1960—2012 年山东省近地面和高空相对湿度时空变化特征

刘晓笛，李宝富，廉丽姝
（曲阜师范大学 地理与旅游学院，山东 日照 276826）

摘　要：[目的] 探讨近地面和高空相对湿度的时空变化特征及其与气温和降水的关系，为研究山东省气候波动过程提供依据。[方法] 基于山东省 1960—2012 年探空和地面观测资料，采用回归分析、IDW 空间插值、Mann-Kendall 单调趋势检验法以及敏感性分析等方法研究了相对湿度变化特征。[结果] 1960—2012 年，山东省近地面年均相对湿度呈下降趋势，变化速率为－0.23%/10 a（$p>0.05$）。其中，春季、秋季和夏季相对湿度下降速率大小依次为－0.45%/10 a，－0.42%/10 a 和－0.18%/10 a，而冬季相对湿度却呈增加趋势（0.10%/10 a）。空间上，近地面相对湿度从东部沿海向西部内陆递减，而下降趋势呈现“东快西慢”的特点。高空相对湿度也呈下降趋势，而且对流层中下层的变化趋势比上层明显。近地面相对湿度季节变化对年变化的贡献率由大到小依次为：秋季＞春季＞冬季＞夏季，对流层中下层各季的贡献率大小依次为：秋季＞冬季＞春季＞夏季，而对流层上层各季贡献率由大到小为：夏季＞秋季＞冬季＞春季。[结论] 敏感性分析表明，干旱指数变化 1%，将引起近地面和高空相对湿度分别变化－1.55% 和－1.95%，而气温或降水变化 1%，将导致相对湿度变化在－0.15%～0.09%。

关键词：相对湿度；近地面；高空；气候干旱指数；山东省
文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2017)05-0218-06　　**中图分类号**：P468.0^{+}23

文献参数：刘晓笛，李宝富，廉丽姝. 1960—2012 年山东省近地面和高空相对湿度时空变化特征[J]. 水土保持通报，2017，37(5)：218-223. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.20170823.001；Liu Xiaodi，Li Baofu，Lian Lishu. Tempo-spatial variations of aerial and subaerial air relative humidity in Shandong Province during 1960—2012[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2017，37(5)：218-223. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.20170823.001

Tempo-spatial Variations of Aerial and Subaerial Air Relative Humidity in Shandong Province During 1960－2012

LIU Xiaodi，LI Baofu，LIAN Lishu
（*College of Geography and Tourism*，*Qufu Normal University*，*Rizhao*，*Shandong* 276826，*China*）

Abstract：[Objective] The tempo-spatial change characteristics of aerial and subaerial air relative humidity and its responses to temperature and precipitation were explored，to provide basis for the research of climate fluctuation process in Shandong Province. [Methods] Based on the radio sounding and land surface observation data of Shandong Province during 1960—2012，we used regression analysis，IDW，Mann-Kendall non-parametric statistical test and sensitivity analysis to analyze the change characteristics of relative humidity. [Results] The annual subaerial air relative humidity exhibited an obvious decreasing trend（$p>0.05$）from 1960 to 2012 at a rate of －0.23% per 10 a. In spring，autumn and summer，the values were －0.45%，－0.42% and －0.18% per 10 a，respectively. On the contrary，the relative humidity increased in winter with a rate of 0.10% per 10 a. In spatial，subaerial air relative humidity decreased from the eastern coastal area to the western inland area. However，with regard to the change rate，it is fast in eastern area and slow inland. The aerial air relative humidity had similar spatial change. From the costal to the inland，the decreases in mid and lower troposphere were more obvious than that in the upper troposphere. The seasonal variations could interpret the annual change with different proportions，having an order as：autumn＞spring＞winter＞

收稿日期：2017-01-21　　**修回日期**：2017-03-12
资助项目：山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目“定量辨识气候变化与人类活动对沂河地表水资源的影响”（BS2014HZ022）；山东省自然科学基金（ZR2015DL001）；曲阜师范大学科研启动基金（BSQD20130102）
第一作者：刘晓笛（1994—），女（汉族），山东省潍坊市人，硕士研究生，研究方向为气候变化及其影响研究。E-mail：lxd20120908@126.com。
通讯作者：李宝富（1983—），男（汉族），山东省临沂市人，博士，副教授，主要从事气候变化与水文水资源研究。E-mail：lenny006@163.com。

summer. For mid and lower troposphere, the seasonal contributions ranked as: autumn>winter>spring>summer; For upper troposphere, the rank was summer>autumn>winter>spring. [Conclusion] Sensitivity analysis showed that if drought index changes by 1% during 1960—2012, could induce aerial and subaerial air relative humidity to change by −1.55% and −1.96% respectively; accordingly, if temperature or precipitation changes by 1%, relative humidity will change by −0.15% to 0.09%.

Keywords: relative humidity; subaerial air; aerial air; climate drought index; Shandong Province

IPCC 第 5 次评估报告中预估未来气候变暖趋势仍将持续,到 21 世纪末全球平均气温将升高 0.3～4.8 ℃[1]。全球变暖导致地表蒸发的增加,从而引起干旱化的发展和加剧[2]。大气水汽是衡量气候变化的重要因子,同时也是造成全球变暖的重要因素[3]。而相对湿度是表征空气中水汽饱和程度的参量,用空气中的实际水汽压与同温度下的饱和水汽压之比的百分数表示。相对湿度的变化势必会对当地的自然生态环境、植被恢复、大气能见度、工农业生产以及人民生活产生一定的影响。因此,开展区域相对湿度的变化规律及其时空差异性的研究,对明确区域气候变化特征,科学制定应对气候变化的策略具有重要意义。

20 世纪中期以来,有关相对湿度等大气水分变化方面的研究逐渐受到国内外一些学者的重视,并取得了一定的成果[4]。曹丽青等[5]分析了华北地区大气水汽含量变化特征,表明 20 世纪 50—80 年代水汽呈持续下降趋势。刘秀兰[6]利用青海省 500 hPa 的探空资料,研究表明高空湿度在 1990 年以后呈明显下降趋势。韩梅等[7]发现吉林中西部地区年均和季节相对湿度均呈下降趋势,而且相对湿度变化与气温呈负相关,与降水量呈正相关关系。Akinbode 等[8]分析 1980—2001 年尼日利亚阿库雷的相对湿度呈显著下降趋势。诸多学者分析了中国不同区域相对湿度的变化特征,如秦皇岛[9]、甘肃武威[10]、广州白云机场[11]、河南烟区[12]、辽宁本溪县[13]、吉林敦化[14]、秦岭淮河以北[15]等地区,而对山东省相对湿度的研究尚需加强。已有研究表明,近 50 a 山东省普遍增温,年降水量也在波动中呈下降趋势[16]。山东省空中水汽含量也存在明显的季节变化,夏季多,冬季少[17],但对于高空湿度的变化及其与近地面湿度的关系尚不明确。因此,本文拟基于多种统计方法探讨 1960—2012 年近地面和高空相对湿度的变化趋势及其与气温和降水的关系,以期为了解山东省气候波动过程以及工农业生产活动提供理论指导。

1　资料与方法

1.1　气象资料来源

本文所用数据包括近地面和高空数据,均来源于中国气象数据共享网。近地面气象数据选取时间序列完整、连续性好的 18 个气象台站的 1960—2013 年逐月相对湿度的观测资料。根据地理位置的差异将 18 个研究站点划分为 5 个区域:鲁东区(包括莱阳、海阳市、长岛县、龙口市、石岛镇、威海、潍坊、青岛市和成山镇)、鲁东南区(包括日照市、莒县)、鲁中区(包括济南、泰安市、沂源县)、鲁西北区(包括惠民县、东营市)、鲁西南区(莘县、兖州区)。

高空气象数据选取 1960—2012 年山东省济南和青岛 2 个探空站 850,700,500,400,300,250,200 hPa 各等压面 0 和 12 时的温度和露点温度差的观测数据。探空资料的日平均值取 0 和 12 时的平均值。对高空按照 2 个垂直高度层进行划分:对流层中下层(850～400 hPa)和对流层上层(300～200 hPa)。

1.2　研究方法

1.2.1　Mann-Kendall 单调趋势检验法　采用非参数检验法 Mann-Kendall 单调趋势检验法来检验相对湿度长期变化趋势的显著性。在 Mann-Kendall 趋势检验中,零假设认为数据集合是一系列单独且相同分布的随机变量;而双尾检验的选择性假设认为对于所有的 j 和 i,x_j 和 x_i 都不同分布,统计检验公式如下:

$$S=\sum_{j=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}\mathrm{sgn}(x_j-x_i) \tag{1}$$

$$\mathrm{sgn}(\theta)=\begin{cases}1 & (\theta>0)\\ 0 & (\theta=0)\\ -1 & (\theta<0)\end{cases} \tag{2}$$

式中:x_j 和 x_i——连续的数据值;n——数据集合的长度。而且,对于样本大于 10 的集合,检验统计量 S 接近于正态分布,例如下面的统计值就是一个标准的正态变量:

$$Z=\begin{cases}(S-1)/\sqrt{\mathrm{var}(S)} & (S>0)\\ 0 & (S=0)\\ (S+1)/\sqrt{\mathrm{var}(S)} & (S<0)\end{cases} \tag{3}$$

统计量 S 的理论值和方差如下:

$$E(S)=0 \tag{4}$$

$$\mathrm{var}(s)=\frac{n(n-1)(2n+5)-\sum_t t(t-1)(2t+5)}{18} \tag{5}$$

式中:t——“结”的宽度;$\sum$——所有“结”的总合[18]。

Mann-Kendall 趋势检验除了可以检测时间序列的趋势以外,还可以用来估计趋势的大小。定义数据

集合中所有成对组合值的中位数 β 为 Mann-Kendall 斜率，则它是趋势大小的无偏估计值：

$$\beta=\mathrm{Median}\left(\frac{x_i-x_j}{x-j}\right) \quad (\forall j<i) \tag{6}$$

Mann-Kendall 趋势检验的优点在于对数据要求较少，数据偏离正态性不会对结果产生很大影响，且易于处理具有周期变化的数据[19-20]。

1.2.2 IDW 空间插值分析 IDW 空间插值法，也称为反距离权重法，是最常用的空间插值方法之一，该方法由美国国家气象局于 1972 年提出。该法用周边相邻的采样点的值，估计未知点的值，以待插点与实际观测样本点之间的距离为权重，离插值点越近的样本点赋予的权重越大，其权重贡献与距离成反比。该方法是基于相近相似的原理：即两个物体离得远，它们的性质相似性就越小，反之，物体间离得越近则相似性越大[21]。采用 IDW 法对相对湿度进行空间插值，分析相对湿度的空间分布特征。

1.2.3 相对湿度计算 利用温度和露点温度计算相对湿度[22]：

当温度高于－40 ℃时，

$$\begin{cases} E_s=1.000\,071\mathrm{e}^{0.000\,004\,5pE} \\ E=6.109\,4\mathrm{e}^{\frac{17.625T}{243.04+T}} \end{cases} \tag{7}$$

当温度低于－40 ℃时，

$$\begin{cases} E_s=0.998\,82\mathrm{e}^{0.000\,008pE} \\ E=6.112\,1\mathrm{e}^{\frac{22.587T}{273.86+T}} \end{cases} \tag{8}$$

式中：T——温度(℃)；p——气压(hPa)；E——水汽压(hPa)；E_s——饱和水汽压(hPa)。

$$\mathrm{RH}=\frac{E_s(T_d)}{E_s(T)} \tag{9}$$

式中：T_d——露点温度(℃)；RH——相对湿度(%)。

1.2.4 气候干旱指数

$$DI_i=PI_i+TI_i \tag{10}$$

式中：DI_i——第 i 年的干旱指数，DI_i 值越大表示气候越干旱；PI_i——第 i 年的降水距平指数；TI_i——第 i 年的地面气温距平指数[23]。PI_i 和 TI_i 的计算公式分别为：

$$PI_i=\frac{(P-P_i)}{P} \tag{11}$$

$$TI_i=\frac{(T_i-T)}{T} \tag{12}$$

式中：P，T——1960—2012 年降水量(mm)和年平均地面气温的平均值(℃)；P_i，T_i——第 i 年的降水量(mm)和年平均地面气温(℃)。

1.2.5 敏感性分析 本文采用 Zheng 等[24]提出的敏感性计算方法分析 1960—2012 年相对湿度对干旱指数、降水和气温变化的敏感性系数。计算公式如下：

$$\varepsilon=\frac{\overline{X}}{\overline{Q}}\frac{\sum(X_i-\overline{X})(Q_i-\overline{Q})}{\sum(X_i-\overline{X})^2} \tag{13}$$

式中：X_i——气象要素；Q_i——相对湿度，ε——敏感性系数；$\overline{X}$ 和 $\overline{Q}$——气象要素和相对湿度的多年平均值。ε 的物理意义是指气象要素变化 1%，引起相对湿度的变化率 ε%。

1.2.6 季节变化贡献率 为了探讨某个季节相对湿度变化对年变化的重要程度，特计算了相对湿度变化的季节贡献率，公式如下[25]：

$$I_s=\frac{|\overline{P_{S,1987-2012}}-\overline{P_{S,1960-1986}}|}{\sum|\overline{P_{S,1987-2012}}-\overline{P_{S,1960-1986}}|}\times 100\%$$
$$S\in(\text{春},\text{夏},\text{秋},\text{冬}) \tag{14}$$

式中：I_S——相对湿度变化的季节贡献率；$\overline{P_{S,1960-1986}}$，$\overline{P_{S,1987-2012}}$——每个季节在 1960—1986，1987—2012 年的平均相对湿度。通过研究发现，1960—2012 年相对湿度变化的突变点在 1986 年左右。因此，本文将研究时段划分为 1960—1986，1987—2012 年，从而分析季节相对湿度变化的贡献率。

2 结果与分析

2.1 近地面相对湿度时间变化特征

2.1.1 年变化 1960—2013 年山东省年平均相对湿度呈下降趋势，但不显著，变化速率为－0.23%/10 a。同时，相对湿度在不同的时间段的变化具有明显的差异性。其中：20 世纪 60 年代，相对湿度的下降速率为－2.113%/10 a；70 年代的相对湿度变化速率为－1.877%/10 a，与 60 年代相比减小趋势略缓，而且下降趋势并不显著；80 年代的相对湿度呈略微增加趋势，变化速率为 0.296%/10 a；90 年代的相对湿度与 60 年代和 70 年代相比，下降最快(3.254%/10 a)；进入 21世纪以来，相对湿度的下降趋势仅为0.749%/10 a，下降速度明显低于 20 世纪 90 年代(图 1)。

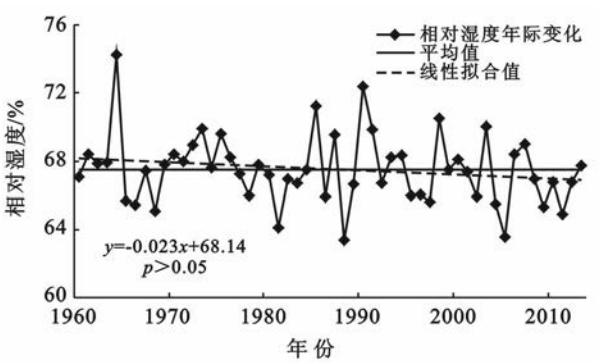


图 1 1960－2013 年山东省年均相对湿度变化趋势

2.1.2 季节变化 1960—2013 年，山东省年均相对湿度为 67.5%。春季，山东省相对湿度的减小速率

为－0.45%/10 a,但趋势并不显著(图 2)。20 世纪 60 年代和 70 年代的春季相对湿度高于平均水平;80 年代的相对湿度有降低趋势;90 年代的相对湿度有所回升,为春季的最高值(63.89%);但 21 世纪以来,相对湿度大大减少,仅为 59.35%,并且低于春季年均水平(61.52%)。

夏季,研究区的相对湿度值高达 78.8%,整体高于其他季节。夏季相对湿度波动幅度不大,总体略有下降,变化速率仅为－0.18%/10 a,明显低于春季。21 世纪初与 20 世纪 60 年代相比只减小 0.4%。

秋季,全省的平均相对湿度(68.3%)高于春季,其下降趋势略低于春季但明显高于夏季,变化速率是－0.42%/10 a,但趋势也不显著。从 1960s—1980s,相对湿度一直呈现出下降趋势;90 年代起,相对湿度略有所回升,但幅度不大,90 年代只比 80 年代增加了 0.2%;21 世纪初与 90 年代相比仅增加了 0.052%。

冬季,山东省的多年平均相对湿度低于其他 3 个季节。从变化趋势来看,只有冬季相对湿度呈略增态势,速率为 0.10%/10 a。1960s 平均相对湿度为 60.54%;70 年代的相对湿度仅升高了 2.03%;80 年代与 70 年代相比又减小了 2.14%;90 年代的变化最为明显,变化速率为－0.881%/a;21 世纪以后的平均相对湿度为 61.9%,略高于 90 年代(61.37%),增加幅度较小。

从变化的贡献率来看,秋季相对湿度变化对年均相对湿度变化的贡献率最大,高达 41.18%,其次是春季(27.23%)和冬季(20.91%),夏季的贡献率最小,为 10.68%。

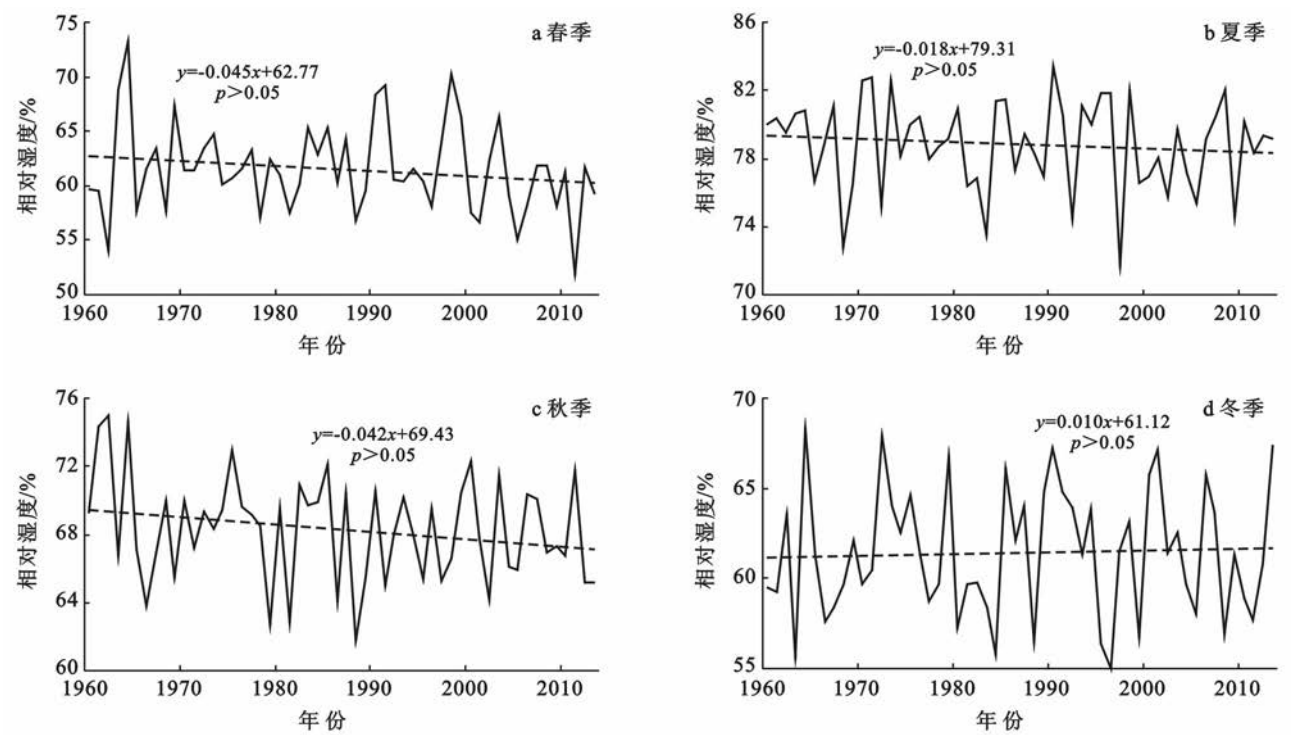


图 2　1960－2013 年山东省春季、夏季、秋季和冬季相对湿度变化趋势

2.1.3　月际变化　从近 50 a 各月平均相对湿度来看,全年中有 4 个月的相对湿度大于年平均值。月平均相对湿度的最低值出现在 3 月(59.4%),年内的最大值为 82.9%(7 月),可见相对湿度月际变化幅度较大。

从变化速率来看,40%的月份相对湿度呈增加态势,平均增加速率为 0.22%/10 a。其中 5 月相对湿度增加速率最大,为 0.5%/10 a,9 月和 12 月增加速率较小,分别仅为 0.02%/10 a 和 0.06%/10 a。相对湿度减小的月份的平均变化速率为－0.57%/10 a,其中 3 和 4 月相对湿度的降低速率较大,分别为－0.97%/10 a 和－0.9%/10 a,而 2 和 8 月减小速率较小,分别为－0.04%/10 a 和－0.18%/10 a。另外,M-K 检验结果表明,仅 3 和 6 月相对湿度的变化趋势达到 $p<0.05$ 的显著性水平。

2.2　近地面相对湿度空间变化特征

2.2.1　年际尺度　1960—2013 年,山东省平均相对湿度空间分布大致沿纬向分布,从东部沿海向西部内陆逐渐递减。年均相对湿度最大与最小值差异达到 17.1%,而且空间分布差异较大。其中:鲁东和鲁东南地区的年均相对湿度偏高,在 70%以上,如成山头(74.1%)等站点。鲁中、鲁西南和鲁西北地区的年均相对湿度偏低,济南(57.0%)的相对湿度为全省最低值。总体来看,山东近 54 a 相对湿度的空间分布呈

“东多西少”的特点。

近50 a来，山东省相对湿度整体呈下降趋势，其中个别站点呈上升趋势(附图1)。全省各站点的变化速率在－1.55%/10 a～0.96%/10 a之间，不同区域相对湿度的变化速率并不一致。鲁东地区的龙口站年均相对湿度减小速率最大，变化速率为－1.55%/10 a；而鲁西南的兖州站年均相对湿度的增加趋势最大，速率为0.96%/10 a。其中有38.9%的气象站点的相对湿度呈增加态势，主要集中在鲁西南地区、鲁中山区和鲁东小部分地区，只有兖州、长岛、莘县和潍坊的相对湿度变化趋势通过检验($p<0.05$)。而在鲁西北、鲁东南地区以及鲁中和鲁东大部分地区呈下降趋势，除沂源、莒县、济南、惠民和青岛5个站点以外，其他站点均达到$p<0.05$水平下的显著性检验。由此可见，1960—2013年山东相对湿度变化的空间分布呈东部下降快，西部下降缓慢的特点。

2.2.2 季节尺度 春季相对湿度的变化速率在－2.24%/10 a～1.28%/10 a之间，变化率最大值和最小值差异较大。其中：鲁西北、西南及鲁中地区下降缓慢，鲁西南的莘县(0.61%/10 a)、兖州(1.28%/10 a)呈上升趋势，而鲁东及鲁东南地区下降速率大。夏季相对湿度的变化速率在－1.40%/10 a～0.89%/10 a之间，鲁东和鲁东南地区下降速度快，同时鲁中、鲁西北和鲁西南的相对湿度下降趋势缓慢。秋季全省相对湿度的变化趋势在－1.79%/10 a～0.78%/10 a之间，鲁东地区相对湿度下降速率最显著，而鲁西南、西北、东南和鲁中地区下降缓慢。冬季相对湿度的变化速率在－1.34%/10 a～1.14%/10 a之间，在4个季节中下降速率最缓慢，其中鲁西北和鲁东站点的相对湿度下降速度最快，而鲁西南、东南和鲁中的其他站点下降缓慢。总体来说，山东省各季节相对湿度的下降空间变化呈“东快西慢”的格局(附图2)。

2.3 高空相对湿度变化特征

1960—2012年，山东省高空平均相对湿度呈现出降低的变化趋势(图3)。其中：对流层中下层的减小幅度较大，为－2.16%/10 a，且达到$p<0.001$的显著性水平；而对流层上层的减小速率未通过显著性水平检验(－1.86%/10 a)。季节尺度上各高度层的相对湿度变化特征与年均相对湿度相似，均呈减小趋势。其中对流层中下层夏季和秋季呈极显著的下降趋势(分别为－1.69%/10 a和－2.70%/10 a)，春季和冬季呈显著($p<0.05$)的减小趋势；而对流层上层(除夏季以外)均呈不显著的下降趋势。综上所述，1960—2012年山东省相对湿度各高度层呈相似的变化趋势，而且对流层中下层的减小趋势要比对流层上层的趋势明显。

从变化的贡献率来看，对流层中下层秋季的相对湿度变化对年变化的贡献率最大(图3)，为33.0%，其次是冬季(26.4%)，而夏季的贡献率最小，仅为18.8%。而对流层上层相对湿度变化贡献率最大的是夏季(37.1%)，紧接着是秋季(34.9%)，最小的是春季(13.2%)。

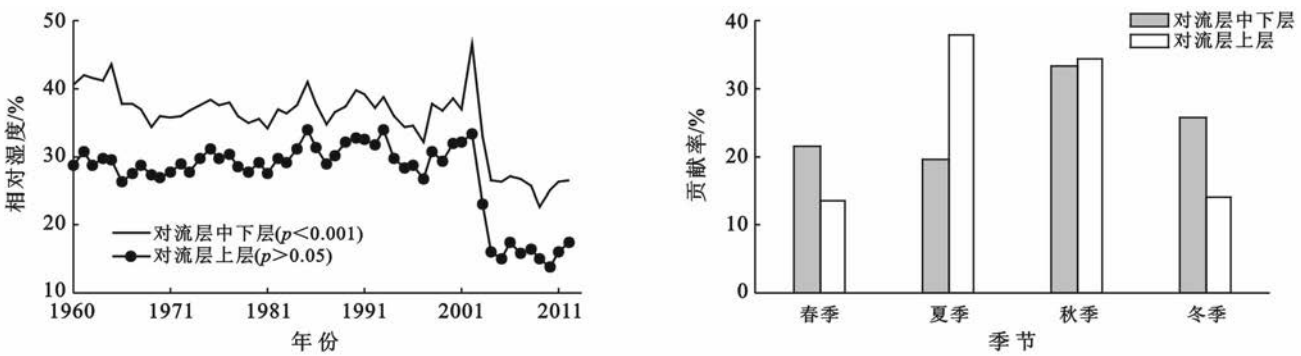


图3 1960－2012年山东省对流层相对湿度年均变化趋势及变化季节贡献率

2.4 敏感性分析

诸多研究表明，气温、降水和气候干湿程度与相对湿度变化关系密切[22,26]，但是相对湿度与各气候要素之间的定量关系尚不明确。因此，运用敏感性分析法，揭示各气候要素对相对湿度的影响程度。

敏感性分析表明，近地面相对湿度对干旱指数的敏感性最高，敏感系数为－1.55，其次是对降水量的敏感性(0.09)，而其对气温的敏感性最低，为－0.07。这表明干旱指数、降水量和气温分别变化1%，将分别引起近地面相对湿度变化－1.55%，0.09%和－0.07%。而高空相对湿度也对干旱指数最为敏感，系数为－1.96，其次是近地面气温(－0.15)，而其对地面降水的敏感性最低，仅为0.06，意即近地面干旱指数、气温和降水量分别变化1%，将分别导致高空

相对湿度变化－1.96%、－0.15%和 0.06%。这一方面说明近地面和高空相对湿度均是对干旱指数最为敏感,另一方面说明相对湿度与气温和干旱指数变化呈反比。

3　结 论

(1) 1960—2012 年,山东省近地面相对湿度呈不显著的减小趋势($p>0.05$),其变化速率为－0.23%/10 a,而且不同年代变化速率不同。从不同季节来看,春季(－0.45%/10 a)、夏季(－0.18%/10 a)和秋季(－0.42%/10 a)变化趋势相似,均呈下降趋势,而冬季呈上升趋势。

夏季的相对湿度最高,为 78.8%,但从季节变化贡献率来看,秋季的贡献率最高,季节贡献率由大到小依次为:秋季>春季>冬季>夏季。

(2) 在空间上,相对湿度呈现出从东部沿海向西部内陆递减的分布特征,空间分布受到降水量的影响。近地面各气象站的相对湿度整体呈下降的趋势(部分站点的呈上升趋势),全省各站点的变化率在－1.55%/10 a～0.96%/10 a 之间,只有 44%的站点的相对湿度变化趋势未通过显著性检验($p>0.05$)。近地面相对湿度下降趋势呈"东快西慢"的特点。

(3) 1960—2012 年,山东省高空相对湿度也呈现出下降趋势。其中对流层中下层相对湿度变化趋势显著,速率为－2.16%/10 a。从变化贡献率看,对流层中下层相对湿度变化的季节贡献率由大到小依次为:秋季>冬季>春季>夏季;对流层上层贡献率由大到小为:夏季>秋季>冬季>春季。

(4) 近地面和高空相对湿度对近地面干旱指数变化最为敏感。干旱指数增加 1%,将分别导致近地面和高空相对湿度降低 1.55%和 1.96%。而相对湿度对气温和降水量变化的敏感性明显小于干旱指数,敏感系数介于－0.15～0.09 之间。

[参 考 文 献]

[1] 秦大河, Thomas Stocker. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. 气候变化研究进展,2014,10(1):1-6.

[2] 郭维栋,马柱国,姚永红. 近 50 a 中国北方土壤湿度的区域演变特征[J]. 地理学报,2003,58(S1):83-90.

[3] Solomon S, Rosenlof K H, Portmann R W, et al. Contributions of stratospheric water vapor to decadal changes in the rate of global warming[J]. Science, 2010, 327:1219-1223.

[4] Song Yafang, Liu Yanju, Ding Yihui. A Study of Surface Humidity Changes in China During the Recent50 Years[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012,26(5):541-553.

[5] 曹丽青,余锦华,葛朝霞. 华北地区大气水汽含量特征及其变化趋势[J]. 水科学进展,2005,16(3):439-443.

[6] 刘秀兰. 青海省 500 hPa 高空湿度变化特征分析[J]. 青海气象,1996(3):8-11.

[7] 韩梅,杨利民,王少江,等. 吉林省中西部半干旱地区近 50 a 的降水与空气湿度变化[J]. 吉林农业大学学报,2003,25(4):425-428.

[8] Akinbode O M, Eludoyin A O, Fashae O A. Temperature and relative humidity distributions in a medium-size administrative town in southwest Nigeria[J]. Journal of Environmental Management, 2008,87(1):95.

[9] 卢宪梅,孙丽华,居丽玲. 秦皇岛市气候变化与影响及对策分析[C]//第 26 届中国气象学会年会气候变化分会场论文集,2009.

[10] 刘明春,杨晓玲,殷玉春,等. 武威市相对湿度气候特征及预报[J]. 干旱区研究,2012,29(4):654-659.

[11] 苏丽蓉. 近 50 a 旧白云机场湿度气候变化特征[J]. 广东气象,2006(4):38-41.

[12] 王满,许自成,苏永士,等. 河南烟区近 35 a 来相对湿度变化特征分析[J]. 环境科学与技术,2011,34(10):93-99.

[13] 王福淳. 近 55 年本溪县相对湿度变化特征及其影响因素分析[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(29): 11759-11760.

[14] 王立忠,杨茹,林涛. 吉林敦化市 50 年气候变化特征分析[C]//中国气象学会,2007 年年会气候变化分会场论文集,2007.

[15] 卢爱刚. 全球变暖对中国区域相对湿度变化的影响[J]. 生态环境学报,2013(8):1378-1380.

[16] 韩玮,韩永红,杨沈斌. 1961—2011 年山东气候资源及气候生产力时空变化特征[J]. 地理科学进展,2013,32(3):425-434.

[17] 龚佃利,边道相. 山东省空中水资源的初步分析[J]. 气候与环境研究,2002,7(4):474-482.

[18] Burn D H, Elnur M A H. Detection of hydrologic trends and variability[J]. Journal of Hydrology, 2002, 255(1/4):107-122.

[19] Belle G V, Hughes J P. Non-parametric test for trend in water quality[J]. Water Resources Research, 1984, 20:127-136.

[20] Hirsch R M, Slack J R, Smith R A. Techniques of trend analysis for monthly water quality data[J]. Water Resources Research, 1982,18(1):107-121.

[21] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,1999.

[22] 郭艳君,丁一汇. 1958—2005 年中国高空大气比湿变化[J]. 大气科学,2014,38(1):1-12.

(下转第 230 页)

域景观格局变化的主要因素，随着社会经济活动对红碱淖地区景观格库的驱动作用，沙地、耕地可能会不断增加，如果不采取措施，人类各项开发等综合活动将继续加剧区域内水体、林草地等景观类型的退化。

4 结论

(1) 从土地利用类型上看，红碱淖地区土地利用结构改变较快，从1990—2015年，水体面积减少了29.50 km^2，耕地面积增加了46.63 km^2，沙地面积增加了286.78 km^2，林草地面积减少了312.80 km^2，建筑用地面积变化不大，矿产地面积2005年出现后改变不多。

(2) 从土地利用变化速度来看，各土地利用类型相互转化的综合年变化率有增大的趋势，表明人类活动强度逐渐增强对土地覆被的影响逐渐加大。

(3) 陕北红碱淖研究区1990—2015年，景观格局不断发生变化，景观整体分布趋向复杂化，景观破碎化程度加大，景观类型之间转换频繁，各景观类型分布不均，形状不规则(水体除外)。

[参 考 文 献]

[1] 孙睿，朱启疆. 中国陆地植被净第一性生产力及季节变化研究[J]. 地理学报，2000，50(1)：36-45.

[2] 刘纪远，张增祥，徐新良，等. 21世纪初中国土地利用变化的空间格局与驱动力分析[J]. 地理学报，2009，64(12)：1411-1420.

[3] 唐华俊，吴文斌，杨鹏，等. 土地利用/土地覆被变化(LUCC)模型研究进展[J]. 地理学报，2009，64(4)：457-468.

[4] 田锡文，王新军，卡迪罗夫 K G，等. 近40 a凯拉库姆库区土地利用/覆盖变化及景观格局分析[J]. 农业工程学报，2014，30(6)：232-241.

[5] 刘吉平，赵丹丹，田学智，等. 1954—2010年三江平原土地利用景观格局动态变化及驱动力[J]. 生态学报，2014，34(12)：3234-3244.

[6] 高志强，刘纪远，庄大方. 基于遥感和GIS的中国土地利用/土地覆盖的现状研究[J]. 遥感学报，1999，3(2)：134-139.

[7] 吴莉，侯西勇，徐新良，等. 山东沿海地区土地利用和景观格局变化[J]. 农业工程学报，2013，29(5)：207-217.

[8] 张会英，刘萍萍，李旭祥. 陕北红碱淖流域土地利用动态变化研究[J]. 环境科学与技术，2011，34(3)：180-183.

[9] 刘英，吴立新，岳辉. 基于Landsat和HJ卫星影像的红碱淖面积变化趋势分析[J]. 地理与地理信息科学，2015，31(5)：60-64.

[10] 刘英，岳辉. 基于SMMI的红碱淖湖区面积遥感分析[J]. 科学技术与工程，2016，16(16)：125-130.

[11] 谭良玺，张会英，张瑞芳，等. 陕北红碱淖流域景观格局变化研究[J]. 西安交通大学学报，2010，44(3)：126-132.

[12] 刘纪远. 中国资源环境遥感宏观调查与动态研究[M]. 北京：中国科学技术出版社，1996：158-188.

[13] 尹立河，张茂省，董佳秋. 基于遥感的毛乌素沙地红碱淖面积变化趋势及其影响因素分析[J]. 地质通报，2008，27(8)：1151-1156.

[14] 赵宁，马超，杨亚莉. 1973—2013年红碱淖水域水质变化及驱动力分析[J]. 湖泊科学，2016，28(5)：982-993.

[15] 杨立彬，黄强，武见，等. 红碱淖湖泊面积变化影响因素及预测分析[J]. 干旱区资源与环境，2014，28(3)：74-78.

[16] 李登科，何慧娟，刘安麟. 人类活动和气候变化对红碱淖植被覆盖变化的影响[J]. 中国沙漠，2010，30(4)：831-836.

[17] 马雄德，范立民，张晓团，等. 榆神府矿区水体湿地演化驱动力分析[J]. 煤炭学报，2015，40(5)：1126-1133.

(上接第223页)

[23] 杨胜天，刘昌明，孙睿. 黄河流域干旱状况变化的气候与植被特征分析[J]. 自然资源学报，2003，18(2)：136-141.

[24] Zheng Hongxing, Zhang Lu, Zhu Ruirui ,et al, Fukushima Y. Responses of streamflow to climate and land surface change in the headwaters of the Yellow River Basin[J]. Water Resources Research, 2009, 45(7): 641-648.

[25] Li Baofu, Chen Yaning, Chen Zhongsheng, et al. Why does precipitation in northwest China show a significant increasing trend from1960 to 2010? [J]. Atmospheric Research, 2016, 167: 275-284.

[26] 刘玉英，李宇凡，谢今范，等. 东北高空湿度变化特征及其与地面气温和降水的关系[J]. 地理科学，2016，36(4)：628-636.