, 草丛高度变矮, 覆盖度下降, 产草量明显降低, 严重制约了黄河源区畜牧业的可持续发展. 作为环境演变敏感区域, 该区对全球变化的“响应”极为明显<sup>[15]</sup>, 降水、气温等环境因子的变化都影响到该区域的干湿状况. 因此, 分析和研究该地区地表湿润状况变化趋势、年代际变化等特征及其与环境因子的关系, 这将有利于认识生态环境现状与过去的差异, 为合理配置和利用水资源, 探索黄河源区草地生态环境的变动原因、进行未来气候变化研究, 以及防止生态脆弱带自然环境的进一步恶化和区域的牧业生产和经济建设提供科学依据.

## 1 研究区基本概况、研究资料和研究方法

### 1.1 研究区基本状况

本研究在黄河源区中进行, 黄河源区位于青海省东南部, 96°54′~101°51′E, 32°31′~35°31′E, 东部与甘肃省接壤, 南部与四川省相连, 西部和青

收稿日期: 2010-04-30; 修订日期: 2010-10-04

基金项目: 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-06-01)资助

作者简介: 侯文菊(1968-), 女, 河南林州人, 工程师, 1994年毕业于成都信息工程学院, 主要从事天气预报、气象服务工作.

E-mail: hou\_wj2000@163.com

海省的玉树州为界, 北部和海西、海南两州毗邻。黄河源区地域辽阔, 山势雄伟, 平均海拔在 4 200 m 以上, 地势高、气温低, 仅有冷暖季之分, 干湿季分明, 光照辐射强, 日温差大, 具有典型的高原大陆性气候特征; 降水主要集中在暖季的 5-9 月, 占年降水量的 80%。该地区有众多的冰川、湖泊、河流等, 也是青海重要的畜产品生产基地。研究中选择了具有代表性的 4 个气象台站(玛多、玛沁、达日、久治), 区域气候总体表现出降水量由东南向西北逐渐递减, 气温逐渐降低。从研究区域的东南到西北, 依次分布着高寒灌丛、高寒草甸、高寒草原等多种植被生态类型, 久治以高寒灌丛为主, 达日、玛沁以高寒草甸为主, 玛多为高寒草原。土壤发育年轻, 土层浅薄。

## 1.2 研究资料

收集了 1961-2009 年玛多、玛沁、达日和久治 4 个气象台站的月平均气温、相对湿度、降水量、风速、日照时数、气压等资料。在分析黄河源区近 49 a 气候变化的趋势下, 利用世界粮农组织推荐的 Penman 修正公式, 计算分析了地表湿润指数的变化状况, 探讨近 49 a 来黄河源区随气候变化的地表湿润指数变化状况, 并给予了气候因子影响的相关性分析。

## 1.3 研究方法

地表湿润指数的关系表达式为:

$$W = P/ET_0 \quad (1)$$

式中:  $W$  为湿润指数;  $P$  为降水量(mm);  $ET_0$  为潜在蒸散(mm)。其中, 降水量可由气象台站观测得到, 潜在蒸散量采用 1998 年 FAO 推荐并修订的 Penman-Monteith 模型来计算<sup>[6]</sup>。计算过程中先用各月平均气象要素计算得到月潜在蒸散量, 而后累计计算出年潜在蒸散量。为解决 Penman-Monteith 模式中空气动力学阻力和植被冠层表面阻力取值比较困难的问题, 1992 年 Smith 在总结试验的基础上提出了计算蒸散量的 Penman-Monteith 简化公式。该公式全面考虑影响田间水分散失的大气因素和作物因素, 把能量平衡、空气动力学参数和表面参数结合在一起, 可应用于世界各个地区, 估值精度较高且具有良好的可比性。其表达式有<sup>[16]</sup>:

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \frac{C_n \times \gamma \times u_2 \times (e_s - e_a)}{(T + 273)}}{\Delta + \gamma(1 + C_d \times u_2)} \quad (2)$$

式中:  $ET_0$  为潜在蒸散量(mm);  $\Delta$  为饱和水汽压曲线对温度的斜率( $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ );  $R_n$  为净辐射( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ );  $G$  为地热通量( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ );  $r$  为干湿表常数( $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ );  $C_n$  和  $C_d$  分别是为天为步长的彭曼公式设置常数( $C_n = 900, C_d = 0.34$ );  $u_2$  为 2 m 高处风速( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $T$  为平均气温( $^\circ\text{C}$ );  $e_s$  和  $e_a$  分别为饱和水汽压和实际水汽压(kPa)。

饱和水汽压曲线对温度的斜率  $\Delta$  的计算方法有很多, 本文采用下式计算<sup>[16]</sup>:

$$\Delta = 409e_a / (T + 237.3)^2 \quad (3)$$

式中:  $T$  为月平均气温。物理学中, 把相对湿度定义为空气中实际水汽压与同温度下的饱和水汽压的百分比。因此, 饱和水汽压可用绝对湿度和相对湿度的比值来计算:

$$e = e_a / RH \quad (4)$$

式中:  $e_a$  为实际水汽压, 计算时可用绝对湿度来代替;  $RH$  为相对湿度。

干湿表常数  $\gamma$  采用 Brunt 提出的公式计算, 形式如下<sup>[16]</sup>

$$\gamma = \frac{C_p P}{\varepsilon \lambda} = 0.00163 \frac{P}{\lambda} \quad (5)$$

式中:  $C_p$  为空气定压比热( $1004 \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ );  $P$  为大气压力(hPa);  $\varepsilon$  为水汽分子与干空气分子的重量比, 取值 0.622;  $\lambda$  为蒸发潜热( $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。

蒸发潜热  $\lambda$  采用 Harrison 提出的公式计算, 形式如下

$$\lambda = 2.50025 - 0.002365T \quad (6)$$

$R_n$  采用下式计算<sup>[7]</sup>:

$$R_n = Q_r (a + bn/N)(1 - \alpha) - \varepsilon \times \sigma(273 + T)^4 \times (0.56 - 0.079(e_a)^{1/2})(0.10 + 0.90n/N) \quad (7)$$

式中:  $Q_r$  为理想大气下的太阳总辐射;  $\alpha$  为地面反射率, 草地为 0.26;  $\varepsilon$  为大气反射率(假定  $\varepsilon = 0.9$ );  $\sigma$  为斯蒂芬·波尔兹曼常数, 为  $4.903 \times 10^{-9} \text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $n/N$  为日照百分率,  $n$  为某月实际平均日照时数,  $N$  为某月平均可照时数。

黄河源区的各气象站未进行土壤热通量观测, 这里采用前人研究利用气温计算土壤热通量的模拟计算公式, 土壤热通量采用下式计算<sup>[16]</sup>:

$$G = 0.14(T_i - T_{i-1}) \quad (8)$$

式中:  $T_i$  和  $T_{i-1}$  分别为本月和前一个月的平均气温( $^\circ\text{C}$ )。

气象站一般观测的是 10 m 高度的风速, 需要

转换为 2 m 高度处风速, 其表达式有<sup>[18]</sup>:

$$u_2 = 0.75u_{10} \quad (9)$$

实际太阳总辐射( $Q$ )可由经验公式计算:

$$Q = Q_r(a + bn/N) \quad (10)$$

式中: 待定系数  $a$ 、 $b$ , 可用邻近玉树气象站的系数代替. 文中分别分析了黄河源区四季(冬季: 12–2 月; 春季: 3–5 月; 夏季: 6–8 月; 秋季: 9–11 月), 以及年的平均降水量、平均气温、潜在蒸散、日照时数及地表湿润指数自 1961 年来的气候变化特征和变化趋势. 气象要素趋势变化率用直线方程( $y = a_0 + b_1t$ )来确定, 其中:  $y$ (某气象要素)为因变量;  $t$ 为时间序列;  $a_0$ 为常数项;  $b_1$ 为线性趋势项;  $b_1$ 值的符号反映上升或下降的变化趋势.

## 2 结果与分析

### 2.1 年降水、平均气温、潜在蒸散量变化状况

49 a 来黄河源区年降水量虽然略有上升, 但上

升趋势不甚明显, 未达到显著性检验水平( $R^2 = 0.001$ ,  $n = 49$ ,  $P > 0.1$ , 图 1a). 1961–2009 年平均降水量为 533 mm, 年际降水波动较大, 其标准差达 155 mm, 最多年份(1989 年)是最少年份(1962 年)的 1.6 倍. 从年代际来看(表 1), 1961 年以来的 5 个年代中年代际降水量表现出 80 年代最高(正的距平百分率为 2.65%), 21 世纪初为次高(正的距平百分率为 2.08%), 90 年代最少(负的距平百分率达 3.13%), 其余年代为负距平, 距平百分率为 0.57%~0.82% 之间.

1961–2009 年的 49 a 来黄河源区年平均气温呈现明显的升高趋势, 且达极显著检验水平( $R^2 = 0.4788$ ,  $n = 49$ ,  $P < 0.01$ , 图 1b). 49 a 年平均气温为  $-1.06$  °C, 年平均气温在波动中升高, 1965 年是 49 a 来年平均气温最低的年( $-2.42$  °C), 比多年平均值低 1.36 °C; 2009 年是 49 a 来年平均气温最高的年( $1.1$  °C), 比多年平均高 2.16 °C. 年平

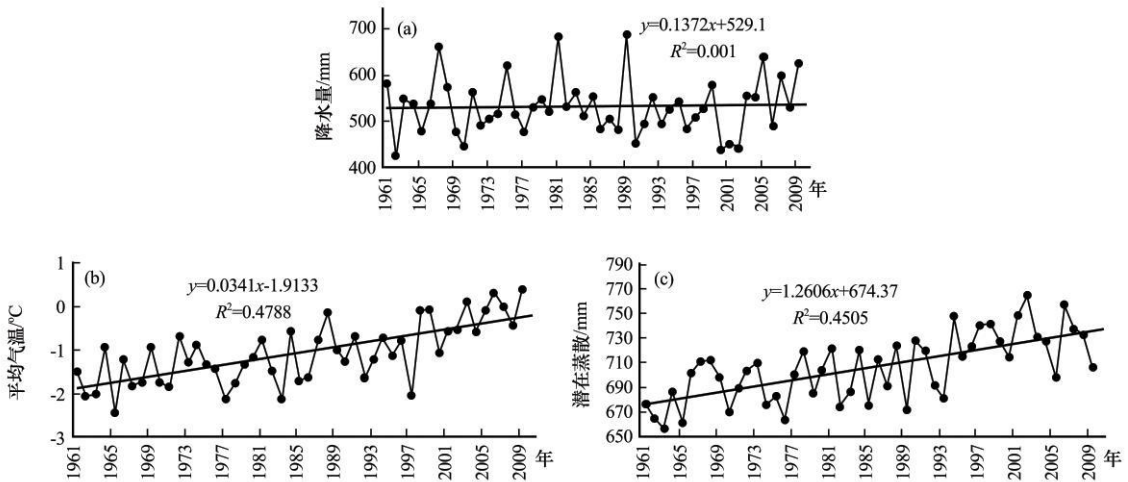


图 1 黄河源区近 49 a 年降水量(a)、年平均气温(b)、年潜在蒸散量(c)变化

Fig. 1 The variations of (a) annual precipitation, (b) annual mean air temperature, (c) annual potential evapotranspiration in the Yellow River source regions from 1961 to 2009

表 1 黄河源区 1961–2009 年降水、年平均气温、年潜在蒸散量年代际分布

Table 1 The decadal precipitation, air temperature and potential evapotranspiration in the Yellow River source regions from 1961–2009

年代	1961–1970	1971–1980	1981–1990	1991–2000	2001–2009
年代际平均降水量/mm	528.15	529.51	546.61	515.86	543.62
距多年距平百分率/%	-0.82	-0.57	2.65	-3.13	2.08
年代际平均气温/°C	-1.63	-1.37	-1.14	-0.93	-0.14
与历年平均距平/°C	-0.57	-0.31	-0.08	0.13	0.92
年代际平均潜在蒸散/mm	683.87	693.70	700.70	720.49	733.39
与多年平均距平/mm	-22.01	-12.18	-5.18	14.61	27.51

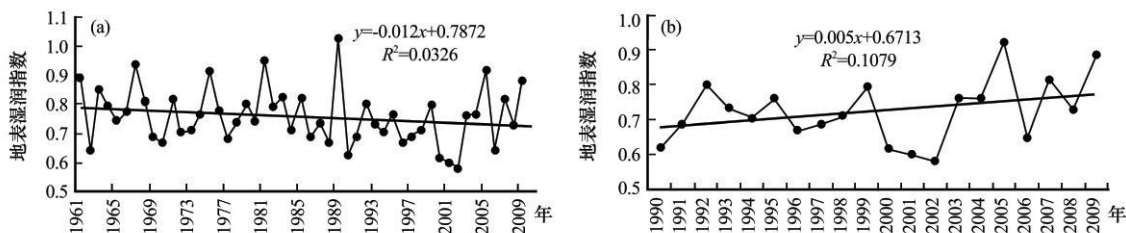


图 2 黄河源区近 49 a(a)和近 20 a(b)地表湿润指数变化

Fig. 2 The variations of surface humidity indexes in the Yellow River source regions,

(a) from 1961 to 2009 and (b) from 1990 to 2009

均气温自进入 20 世纪 80 年代以后升高明显, 这也可从年代际中所表现(表 1). 表 1 可以看出, 1961 年以来的 5 个年代际中年平均气温在 20 世纪 60 年代最低(比历年平均值低  $0.57\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), 进入 21 世纪初的 2001–2009 年最高(比历年平均值高  $0.92\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), 表现为随年代进程年均气温的变化逐渐升高.

49 a 来黄河源区年潜在蒸散量呈显著的增加趋势, 达到了显著性检验水平( $R^2 = 0.4505$ ,  $n = 49$ ,  $P < 0.01$ , 图 1c). 1961–2009 年平均潜在蒸散量为  $706\text{ mm}$ , 最多年份(2002 年)比最少年份(1976 年)多  $108\text{ mm}$ . 从年代际来看(表 1), 1961 年以来的 5 个年代中, 年代际潜在蒸散量表现出 21 世纪初最高(比历年平均值多  $27.51\text{ mm}$ ), 90 年代为次高(比历年均值多  $14.61\text{ mm}$ ), 60 年代最少(比历年均值少  $22.01\text{ mm}$ ), 70 年代为次少年. 随着气温的升高, 潜在蒸散在明显的加大, 且年潜在蒸散增加的速率( $12.6 \cdot (10a)^{-1}$ )远大于年降水量增加的速率( $1.37 \cdot (10a)^{-1}$ ). 进入 21 世纪后, 特别是 2003 年以来年降水量有明显的增加( $y = 16.398x + 461.63$ ), 气温显著升高( $y = 0.0796x - 0.5396$ ), 潜在蒸散却有明显的下降( $y = -3.7173x + 751.98$ ), 致使该地区湿润指数明显上升( $y = 0.026x + 0.6144$ ). 因此, 21 世纪初表现为暖湿型的气候特征.

## 2.2 地表湿润指数的变化特征

### 2.2.1 49 a 及近 20 a 地表湿润指数的变化

从图 2(a) 上可看出, 黄河源区的地表湿润指数自 1961 年以来呈弱的下降趋势( $R^2 = 0.0326$ ,  $n = 49$ ,  $P < 0.1$ ), 特别是 90 年代, 由于该时期降水量的减少, 导致湿润指数明显较其它年代的. 从图 2(b) 上可看出, 近 20 a 来黄河源区的湿润指数明显增大( $R^2 = 0.1079$ ,  $n = 20$ ,  $P < 0.1$ ), 近 20 a 来的气候倾向率较 49a 的气候倾向率有明显的增加, 这与近年的降水量增大、阴雨天气增多有一定的关系, 与风速的减小也有一定的关系.

### 2.2.2 地表湿润指数的年代际变化

表 2 给出了 1961 年到 2009 年 5 个年代季节和年平均地表湿润指数的年代际变化特征. 表 2 看到, 就整个黄河源区来看, 20 世纪 60 年代和 80 年代地表湿润指数最高(0.78), 为湿润期, 70 年代湿润指数于 60 和 80 年代相比略有降低, 90 年代表现较小, 成为干燥期, 21 世纪初比 90 年代略有增大, 向湿型转变, 此结果与前人研究相符<sup>[6]</sup>. 从季节变化来看, 春季湿润指数高的出现在 80 和 90 年代; 夏季除 90 年代干燥外, 其余均较湿润; 秋季 90 年代比较干燥, 其余年代相对较湿润; 冬季湿润指数较大的则出现在 90 年代.

表 2 黄河源区地表湿润指数年代际变化

Table 2 Decadal variations of surface humidity indexes in the Yellow River source regions for the past 49 years

季节	1961–1970	1971–1980	1981–1990	1991–2000	2001–2009
春季	0.39	0.41	0.45	0.44	0.42
夏季	1.24	1.19	1.20	1.14	1.21
秋季	0.77	0.74	0.78	0.62	0.66
冬季	0.13	0.14	0.14	0.19	0.14
年	0.78	0.76	0.78	0.72	0.74

表 2 还可看到, 近 49 a 的 5 个年代中, 黄河源区季地表湿润指数表现出由大到小依次为夏、秋、春、冬季, 故年平均地表湿润指数的大小主要取决于夏、秋季的地表湿润指数的值. 另外, 进入 21 世纪后, 冬、春季的湿润指数与 60 年代相比呈上升趋势, 夏、秋季及年湿润指数呈下降趋势, 特别是秋季下降最为明显, 下降了  $14.3\%$ , 这与各季节内降水量增多或减少有一定的关系.

### 2.2.3 不同地区不同季节及年地表湿润指数的变化

近 49 a 黄河源区年地表湿润指数的气候倾向

表 3 黄河源区年、季湿润指数的气候倾向率( $10a$ )<sup>-1</sup>)

Table 3 Annual and seasonal climate tendencies of humidity index ratios in Yellow River source regions during the past 49 years

季节	西北部		中部		东南部	黄河源区
	玛多	玛沁	达日	久治		
春季	0.02/-0.04	-0.01/0.01	0.01/0.03	0.01/-0.02	0.01/-0.01	
夏季	0.02/0.09	0.01/0.19	-0.01/0.13	-0.05/0.13	-0.01/0.14	
秋季	0.00/0.10	-0.02/0.08	-0.04/0.00	-0.09/0.02	-0.04/0.05	
冬季	0.01/-0.07	0.01/-0.03	0.01/-0.03	0.01/-0.03	0.01/-0.04	
年	0.05/0.09	0.00/0.25	-0.03/0.13	-0.12/0.10	-0.01/0.05	

注: 符号“/”前后数字分别代表 1961-2009 年和 1990-2009 年的气候倾向率( $n=49$ ,  $n=20$ ,  $P>0.1$ ), 均未达到显著性水平

率分析表明(表 3), 整个黄河源区年地表湿润指数呈不明显的减小趋势, 未通过显著性检验水平( $P>0.1$ )。其中, 西北部的玛多呈增加趋势, 增幅倾向率为  $0.05 \cdot (10a)^{-1}$ , 玛沁基本持平; 达日、久治呈现下降趋势, 久治减幅最大( $0.12 \cdot (10a)^{-1}$ )。由此可看出, 黄河源区西北部与东南部之间的湿润指数随着年代的递增而差距在缩小, 也就是说, 西北部的玛多县湿润指数在增加, 而东南部的久治湿润指数在减小。从季节变化中看到, 黄河源区地表湿润指数在冬、春两季呈增加趋势, 增幅均达  $0.01 \cdot (10a)^{-1}$ , 而夏、秋两季呈减小趋势, 秋季减小幅度最大达  $0.04 \cdot (10a)^{-1}$ 。其中, 西北部的玛多在四季中均为增加趋势, 玛沁在夏季、冬季变化中呈增加趋势, 而春、秋季呈减小趋势; 偏南的达日、久治两站基本相似, 冬、春季增加, 而夏、秋季的地表湿润指数在减小。相对而言, 久治的减小幅度要明显比达日的减小幅度大。

但是, 最近 20 a 来特别是 2003 年以来, 黄河源区湿润指数有所增加(图 2b), 但未通过显著性检验水平( $P>0.1$ )。上述 4 地区年增幅在  $0.09 \sim 0.25 \cdot (10a)^{-1}$  之间, 中部两个站增幅最大。由表 3 看到, 最近 20 a 来, 整个黄河源区春季、冬季为减

小趋势, 夏、秋季为增加趋势, 特别是夏季, 增幅明显达  $0.14 \cdot (10a)^{-1}$ 。玛沁、达日在春、夏、秋三季中均为增大趋势, 而在冬季为减小趋势; 玛多、久治相似, 春、冬季为减小趋势, 而夏、秋季均为增大趋势。进入 21 世纪后, 日照时数明显减少(图略), 降水量有所增加, 从而造成该时期的地表湿润指数增大, 也表明黄河源区近 20 a 来气候由上世纪末的暖干化趋势向暖湿化趋势演替。

### 2.3 湿润指数与气象因素的关系及敏感性分析

从湿润指数的定义来看, 它的变化取决于降水和潜在蒸散两个分量。显然降水量的多少直接影响到湿润指数的大小, 而潜在蒸散与气温、日照时间、空气湿度、风速等诸多的气象要素有关。这是因为温度高, 风速大将加大地气之间的热量传输, 进而影响到陆面蒸散过程; 而日照时间少、空气湿度大、降水纷纷将直接影响到空气水汽含量高, 会导致蒸散减弱。为此, 统计了这些气象因素与湿润指数的关系(表 4)。

从表 4 中可知, 湿润指数与日照时数呈负相关, 且夏季的相关系数最大, 达  $-0.707$ , 并通过了显著性检验水平( $P<0.01$ ), 说明日照时数在湿润指数减小趋势中起着重要作用。夏季土壤水分活

表 4 黄河源区地表湿润指数与各气象要素的相关系数

Table 4 The correlation coefficients between soil surface humidity index and climate factor in the Yellow River source regions

季节	日照时数	平均风速	相对湿度	平均气温	降水量
春季	-0.247 <sup>b</sup>	0.038 <sup>b</sup>	0.517 <sup>a</sup>	-0.063 <sup>b</sup>	0.959 <sup>a</sup>
夏季	-0.707 <sup>a</sup>	0.031 <sup>b</sup>	0.507 <sup>a</sup>	0.088 <sup>b</sup>	0.940 <sup>a</sup>
秋季	-0.489 <sup>a</sup>	-0.028 <sup>b</sup>	0.650 <sup>a</sup>	-0.172 <sup>a</sup>	0.965 <sup>a</sup>
冬季	-0.209 <sup>b</sup>	-0.338 <sup>c</sup>	0.568 <sup>a</sup>	-0.094 <sup>b</sup>	0.971 <sup>a</sup>
年	-0.411 <sup>a</sup>	-0.036 <sup>b</sup>	0.342 <sup>c</sup>	-0.071 <sup>b</sup>	0.934 <sup>a</sup>

注: a 为通过显著性(0.01)检验水平; c 为通过显著性(0.05)检验水平; b 为未通过显著性检验水平。

跃, 太阳辐射强, 潜在蒸散量加大, 所以对湿润指数起着负作用. 与降水量、相对湿度呈正相关, 并通过了显著性检验水平( $P < 0.01$ ), 降水量增加、空气相对湿度增大, 湿润指数随之增加. 湿润指数与平均风速在春夏季呈现正相关, 但没通过显著性检验水平( $P > 0.1$ ), 秋冬季为负相关, 特别是冬季相关系数为 $-0.338$ , 并通过显著性检验水平( $P < 0.05$ ). 风速增大, 易带去空中水汽, 使地表湿润指数减小. 同时, 湿润指数与气温也具有负相关(除夏季外), 四季中秋季的相关系数最大, 达 $-0.172$ , 并通过显著性检验水平( $P < 0.01$ ). 气温升高, 蒸散量加大, 从而湿润指数减小. 从相关程度分析来看, 降水量、相对湿度的增加和日照时数的减少对湿润指数的增加起着最主要的作用, 其次是平均气温和风速.

### 3 讨论与结语

#### 3.1 结果讨论

吴绍洪等<sup>[2]</sup>研究认为, 近 30 a 来中国陆地表层年平均最大可能蒸散在 400~1 500 mm 之间, 本研究计算的黄河源区年平均最大可能蒸散在 656~765 mm 之间, 属上述研究范围. 杜军等<sup>[16]</sup>在研究西藏北部年地表湿润状况时认为, 该地区地表湿润指数呈增大趋势, 增幅在  $0.01 \sim 0.05 \cdot (10a)^{-1}$ . 而我们对黄河源区进行分析的结果有所不同, 1961–2009 年的 49 a 间湿润指数表现出随年际进程有所下降, 减幅为  $0.01 \cdot (10a)^{-1}$ ; 王根绪等<sup>[19-20]</sup>在研究气候变化对长江黄河源区生态系统的影响中指出: 过去 40 a 来, 黄河源区高覆盖草甸、高覆盖草原和湿地面积分别减少了 23.2%、7.0% 和 13.6%, 气温升温倾向率为  $0.31 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10a)^{-1}$ , 降水量以  $0.07 \text{ mm} \cdot a^{-1}$  的气候倾向率递增, 气温持续升高, 在降水没有明显变化的情况下, 导致青藏高原腹地气候的暖干化趋势, 冻土退化引起该区高寒草甸植被向高寒草原植被的退化; 王鹏祥等<sup>[21]</sup>对近 44 a 来我国西北地区干湿特征分析中指出, 44 a 来西北地区东南部的干湿指数特征趋势系数为 $-0.18$ , 表现为弱的变干趋势, 此结果与本文的结果也非常相似.

王菱等<sup>[6]</sup>研究了中国北方地区 1961–2000 年 40 a 间气候干湿带界线分布和 10 a 际变化时认为, 40 a 来中国北方地区, 在  $100^\circ \text{E}$  以东地区, 半干旱区面积扩大, 半湿润区面积缩小, 气候趋向干旱化; 在  $100^\circ \text{E}$  以西地区, 极端干旱区面积在缩小,

湿润指数有增大趋势. 此结果与本文研究区域中的玛多县非常相似, 本属干旱区的玛多县, 随着年份的进程湿润指数呈现增大趋势. 虽然本研究结果发现自 1961 年以来的 49 a 里黄河源区湿润指数呈现下降趋势, 即向干旱化发展, 但进入 21 世纪后湿润指数有所增加(图 2b), 也说明黄河源区自本世纪初出现转型, 湿润指数有增大的趋势, 与王菱等<sup>[6]</sup>的结果是一致的.

黄河源区的湿润指数变化规律表明, 黄河源区与全国尺度上平均气温升高和降水在增多的结果是相同的, 只是黄河源区气温上升的倾向率较全国尺度上的高, 而降水增多趋势较弱. 李林等<sup>[22]</sup>利用 43 a 的实测资料在分析三江源地区气候变化时认为, 黄河源区气温近 40 多年来按  $0.32 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10a)^{-1}$  倾向率升高, 冬季降水量以  $1.33 \text{ mm} \cdot (10a)^{-1}$  的气候倾向率递增. 由于我们所研究的黄河源区 4 个气象台站观测资料包括在该研究范围, 因而其气温升高的倾向率和降水增多的倾向率具有相似之处.

一个地区的湿润指数是综合气象因素的结果, 这种影响的因素中, 地表蒸发和降水应是湿润指数的函数, 是影响地表湿润指数的直接原因. 但空气湿度、日照时间、风速均也是影响湿润指数的重要因素. 空气湿度大, 表明大气离饱和程度愈接近, 使地表蒸发速率下降; 风速将导致气流的交换, 对蒸发起到有利的作用; 当日照时间缩短时, 表明天空云系多, 会抑制地表包括能量在内的热量和水汽的交换, 其结果可导致区域降水相对增大和抑制了地表水的蒸散, 对地表湿润指数的影响是复杂的. 但经相关系数分析表明(表 4), 湿润指数与日照时间呈反相关关系, 表明日照时间对蒸散的影响要大于对降水的影响. 地表蒸散过程表面看起来是与水汽(空气湿度)有直接的关系, 实际上地表在发生蒸散时要消耗大量的热量, 温度越高对水分运动越有利, 说明温度条件在地表湿润指数的变化过程中将起到反相关的作用. 从表 4 看到, 温度条件虽然对湿润指数有一定的反相关关系, 但相关系数分析表明所呈现的反相关关系除秋季外, 其余季节均未达到显著性检验水平.

#### 3.2 结论

通过以上分析研究, 获得如下结果:

(1) 自 1961–2009 年的 49 a 间, 黄河源区年地表湿润指数呈现下降的趋势, 但因地区不同而湿润指数的升降也有所不同. 玛多因近几年降水明显

增多,造成该地区地表湿润指数倾向率有所增大的趋势,增幅为  $0.05 \cdot (10a)^{-1}$ ,久治下降的倾向率为  $0.12 \cdot (10a)^{-1}$ 。进入21世纪以来湿润指数比20世纪90年代有所增加,说明气候在向暖湿型发展。

(2) 季节变化中,49 a来地表湿润指数大部分地区冬春季表现为增大趋势;夏季玛多呈现增加趋势,玛沁持平,达日、久治呈现减小趋势,特别是久治,减幅为  $0.05 \cdot (10a)^{-1}$ ;秋季除玛多持平外,其余均呈现减小趋势,减幅最大的仍在久治,达  $-0.09 \cdot (10a)^{-1}$ 。1990–2009年近20 a地表湿润指数呈增大趋势,以夏季最为突出,其次为秋季,冬季有减小趋势。

(3) 就年代际变化而言,20世纪60年代以湿冷型为主的气候特征;70年代气温比60年代略有上升,但仍偏低,地表湿润指数为弱负距平,表现为半湿润冷型的气候特征;80年代气温继续上升,地表湿润指数明显增加,表现为湿润弱暖型的气候特征;90年代以后气温持续升高,地表湿润指数显著减小,此时期黄河源区表现为暖干年代际变化特征。2003年以来,黄河源区表现为暖湿型的气候特征。

(4) 黄河源区的潜在蒸散量及湿润指数与降水、相对湿度、日照时数的响应最为敏感,具有显著性相关水平,而平均气温和风速虽然大部分达不到显著性检验水平,但表明也受到一定的影响。

#### 参考文献(References):

- [1] Solomon S, Qin Dahe, Manning M. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, U K: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Wu Shaohong, Yin Yunhuo, Zheng Du, *et al.* Research on terrestrial surface dry-wet conditions over China in recent 30years[J]. Sciences in China, 2005, **35**(3): 276–283. [吴绍洪, 尹云鹤, 郑度, 等. 近30年中国陆地表层干湿状况研究[J]. 中国科学(D辑), 2005, **35**(3): 276–283.]
- [3] Ma Zhuguo, Huang Gang, Gan Wenqian, *et al.* Multiscale temporal characteristics of the dryness wetness over northern China during the last century [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2005, **29**(15): 671–681. [马柱国, 黄刚, 甘文强, 等. 近代中国北方干湿变化趋势的多时段特征[J]. 大气科学, 2005, **29**(15): 671–681.]
- [4] Yang Jianping, Ding Yongjian, Chen Rensheng, *et al.* The fluctuation of dry and wet climate boundary and its causal analyses in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2003, **61**(3): 364–373. [杨建平, 丁永建, 陈仁升, 等. 近50年中国干湿气候界线波动及其成因初探[J]. 气象学报, 2003, **61**(3): 364–373.]
- [5] Wu Shaohong, Yin Yunhuo, Zheng Du, *et al.* Climate changes in the Tibetan Plateau during the last three decades[J]. Acta Geographica Sinica, 2005, **60**(1): 3–11. [吴绍洪, 尹云鹤, 郑度, 等. 青藏高原近30年气候变化趋势[J]. 地理学报, 2005, **60**(1): 3–11.]
- [6] Wang Ling, Xie Xianqun, Li Yunsheng, *et al.* Changes of humid index and border line of wet and dry climate zone in North China over the past 40 years[J]. Geographical Research, 2004, **23**(1): 45–54. [王菱, 谢贤群, 李运生, 等. 中国北方地区40年来湿润指数和气候干湿带界线的变化[J]. 地理研究, 2004, **23**(1): 45–54.]
- [7] Ma Zhuguo, Fu Congbing. Trend of surface humid index in the arid area of northern China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2001, **59**(6): 737–746. [马柱国, 符淙滨. 中国北方干旱区地表湿润状况的趋势分析[J]. 气象学报, 2001, **59**(6): 737–746.]
- [8] Jin Liya, Li Jing, Wang Xin, *et al.* The temporal and spatial distribution of surface dry wet conditions over northern China in recent 50 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, **59**(6): 847–854. [靳立亚, 李静, 王新, 等. 近50年来中国西北地区干湿状况时空分布[J]. 地理学报, 2004, **59**(6): 847–854.]
- [9] Sun Fenghua, Yuan Jian. Recent 40 years inter-decadal fluctuation of dry and wet climate boundary and its cause in Liaoning Province[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, **17**(7): 1274–1279. [孙凤华, 袁健. 近40年来辽宁地区气候干湿界线年代际波动及其成因[J]. 应用生态学报, 2006, **17**(7): 1274–1279.]
- [10] Du Jun, Hu Jun, Chen Hua, *et al.* Trend of surface humid index in middle reaches of the Yalung Zangbu River over Tibet in recent 40 years[J]. Journal of Natural Resources, 2006, **21**(2): 196–204. [杜军, 胡军, 陈华, 等. 雅鲁藏布江中游地区地表湿润状况的趋势分析[J]. 自然资源学报, 2006, **21**(2): 196–204.]
- [11] Wang Jian, Huang Qiaohua, Bai Chunguang, *et al.* Tendency of the Quaternary climatic change in Qaidam Basin and its causal mechanism [J]. Scientia Geographica Sinica, 2002, **22**(1): 34–38. [王建, 黄巧华, 柏春广, 等. 2.5Ma以来柴达木盆地的气候干湿变化特征及其原因[J]. 地理科学, 2002, **22**(1): 34–38.]
- [12] Ma Zhuguo. Dry/wet variation and its relationship with regional warming in arid regions of northern China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, **48**(5): 1011–1018. [马柱国. 我国北方干湿演变规律及其与区域增暖的可能联系[J]. 地球物理学报, 2005, **48**(5): 1011–1018.]
- [13] Shang Zongbo, Gao Qiong. Assessing the sensitivity of China water condition to global climate changes [J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, **21**(4): 528–537. [尚宗波, 高琼. 中国水分状况对全球气候变化的敏感性分析[J]. 生态学报, 2001, **21**(4): 528–537.]
- [14] Li Gelin, Xu Yuan, Qian Weihong. Dry and wet climate changes of western China in recent 300 years[J]. Plateau Meteorology, 2003, **22**(4): 371–377. [李弋林, 徐袁, 钱维宏. 近300年来中国西部气候的干湿变化[J]. 高原气象, 2003, **22**(4): 371–377.]
- [15] Sun Honglie. The Tibetan Plateau's Formation And Evolution [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1996: 1–383. [孙鸿烈. 青藏高原的形成演化[M]. 上海: 上海科技

- 出版社, 1996: 1- 383.]
- [16] Du Jun, Bian Duo, Hu Jun, *et al.* Response of surface humid conditions to climate change in the Northern Tibet [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29** (5): 2437- 2444. [杜军, 边多, 胡军, 等. 藏北牧区地表湿润状况对气候变化的响应[J]. *生态学报*, 2009, **29**(5): 2437- 2444.]
- [17] Zuo Dakang, Wang Yixiang, Chen Jiansui. The spatial distribution of global radiation in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1963, **33** (1): 78- 95. [左大康, 王懿贤, 陈建绥. 中国地区太阳总辐射的空间分布特征[J]. *气象学报*, 1963, **33** (1): 78- 95.]
- [18] Wang Ling, Chen Shenbin, Hou Guangliang. Method for altitudinal corrections of penman evapotranspiration formula [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1988, **46**(3): 381- 383 [王菱, 陈沈斌, 侯光良. 利用彭曼公式计算潜在蒸发的高度订正方法[J]. *气象学报*, 1988, **46**(3): 381- 383.]
- [19] Wang Genxu, Li Na, Hu Hongchang. Impact of climate change on the ecological system and its hydrological effects in source regions of Yangtze and Yellow Rivers [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2009, **5** (4): 202- 207 [王根绪, 李娜, 胡宏昌. 气候变化对长江黄河源区生态系统的影响及其水文效应[J]. *气候变化研究进展*, 2009, **5**(4): 202- 207.]
- [20] Wang GenXu, Li Qi, Cheng Guodong, *et al.* Climate change and its impact on the ecoenvironment in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers in recent 40 years [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, **23**(4): 346- 351. [王根绪, 李琪, 程国栋, 等. 40a 来江河源区的气候变化特征及其生态环境效应[J]. *冰川冻土*, 2001, **23**(4): 346- 351.]
- [21] Wang Pengxiang, He Jinhai, Zheng Youfei, *et al.* Aridity wetness characteristics over Northwest China in recent 44 years [J]. *Applied Meteorological Science*, 2007, **18**(6): 771- 773. [王鹏祥, 何金海, 郑有飞, 等. 近 44 年来我国西北地区干湿特征分析[J]. *应用气象学报*, 2007, **18**(6): 771- 773.]
- [22] Li Lin, Li Fengxia, Guo Anhong, *et al.* Study on the climate change trend and its catastrophe over "Sanjiangyuan" region in recent 43 years [J]. *Journal of Natural Resources*, 2006, **21** (1): 80- 82. [李林, 李凤霞, 郭安红, 等. 近 43 年来“三江源”地区气候变化趋势及其突变研究[J]. *自然资源学报*, 2006, **21**(1): 80- 82.]

## Soil Surface Humidity Index and Sensitivity Analysis of the Climate Factors That Affect It in the Yellow River Source Regions

HOU Wen-ju<sup>1</sup>, LI Ying-nian<sup>2</sup>

(1. Meteorological Station of Guoluo Prefecture, Goluo Qinghai 814000, China; 2. Northwest Institution of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining Qinghai 810001, China)

**Abstract:** The potential evapotranspiration in Yellow River source regions was calculated by using the model of Penman-Monteith. The variations and changing tendency of the regional surface humidity index since 1961 were analyzed, together with a sensitivity analysis of the meteorological factors that affect the index. It is found that surface humidity index has had a decreasing tendency since 1961, with a relative wet and cold period in the 1960s, a semi-wet and cold period in the 1970s, a minor warm and humid period in the

1980s and a major warm and dry in the 1990s. However, precipitation has increased and humidity index has enhanced since the beginning of this century, especially since 2003, which characterized by warm and wet. There is a little difference in the humidity index among different seasons. The surface humidity index has increased in spring and winter while decreased in summer and autumn during the past 49-year. The analysis shows that precipitation, sunshine hour and humidity are the most principal sensitive factors to the humid index.

**Key words:** Yellow River source regions; surface humidity index; climate change; sensitivity analysis