

周顺武, 马悦, 宋瑶, 等. 2015. 中国东部地区冬季和夏季地面湿度空间分布特征的对比分析 [J]. 气候与环境研究, 20 (5): 589–599. Zhou Shunwu, Ma Yue, Song Yao, et al. 2015. Comparison between the spatial distribution of surface humidity in winter and summer over East China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (5): 589–599, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15035.

中国东部地区冬季和夏季地面湿度空间分布特征的对比分析

周顺武¹ 马悦¹ 宋瑶¹ 王传辉² 丁锋³

¹ 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

² 安徽省气象局, 合肥 230031

³ 青岛市气象灾害防御工程技术研究中心, 青岛 266003

摘要 利用中国东部地区 315 个台站 1963~2012 年月平均地面观测资料, 揭示了东部地区冬季和夏季地面比湿 (SH) 和相对湿度 (RH) 多年平均值及其变率的空间分布特征, 并分析和比较了地理因素 (经度、纬度和海拔高度) 对其空间分布的影响。结果表明: 1) 在冬季, SH ($0.4\sim 7\text{ g kg}^{-1}$) 以秦岭—淮河线为界, 呈现出“北低南高”的分布特征; RH (41%~82%) 则呈现出“南北高、中间低”的分布特征; 一般冬季地面湿度相对较低的地区其变化幅度相对较大。2) 在夏季, SH ($7\sim 20\text{ g kg}^{-1}$) 整体上明显大于冬季, RH (44%~89%) 则与冬季差异不大, 均呈现由东南部沿海向西北内陆递减的分布特征; 同样夏季地面湿度较低的地区通常其变化幅度也相对较大。3) 东部地区冬季地面湿度空间分布受地理因素影响, 其中纬度是最主要的影响因素, 经度次之, 海拔高度对其整体分布影响不明显, 且地理因素对冬季 SH 的回归效果明显好于对冬季 RH 的回归效果。4) 东部地区夏季地面湿度空间分布受地理因素影响较冬季显著, 纬度同样是影响夏季地面湿度最主要的因素, 但海拔高度对夏季 SH、经度对夏季 RH 的影响程度较冬季增大, 且地理因素对夏季 SH 的回归效果同样好于对 RH 的回归效果。

关键词 比湿 相对湿度 空间分布

文章编号 1006-9585 (2015) 05-0589-11

中图分类号 P468.0+23

文献标志码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15035

Comparison between the Spatial Distribution of Surface Humidity in Winter and Summer over East China

ZHOU Shunwu¹, MA Yue¹, SONG Yao¹, WANG Chuanhui², and DING Feng³

¹ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

² Anhui Meteorological Bureau, Hefei 230031

³ Qingdao Engineering Technology Research Center of Meteorological Disaster Prevention, Qingdao 266003

Abstract Based on the monthly mean surface dataset from 315 weather stations during 1963–2012, the spatial distribution characteristics of specific humidity (SH) and relative humidity (RH) over East China are analyzed. The results are as follows: 1) In winter months, the mean values of SH ($0.4\sim 7\text{ g kg}^{-1}$) show zonal spatial distribution decreasing with latitude, while the mean values of RH (41%–82%) present the feature of a lower value in the central than in the northern

收稿日期 2015-02-16; 网络预出版日期 2015-07-14

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2012CB955204, 国家自然科学基金项目 41275095, 中国气象局气象关键技术集成与应用项目 CMAJG2013M28, 山东省气象局课题 2014sdqx01

作者简介 周顺武, 男, 1968 年出生, 博士, 教授, 主要从事气候动力学研究。E-mail: zhou@nuist.edu.cn

and southern sides of the region. The relative variability of SH and RH are also discussed, revealing higher values of relative variability in areas with a lower value of SH and RH during the winter months. 2) In summer months, the values of SH ($7\text{--}20\text{ g kg}^{-1}$) are generally higher than in winter months, but the RH values (44%–89%) have little changes. Both SH and RH decrease from the southeast coast to northwest inland over East China. The spatial distribution of relative variability in summer months shows the lower mean values of surface humidity denoting lower mean values of SH or RH denoting higher values of SH or RH relative variability. 3) The spatial distribution of surface humidity in winter is deeply affected by the geographical location over East China. Specifically, surface humidity in winter is mainly dependent on latitude, but longitude also plays a role. However, surface humidity is not sensitive to elevation. Moreover, the distribution characteristics of SH are more dependent on the geography than RH in winter. 4) In contrast, the influence of geographical factors on the surface humidity distribution is more obvious in summer than in winter. In summer, surface humidity is also largely dependent on latitude, but the influence of elevation on SH and longitude on RH becomes more significant in summer than in winter. The geographical characteristics of the SH distribution are also stronger than for RH in summer.

Keywords Specific humidity, Relative humidity, Spatial distribution

1 引言

水汽在全球水分和能量循环中扮演重要角色,也是重要的温室气体之一 (Trenberth et al., 2005; 赵天保等, 2013)。表征水汽的物理量有比湿、相对湿度、露点温度和水汽压等,其中比湿 (Specific Humidity, 以下简称为 SH, 记为 S_H) 是水汽与湿空气的质量之比 (单位: g kg^{-1}), 与其他湿度参量相比, SH 直观反映了大气中可利用水汽的绝对质量 (王名才, 1994; 郭艳君和丁一汇, 2014)。相对湿度 (Relative Humidity, 以下简称为 RH, 记为 R_H) 作为实测数据, 其定义为实际 SH 与饱和 SH 比值的百分数, 表征了大气中水汽的相对饱和程度 (盛裴轩等, 2003)。SH 和 RH 分别体现了水汽不同方面的特征, 研究表明, SH、RH 与气温和降水的关系也有区别: 气温与 SH 呈正相关, 与 RH 呈负相关 (Vicente-Serrano et al., 2014); SH 主要通过改变大气的可降水量影响降水强度, RH 则主要通过影响水汽凝结而影响降水发生概率 (Lu and Takle, 2010)。与高空湿度相比, 地面湿度还控制着地面蒸发过程, 是影响地表水分和能量收支 (Trenberth et al., 2005)、气溶胶光学效应 (高慧等, 2012)、雾霾的形成 (丁一汇和柳艳菊, 2014) 以及人体舒适度 (Alberdi et al., 1998) 的关键变量。因此, 了解 SH 和 RH 的空间分布具有重要意义。

早期主要关注高空大气的水汽变化 (谢义炳和戴武杰, 1959), 20 世纪末 Zhai and Eskridge (1997) 分析了全国范围内大气水汽的气候分布特征, 此后不少学者研究了中国不同区域的高空水汽变化特

征 (王秀荣等, 2003; 胡文超等, 2005; Zhou et al., 2012; 郭艳君和丁一汇, 2014)。近年来有关地面湿度的研究也逐渐增多, Wang and Gaffen (2001) 根据中国 196 个台站 1961~1990 年的观测资料分析了地面 SH 的气候学分布特征, 指出主要受东亚季风的影响, SH 夏季最大, 冬季最小。王遵娅等 (2004) 分析了我国 1951~2000 年地面 RH 的长期线性变化趋势, 发现青藏高原和西北地区 RH 存在明显的上升趋势, 而在东北地区则表现出显著的下降趋势。Song et al. (2012) 分析了中国东部地区 SH 和 RH 的长期变化趋势, 发现近半个世纪以来, 华北、东北地区 SH 和 RH 分别呈现出上升和下降趋势。马悦等 (2014) 分析了 1962~2012 年中国东部地区冬夏季 RH 均值、变率和变化趋势, 并讨论了 RH 与降水的空间耦合关系。

降水和气温是影响地面湿度的 2 个重要的变量, 许多研究讨论了地理因素对降水、气温空间分布的影响。张俊岚等 (2003) 采用线性回归方法分别讨论了经度、纬度和海拔高度等地理因素对阿克苏地区气温、降水的影响。舒守娟等 (2007, 2009) 利用中国区域内 394 个气象站 1956~2000 年的资料, 分别建立了年、季降水和气温与经度、纬度和海拔高度的多元线性回归方程, 以此估算了地理因素对降水和气温空间分布的影响。黄茂栋和张璞 (2009) 在多元回归的框架下, 分析了局地地理因素对乌鲁木齐市降水空间分布的影响。除降水和气温外, 张文杰等 (2014) 使用经度、纬度和海拔高度等数据估算了祁连山地区 1970~2009 年冻土分布特征。韩芳等 (2014) 则采用以经度、纬度和山体基面高度为自变量的三元一次方程, 拟合了自变

量对青藏高原及周边地区雪线变化的影响。

中国东部地区（指 110°E 以东）处于东亚季风区，冬、夏季气候差异明显 (Zhai and Eskridge, 1997)，且南北跨度大、地形复杂，以往研究中较少关注东部地区冬、夏季地面湿度的季节差异；地面湿度是作为降水和气温的综合变量，因此地理因素必然影响着地面湿度的空间分布，过去很少对此进行关注。根据中国东部地区的地理及气候差异，本文将东部地区划分成 3 个不同地理气候区，在分析了冬夏季地面湿度气候平均值及其变率的空间分布的基础上，基于冬夏季 SH 和 RH 与地理因素（经度、纬度和海拔高度）建立的多元线性方程的回归结果，比较地理因素对中国东部地区不同季节地面湿度空间分布的影响。

2 资料与方法

2.1 资料及来源

文中所用资料为中国气象局国家气象信息中心资料室提供的中国 740 个地面观测逐月资料，从中选取中国东部（110°E 以东）具有 1963~2012 年完整观测记录的 315 个地面观测站的 RH、地面气压 p （单位：hPa）和水汽压 e （单位：hPa）资料以及台站信息中的经度、纬度和海拔高度资料（315 个站点地理位置和地形见图 1）。由于 SH 无实测资料，故利用公式（1）由各站观测到的逐月 e 和 p 计算出各站逐月的 SH。

2.2 地理气候分区

中国东部地区地域辽阔，从西北往东南，跨越高山、盆地、平原以及低山和丘陵，地势大致为西高东低。胡焕庸线（即黑河—腾冲线）是中国的地理人口分界线，在气候学上，胡焕庸线与年降水量 400 mm 等值线基本重合，是中国半湿润和半干旱区的分界线（杨建平等，2005）。秦岭—淮河线则是中国东部地区南方和北方的地理气候过渡线（王菱等，2004），其基本与气候学上年降水量 800 mm 的等值线以及 1 月 0°C 等温线重合，这也是中国东部半湿润和湿润区的分界线（严登华等，2011）。据此，以中国这两条最重要的自然地理界线，将中国东部地区从北至南分为胡焕庸线西侧，表示半干旱区（以下简称 I 区），胡焕庸线东侧和秦岭—淮河线之间，表示半湿润区（以下简称 II 区）以及秦岭—淮河线南侧（表示湿润区，以下简称 III 区）。

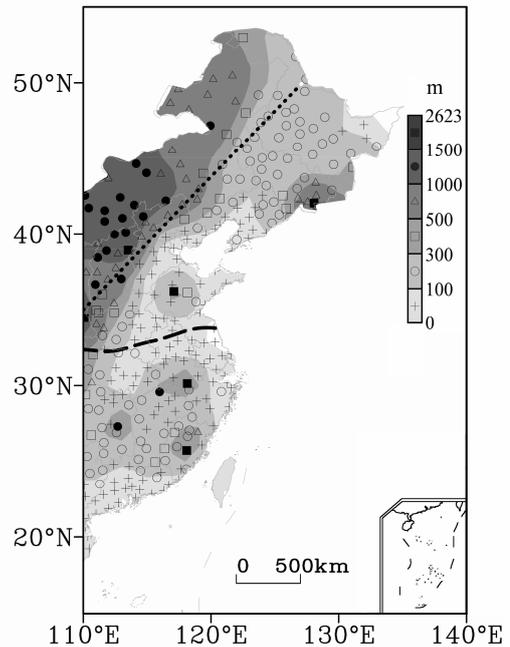


图 1 中国东部地区 315 个站点及其海拔高度（阴影）（标记为站点位置，不同标记表示不同的海拔高度范围；短虚线为胡焕庸线；长虚线为秦岭—淮河线）

Fig. 1 Distribution of 315 stations and their elevations (shaded) [symbols indicate the station locations and different symbols indicate different elevation ranges; the short dashed line is the Hu line (the line connecting Heihe and Tengchong); the long dashed line indicates the Qinling Mountains-Huaihe line]

如图 1 所示的 3 个地理和气候分区也符合中国的地貌阶梯格局，且这 3 个分区与李炳元等（2013）应用 GIS 方法得到的中国地貌大区划基本类似；同样也与卞娟娟等（2013）通过干燥度指标将东部地区划分的半干旱区、半湿润区和湿润区大致相符。

根据东部地区 315 个站点的台站信息，表 1 给出了 3 个分区经度、纬度和海拔高度的统计结果。由表 1 并结合图 1 可以看出，I 区与 II 区的纬度差异相对不明显，但经度差异较大；III 区与 I 区和 II 区的纬度差异明显。3 个区的海拔高度差异较大，I 区的海拔高度最高（平均海拔高度为 841.1 m），全区海拔高度超过 500 m 的站点占该区的 78.2%；II 区站点海拔高度较低（平均海拔高度为 213.9 m），其中海拔高度在 100 m 以下以及在 100~500 m 之间的站点分别占总站点的 46.7% 和 43.9%；III 区站点海拔高度最低（平均约为 145.2 m），海拔高度低于 100 m 的站点占到 61.2%。I 区高海拔地区集中在其南部的内蒙古高原东部；II 区主要包括低海拔的东北平原和华北平原；而 III 区北

表 1 3 个地理气候区的经度、纬度及海拔高度

Table 1 Longitudes, latitudes, and elevations in three subdivisions

分区	经度			纬度			海拔高度/m			总数	各高度的站点数			
	最东	最西	平均	最北	最南	平均	最高	最低	平均		≥1000 m	500~1000 m	100~500 m	≤100 m
I 区	127.45°E	110.43°E	116.61°E	52.97°N	36.70°N	43.77°N	2208.3	145.9	841.1	55	19	24	12	0
II 区	132.97°E	110.08°E	120.78°E	49.43°N	32.00°N	39.56°N	2623.9	20.0	213.9	139	5	8	61	65
III 区	122.45°E	110.03°E	115.30°E	31.98°N	16.83°N	26.87°N	1840.4	11.0	145.2	121	4	2	41	74

部为长江中下游平原，中部为诸多山脉（武夷山、罗霄山岭等），南部为武夷山与南岭以南的无冬区。

2.3 计算公式及统计方法

(1) SH 的计算。基于各站观测的逐月 e 和 p 得到逐月 SH 值（盛裴轩等，2003）：

$$S_H = 622e/p. \quad (1)$$

(2) 冬、夏季平均地面湿度平均值和变率的计算。根据公式 (1) 计算得到历年逐月的 SH 和观测得到的逐月的 RH，依次建立东部地区各站近 50 a 冬季（12 月至次年 2 月）和夏季（6~8 月）的 SH 和 RH 序列。在此序列基础上，分别计算出各站冬夏季地面湿度的多年平均值 m 和标准差 s ，基于各站的地面湿度均值和标准差，可得到地面湿度的相对变率（以下简称为变率， v_{ar} ）为

$$v_{ar} = s/m. \quad (2)$$

(3) 地理因素（经度、纬度和海拔高度）对地面湿度空间分布影响程度的比较。由于研究区域东部临海且地形复杂，使得区域内地面湿度与经度、纬度和海拔高度等形成复杂的相关关系。因此，以东部整体（站点数 $n=315$ ）以及 3 个分区内（I 区： $n=55$ ；II 区： $n=139$ ；III 区： $n=121$ ）的站点数作为样本量，选择经度 (λ)、纬度 (φ) 和海拔高度 (h) 这 3 个地理因子作为自变量，将地面湿度作为因变量，为便于比较经度、纬度和海拔高度对地面湿度空间分布影响的相对重要性，将上述所有变量进行了标准化处理，建立地理因素影响 SH (RH) 的回归模型：

$$S_H(R_H) = \alpha\lambda + \beta\varphi + \gamma h + \varepsilon, \quad (3)$$

其中， α 、 β 和 γ 分别为经度、纬度和海拔高度项的回归系数， ε 为回归方程的残差。基于最小二乘法的多元线性回归分析原理（黄嘉佑，1990）可知，回归方程中各变量的标准化系数正负号及其大小即表示该变量对地面湿度的正负贡献及其贡献大小。当回归模型某项的系数为正（负）时，表示该项的线性变化率为正（负），即该项的单位变化量将引起地面湿度的增加（减小），且线性变化率的大小表示对地面湿度的影响程度（黄茂栋和张璞，

2009）。对回归参数的相关性进行 t 检验，对回归模型的显著性进行 F 检验，回归方程的拟合能力则通过回归模型的方差贡献 (R^2 ，即判定系数) 衡量（江志红等，2013）。

3 地面湿度的空间分布特征

3.1 多年平均值的空间分布

中国东部地区冬、夏季气候差异明显：冬季盛行偏北风，寒冷干燥；夏季盛行偏南风，温暖湿润。因此其地面湿度的空间分布理应存在明显的季节差异，以下分季节讨论中国东部地区地面湿度空间分布特征。

3.1.1 冬季地面湿度空间分布

图 2 分别给出了中国东部近 50 a 的冬季多年平均的地面湿度空间分布。东部地区冬季 SH 值介于 $0.4 \sim 7 \text{ g kg}^{-1}$ 之间（图 2a），等值线呈东西走向，其中 SH 为 3 g kg^{-1} 的等值线位于秦岭—淮环线附近，在秦岭—淮环线北侧（I 区和 II 区）SH 小于 3 g kg^{-1} ，其南侧（III 区）大于 3 g kg^{-1} ，故冬季 SH 以秦岭—淮河为界呈现出“北低南高”的纬向分布特征。此外，还可以看出在秦岭—淮环线北侧的 SH 南北梯度明显小于其南侧。

东部地区冬季 RH 平均值处在 $41\% \sim 82\%$ 之间（图 2b），图中 RH 为 70% 的等值线与冬季 SH 为 3 g kg^{-1} 的等值线（图 2a）的位置相对应，基本位于秦岭—淮环线附近。秦岭—淮环线南侧（III 区）为 RH 高值 ($>70\%$) 区，但高值 ($80\% \sim 82\%$) 基本出现在中部山区；此外在东北平原东北部以及大兴安岭地区也出现了 RH 次高值 ($>70\%$)；而 RH 低值 ($\leq 50\%$) 区主要位于华北西北部和东北西南部，最低值主要集中在胡焕庸线上内蒙古—河北—辽宁三省交汇处及长白山脚下；I 区的 RH 平均值介于 $55\% \sim 70\%$ ，其等值线分布呈东北—西南走向。整体而言，冬季 RH 表现出“南北高、中间低”的分布特征。

由此可见，冬季 SH 的空间分布主要受纬度影响，呈“北低南高”的纬向分布特征；冬季 RH 空间分布较 SH 复杂，受海拔高度及局地地形的影响明显，整体呈“南北高、中部低”的空间分布特征。

3.1.2 夏季地面湿度空间分布

进一步分析夏季地面湿度的空间分布，图 3 分别给出了东部地区夏季多年平均地面湿度的空间分布。夏季 SH 平均值处在 $7\sim 20\text{ g kg}^{-1}$ 之间（图

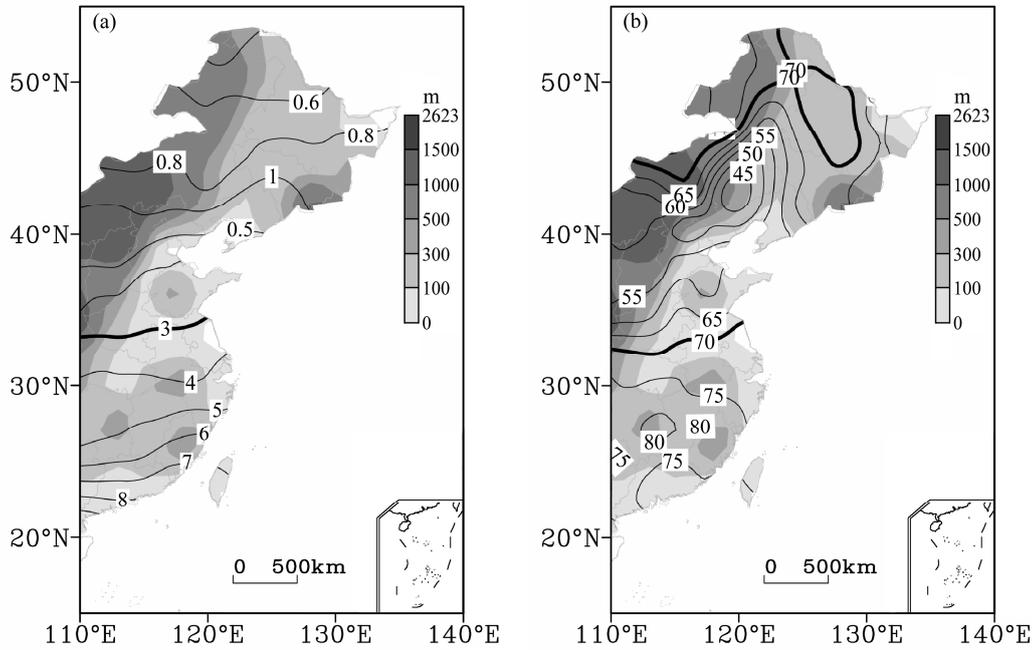


图 2 1963~2012 年冬季中国东部地区 (a) SH (单位: g kg^{-1} , 粗实线为 3 g kg^{-1} 等值线) 和 (b) RH (%) (粗实线为 70% 等值线) 多年平均值分布 (阴影为海拔高度, 下同)

Fig. 2 Climatological distributions of (a) specific humidity (SH, units: g kg^{-1} , thick solid line denotes 3 g kg^{-1} isoline) and (b) relative humidity (RH, %, thick solid line denotes 70% isoline) in winter over East China during 1963–2012 (shadings are elevations, same as the follows)

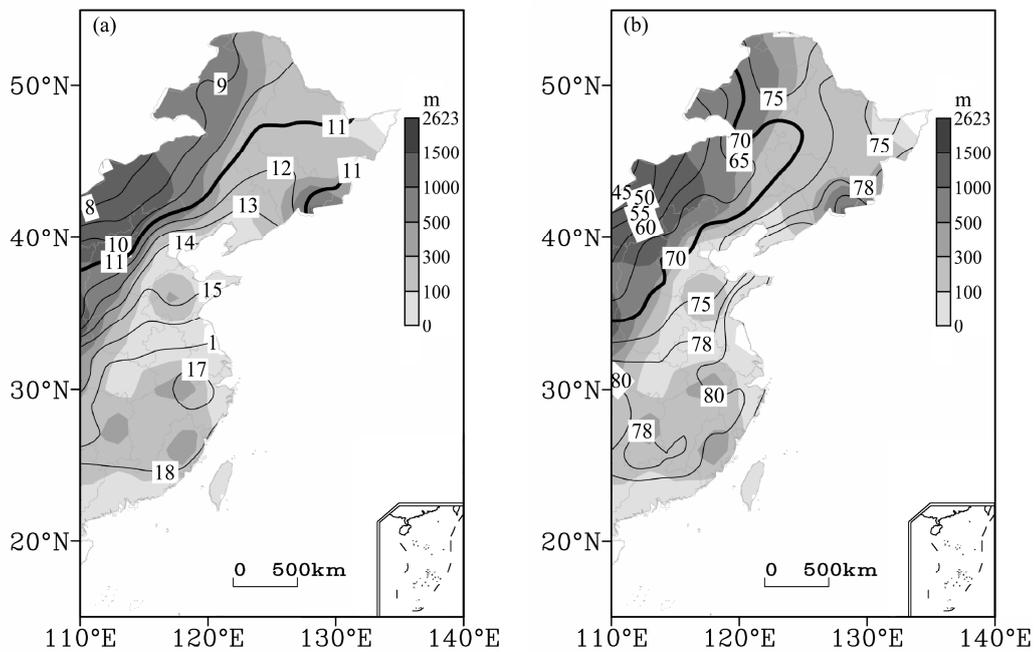


图 3 同图 2, 但为夏季 (a) SH (粗实线为 11 g kg^{-1} 等值线) 和 (b) RH (%) (粗实线为 65% 等值线)

Fig. 3 As in Fig. 2, but for the climatological distribution of (a) SH (thick line denotes 11 g kg^{-1} isoline) and (b) RH (thick line denotes 65% isoline) in summer

3a), 其数值明显高于冬季 SH 平均值 (图 2a)。夏季 SH 总体呈现出“北低南高”的空间分布特征: 秦岭—淮河线南侧(III区)为 SH 高值区($>17 \text{ g kg}^{-1}$), 表现出由南到北递减的纬向分布; 在秦岭—淮河线北侧(I区和II区)夏季 SH 等值线大致呈东北—西南走向, 从渤海湾向西北内陆递减, 其中 11 g kg^{-1} 的等值线大致位于胡焕庸线附近, I 区为 SH 低值($<11 \text{ g kg}^{-1}$)区, 而 II 区为过渡区(SH 在 $11\sim 17 \text{ g kg}^{-1}$ 之间)。

东部地区夏季多年平均 RH 值介于 $44\%\sim 89\%$ (图 3b), 该值略高于冬季的 RH 值 (图 2b), 其等值线整体上呈东北—西南走向, 从东南沿海向西北内陆递减。其中内蒙古高原东部和黄土高原西部为其低值($<65\%$)区, 但在大兴安岭地区为次高值($\geq 75\%$), 而东部沿海地区受海洋性气候以及夏季风的影响, 出现 $\text{RH}\geq 80\%$ 的高值区。

综上所述, 东部地区夏季湿润区地面湿度均明显大于其北侧的半湿润和干旱区, 大致呈现出由东南沿海向西北内陆递减的分布特征。而这种空间分布与我国夏季降水的空间分布比较相似(申乐琳等, 2010), 与夏季风水汽输送特征(周长艳等, 2005)基本对应。

3.2 变率的空间分布特征

进一步分析地面湿度的变化幅度, 计算冬夏季各站地面湿度的变率(标准差/平均值), 变率相对越大(小)的地区, 表明其年际变化幅度相对越大(小)。

3.2.1 冬季地面湿度变率的空间分布

图 4 分别给出了近 50 a 中国东部冬季地面湿度变率的空间分布。图 4a 中冬季 SH 变率介于 $0.08\sim 0.18$ 之间, 其中 SH 变率为 0.11 的等值线与多年平均值为 3 g kg^{-1} 的等值线基本对应, 也大致位于秦岭—淮河线附近。在秦岭—淮河线以北 SH 变率 >0.11 , 从渤海湾向内陆递增; 秦岭—淮河线以南 SH 变率基本稳定在 $0.08\sim 0.10$ 之间, 其空间分布差异不大。整体而言, 冬季 SH 变率的空间分布为南小北大, 与其多年平均值空间分布(图 2a)相反, 即 SH 均值较高(低)的地区其变率相对较低(高)。

冬季 RH 变率介于 $0.04\sim 0.13$ 之间(图 4b), 秦岭—淮河线附近 RH 变率为 0.06 的等值线与多年平均 RH 70% 的等值线位置(图 2b)基本对应。RH 变率低值区(<0.06)位于秦岭—淮河线以南的 III 区和东北平原东北部及大兴安岭地区, 分别对应

RH 高值和次高值(图 2b); RH 变率高值中心(>0.13)大致位于胡焕庸线附近的太行山脉, 但 RH 变率高值中心较其多年平均低值中心偏南。整体而言, 冬季 RH 变率与其多年平均值的空间分布也表现出反向分布的特征, RH 变率呈现出“南北低、中间高”的空间分布。

3.2.2 夏季地面湿度变率的空间分布

分析东部地区夏季地面湿度的变率, 图 5 分别给出了东部地区夏季地面湿度变率的空间分布。夏季 SH 变率介于 $0.02\sim 0.08$ 之间(图 5a), 由东南沿海向西北内陆递增, 其中 SH 变率为 0.055 的等值线基本与多年平均值为 11 g kg^{-1} 的等值线(图 3b)相对应, 大致位于胡焕庸线西侧; SH 变率为 0.04 的等值线走向与秦岭—淮河线一致。I 区为 SH 变率高值区, III 区为 SH 变率低值区。在秦岭—淮河线以北, SH 变率等值线的经向性分布越来越明显, 东部地区整体而言夏季 SH 变率分布与其多年平均值分布大体呈相反的空间对应关系: 夏季 SH 值越低(高)的地区, 其变化幅度反而越大(小)。

夏季 RH 变率的等值线呈现出由东南沿海向西北内陆递增的分布特征(图 5b), 而其多年平均值呈现出由东南沿海向西北内陆递减(图 3b), 其中夏季 RH 变率为 0.06 的等值线基本与夏季 RH 为 70% 的等值线相对应, 大致位于胡焕庸线西侧, I 区为 RH 变率高值区($0.05\sim 0.10$), III 区为 RH 变率低值区($0.03\sim 0.05$)。由以上分析可知, 夏季 RH 变率与其多年均值在空间分布上相反, RH 高(低)值区其变化幅度反而较小(大)。

4 地理因素对地面湿度空间分布的影响

中国东部地区地面湿度在空间分布上基本呈往北、往西而减少的基本分布型, 这种地面湿度的空间差异不仅受东亚季风的影响(Wang and Gaffen, 2001), 由于与地面湿度变化相关的其他气象因素(如降水、气温和气压等)在空间分布往往随经度、纬度和海拔高度的变化而变化, 因此地面湿度也受到经度、纬度和海拔高度等地理因素的影响。以下利用多元线性回归分别建立冬夏季地面湿度与经度、纬度和海拔高度的线性回归方程, 通过比较各项回归系数的大小和符号, 定量讨论各地理因素对不同季节地面湿度影响的相对重要性。

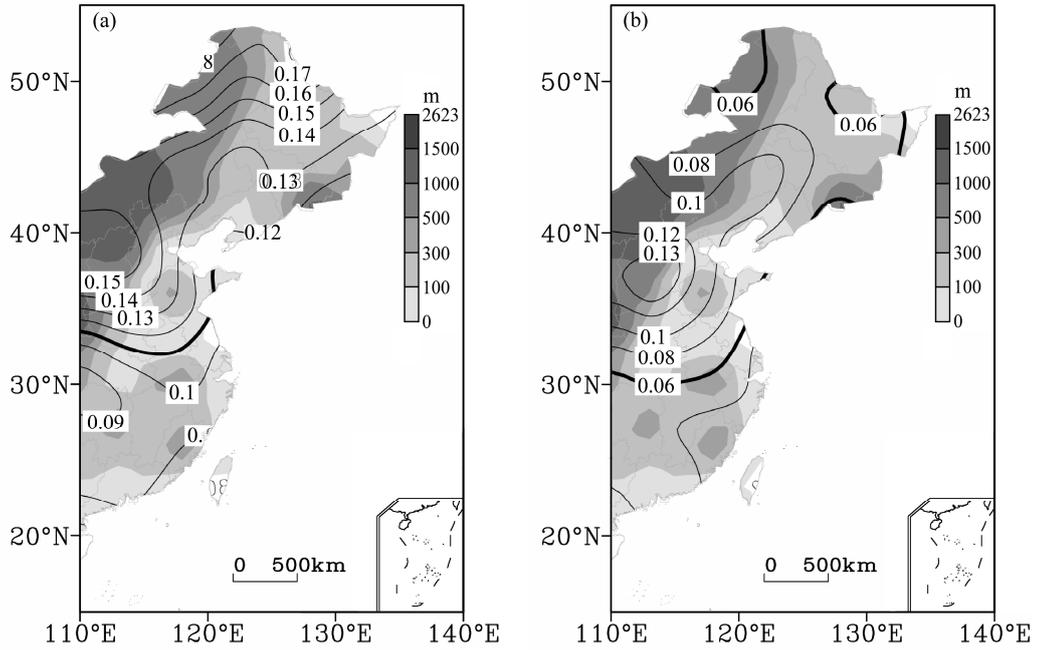


图 4 1963~2012 年冬季中国东部地区 (a) SH (粗实线是变率为 0.11 的等值线) 和 (b) RH (粗实线是变率为 0.06 的等值线) 变率分布

Fig. 4 Relative variability distribution of (a) SH (thick line denotes the SH variability 0.11 isoline) and (b) RH (thick line denotes the RH variability 0.06 isoline) in winter over East China during 1963–2012

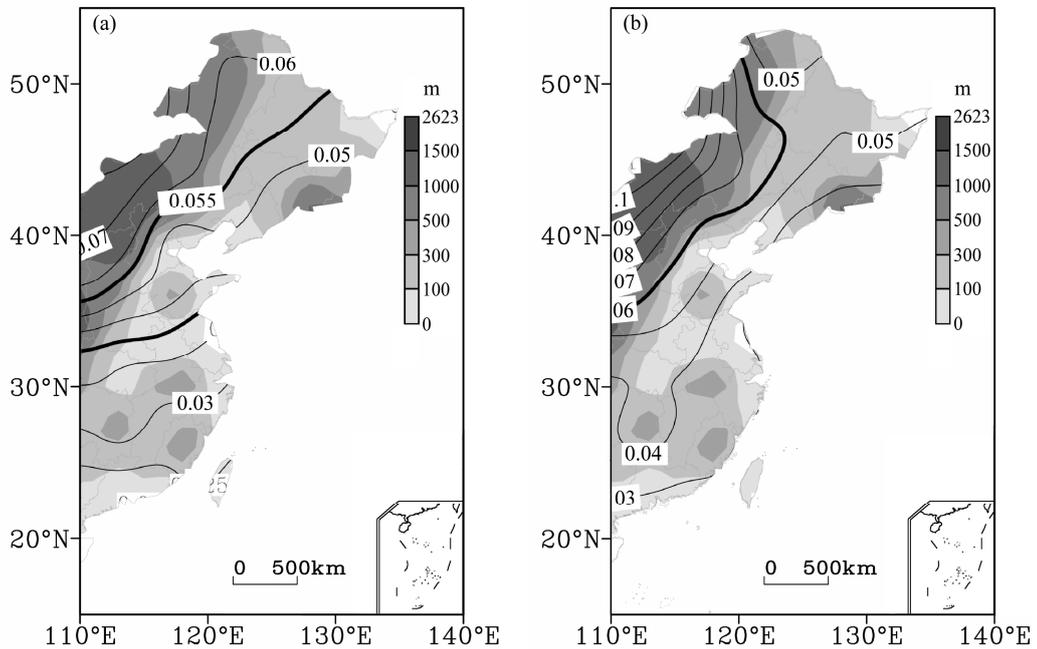


图 5 同图 4，但为夏季 (a) SH (粗实线是变率为 0.055 等值线) 和 (b) RH (粗实线是变率为 0.06 等值线) 变率分布

Fig. 5 As in Fig. 4, but for the relative variability distribution of (a) SH (thick line denotes the SH variability 0.055 isoline) and (b) RH (thick line denotes RH variability 0.06 isoline) in summer

4.1 对冬季地面湿度空间分布的影响

表 2 为整个东部地区及 3 个分区的冬季地面湿度与经度、纬度和海拔高度的线性回归结果。由表

可知，在冬季，整体东部地区和半湿润区、湿润区的 SH 空间变化与经度、纬度和海拔高度的回归关系通过了 0.01 信度的 *F* 检验。冬季 SH 与经度、纬

度及海拔高度回归模型的方差贡献达到 87.5%以上, 该回归模型可以很好地反映出其空间差异。对于东部整体而言, 冬季 SH 整体上受纬度影响最显著, 表现出明显的负相关关系, 即表明随纬度增加, 冬季 SH 显著减小; 而经度(海拔高度)对其有一定(较弱)的影响。但具体到 3 个分区, 回归效果有所不同, 但纬度的影响仍是主要的, 其次是各区海拔高度的影响(随海拔高度升高, 冬季 SH 减小), 由于中国东部地区东面临海, 故随经度变化实际上反映的是距离水汽源的远近程度, 半湿润区和湿润区还同时受到经度的影响(随经度增加, 冬季 SH 也增大)。总之, 东部地区冬季 SH 呈现出与纬度变化相一致的“北低南高”的纬向分布特征(图 2a)。

表 2 冬季地面湿度与经度、纬度和海拔高度的标准化三元线性回归结果

Table 2 Standard linear regressions between surface humidity and longitude, latitude, and elevation in winter

分区(样本数 n)	经度 (α)	纬度 (β)	海拔高度 (γ)	F 值	方差贡献
SH 东部 ($n=315$)	0.098**	-0.980***	-0.042	750.216	87.8%
I ($n=55$)	-0.201	-0.935***	-0.281**	170.384	90.6%
II ($n=139$)	0.178***	-1.076***	-0.116***	405.472	89.8%
III ($n=121$)	0.074*	-0.952***	-0.106**	278.777	87.5%
RH 东部 ($n=315$)	0.333***	-0.753***	-0.037	67.155	38.7%
I ($n=55$)	-0.366***	1.192***	0.324*	30.735	62.3%
II ($n=139$)	0.727***	-0.610***	-0.201*	12.316	39.7%
III ($n=121$)	0.030	-0.200	0.219*	3.168	5.1%

注: I 区: $F_{0.01}(3,51)=4.31$ 、II 区: $F_{0.01}(3,135)=3.78$ 、III 区: $F_{0.01}(3,117)=3.95$; *, **, *** 分别表示地面湿度与经度或纬度或海拔高度的线性关系通过了 0.05、0.01、0.001 信度的参数 t 检验(下同)。

较之冬季 SH, 经度、纬度和海拔高度的回归模型对冬季 RH 空间分布拟合能力明显偏弱, 整个东部地区回归方程的方差贡献仅为 38.7%, 湿润区的回归关系未通过显著性检验。因此, 冬季 RH 整体上表现出“南北高、中间低”的分布特征(图 2b)很难简单由地理因素清晰体现出来。就整体东部而言, 纬度同样是冬季 RH 空间分布最主要的影响因素, 越往北 RH 越小(半干旱区除外); 其次是经度的影响, 越往西 RH 越小(半干旱区除外); 而海拔高度的贡献不确定且影响较弱。具体到各区情况, 对半干旱区而言, 经度和纬度的影响均相反, 越往西或北 RH 反而越大, 由于该区海拔高度南高北低, RH 空间分布与海拔高度呈正相关关系。对半湿润区而言, 地理影响因子重要性依次为经度、纬度和海拔高度。但对湿润区而言, 经度、纬度对其均没

有明显的影响, 这可能与冬季 RH 在湿润区变化幅度小(图 4b)有关, 也可能是由于该区冬季 RH 与降水之间存在复杂的反馈, 因此很难单纯从地理因素给出该区冬季 RH 的分布规律。

上述分析表明, 对东部地区冬季地面湿度而言, 纬度是影响其空间分布最主要的因素, 地面湿度分布普遍随纬度增大而减小; 经度影响次之, 地面湿度通常随经度增大而增大, 且经度对 RH 空间分布的影响比对 SH 的影响大; 海拔高度对整个东部地区地面湿度的分布的影响不明显。但在具体各地理气候区中, 经度、纬度和海拔高度对冬季地面湿度空间分布的影响及其相对重要性存在差异。

4.2 对夏季地面湿度空间分布的影响

表 3 给出了夏季地面湿度与经度、纬度和海拔高度的回归结果。由表可知, 在夏季, 无论是整个东部地区还是各分区, 地面湿度的回归关系均通过了 0.01 信度的 F 检验。其中整个东部地区夏季 SH 回归模型的方差贡献高达 97.3%, 夏季 SH 整体上受纬度负贡献最显著, 其次是海拔高度的负贡献和经度的正贡献, 即随着纬度增加, 海拔高度升高以及经度减小, 夏季 SH 显著减小。因此, 夏季 SH 呈现出由东部沿海向内陆递减的带状分布特征(图 3a)。具体到各区这种关系依旧维持, 海拔高度的重要性得到了突显, 成为继纬度之后影响夏季 SH 空间变化的第二大因素, 而经度的影响程度相对较小, 特别是经度在湿润区的影响很弱。

表 3 夏季地面湿度与经度、纬度和海拔高度的标准化三元线性回归结果

Table 3 Standard linear regressions between surface humidity and latitude, longitude, and elevation in summer

分区(样本数 n)	经度 (α)	纬度 (β)	海拔高度 (γ)	F 值	方差贡献
SH 东部 ($n=315$)	0.075***	-0.846***	-0.364***	3836.401	97.3%
I ($n=55$)	0.633***	-1.319***	-0.775***	100.156	84.6%
II ($n=139$)	0.153***	-0.959***	-0.452***	926.263	95.3%
III ($n=121$)	0.030	-0.618***	-0.671***	345.536	89.6%
RH 东部 ($n=315$)	0.743***	-0.981***	-0.056	213.466	67.0%
I ($n=55$)	1.463***	-0.671***	0.330*	24.254	56.4%
II ($n=139$)	1.371***	-1.319***	0.049	73.222	61.1%
III ($n=121$)	0.39***	-0.45***	0.37***	17.121	28.7%

较之夏季 SH, 经度、纬度和海拔高度的回归模型对夏季 RH 空间变化的方差贡献有一定的减弱, 但其回归效果仍通过了信度检验, 只是对湿润区的回归效果相对较差。依旧表现出夏季 RH 随纬

度增加, 经度减小而减小。与夏季 SH 相比, 经度对夏季 RH 的影响程度大幅提高, 在秦岭—淮河线以北甚至成为最重要的影响因素, 越往西 RH 越小; 而海拔高度的影响最小, 甚至在各区夏季 RH 受海拔高度分布的影响, 呈现为正相关影响。故图 3b 中半干旱和半湿润区夏季 RH 呈现出从渤海湾向西北内陆递减的带状分布。

进一步对比表 2 和表 3 可知, 海拔高度对夏季 SH 空间分布、经度对 RH 空间分布的影响明显偏大, 这导致了经度、纬度和海拔高度的回归模型对地面湿度的反映程度在夏季高于冬季, 这很大程度上得益于夏季影响地面湿度的因素(如降水、气温及水汽输送等)较为规律的地理分布。总体而言, 夏季地面湿度的地理学分布特征较冬季明显, 同一季节 SH 的地理学分布特征又较 RH 明显。

SH 与 RH 分别体现了水汽不同方面的特征, 从两者的定义可知, RH 为 SH 与饱和 SH 比值的百分数, 其中饱和 SH 与气压、饱和水汽压直接相关, 而饱和水汽压又直接受气温的控制。因此相比于 SH, RH 更多地受气温和气压的影响, 这也可能是导致地理因素对 RH 和 SH 产生不同影响程度的主要原因。

5 结论与讨论

本文基于中国东部地区 315 个地面观测站 1963~2012 年的月平均资料, 并依据胡焕庸线和秦岭—淮河线将中国东部分成 3 个区(半干旱区、半湿润区以及湿润区), 比较了冬、夏季地面湿度(SH、RH)多年平均值和变率在空间分布上的异同, 另并定量分析了经度、纬度和海拔高度这些地理因素对地面湿度空间分布的影响程度。得到以下主要结论:

(1) 在冬季, 东部地区 SH 值 ($0.4\sim 7\text{ g kg}^{-1}$) 以秦岭—淮河线为界呈“北低南高”的纬向分布; 而 RH 值 ($41\%\sim 82\%$) 空间分布较 SH 复杂, 受海拔高度及局地地形的影响, 呈“南北高、中部低”的空间分布特征。

(2) 在夏季, 东部地区 SH 值 ($7\sim 20\text{ g kg}^{-1}$) 明显大于冬季, RH 值 ($44\%\sim 89\%$) 与冬季 RH 差异不大, 总体上地面湿度以秦岭—淮河线为界, 夏季湿润区地面湿度均明显大于其北侧的半湿润和干旱区, 大致呈现出由东南沿海向西北内陆递减

的分布特征。

(3) 冬季 SH 变率的空间分布为南小北大, 与其多年平均值空间分布相反, 即 SH 多年平均值较高(低)的地区其变率相对较低(高); 冬季 RH 变率与其多年平均值的空间分布也表现出反向分布的特征, RH 变率呈现出“南北低、中间高”的空间分布。

(4) 夏季地面湿度变率与其多年平均值在空间分布上基本相反, 呈现出由东南沿海向西北内陆递增, 地面湿度高(低)值区其变化幅度反而较小(大)。

(5) 东部地区冬季地面湿度空间分布普遍随纬度增大、经度减小而增大。其中, 纬度的影响最显著, 经度的影响其次; 海拔高度对其整体分布影响不大。纬度、经度和海拔高度的回归模型对 SH 的回归效果明显好于对 RH 的回归效果, 但在具体地理气候分区中, 经度、纬度和海拔高度对冬季地面湿度空间分布的影响及其相对重要性存在差异。

(6) 东部地区夏季地面湿度空间分布普遍同样随纬度增大、经度减小而增大。其中, 纬度的影响最显著, 经度的影响其次; 但海拔高度对 SH 的影响明显增大。纬度、经度和海拔高度回归效果在夏季高于冬季, 且对 SH 的回归效果同样好于对 RH 的回归效果, 在具体地理气候分区中, 经度、纬度和海拔高度对冬季地面湿度空间分布的影响及其相对重要性同样存在差异。

中国东部地区冬、夏季气候差异明显, 地面湿度的空间分布不仅和高空湿度空间分布一样受东亚季风影响, 且更多地受到地理地形等因素的影响, 地面湿度的空间分布远比高空湿度分布更复杂(郭艳君和丁一汇, 2014)。同时由于东部地区南北跨度大、地形地貌复杂, 本文仅依据胡焕庸线和秦岭—淮河线这两条自然地理分界线, 将东部地区简单划分为 3 个区, 应该说划分得还不够细致。基于最小二乘法的简单模型虽能较准确地定量地反映出地面湿度的地理分布, 但模型中仅考虑了经度、纬度和海拔高度因素之间的线性关系, 并没有将坡度、坡向、遮蔽度等因素考虑进来。

另外, 在全球增暖大背景下, 降水、气温和湿度三者相互联系, 它们之间存在复杂的反馈关系。本文仅从气候学角度分析地面湿度的空间分布特征以及地理因素对其的影响, 没有分析水汽输送、地面风速(熊敏谄, 2015)和土壤湿度(柳媛

普等, 2008) 等因素对地面湿度的影响。

此外, 文中直接使用了月平均地面水汽压和气压资料计算得到月平均 SH 是一种近似处理。为了验证上述方法计算中国东部地区的 SH 是否会带来较大误差, 以 2012 年为例, 通过对部分站点由逐月和逐日资料分别计算 SH, 结果表明两种方法得到的 SH 差别很小。另外, 台站资料在空间密度上还不够细, 而各种再分析资料虽具有时间序列长、覆盖范围广等特点, 但再分析资料中的地面湿度变量误差往往偏大导致其可信度相对偏低 (朱彦良等, 2012)。

参考文献 (References)

- Alberdi J C, Diaz J, Montero J C, et al. 1998. Daily mortality in Madrid community 1986–1992: Relationship with meteorological variables [J]. *European Journal of Epidemiology*, 14 (6): 571–578, doi: 10.1023/A:1007498305075.
- 卞娟娟, 郝志新, 郑景云, 等. 2013. 1951~2010 年中国主要气候区划界线的移动 [J]. *地理研究*, 32 (7): 1179–1186. Bian Juanjuan, Hao Zhixin, Zheng Jingyun, et al. 2013. The shift on boundary of climate regionalization in China from 1951 to 2010 [J]. *Geographical Research (in Chinese)*, 32 (7): 1179–1186.
- 丁一汇, 柳艳菊. 2014. 近 50 年我国雾和霾的长期变化特征及其与大气湿度的关系 [J]. *中国科学: 地球科学*, 44 (1): 37–48. Ding Yihui, Liu Yanju. 2014. Analysis of long-term variations of fog and haze in China in recent 50 years and their relations with atmospheric humidity [J]. *Science China Earth Sciences*, 57 (1): 36–46.
- 高慧, 翁宁泉, 孙刚, 等. 2012. 我国不同区域高空温度和相对湿度的分布特征 [J]. *大气与环境光学学报*, 7 (2): 101–107. Gao Hui, Wang Ningquan, Sun Gang, et al. 2012. Distribution feature of meteorology parameter of upper air of different areas in China [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics (in Chinese)*, 7 (2): 101–107.
- 郭艳君, 丁一汇. 2014. 1958~2005 年中国高空大气比湿变化 [J]. *大气科学*, 38 (1): 1–12. Guo Yanjun, Ding Yihui. 2014. Upper-air specific humidity change over China during 1958–2005 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese)*, 38 (1): 1–12, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12212.
- 胡文超, 白虎志, 董安祥. 2005. 中国西部空中水汽分布结构特征 [J]. *南京气象学院学报*, 28 (6): 808–814. Hu Wenchao, Bai Huzhi, Dong Anxiang. 2005. Distributive characters of water vapor in western China [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 28 (6): 808–814.
- 韩芳, 张百平, 谭清, 等. 2014. 山体基面高度对青藏高原及其周边地区雪线空间分布的影响 [J]. *地理研究*, 33 (1): 23–30. Han Fang, Zhang Baiping, Tan jing, et al. The effect of mountain basal elevation on the distribution of snowline with different mountain basal elevations in Tibetan Plateau and its surrounding areas [J]. *Geographical Research (in Chinese)*, 33 (1): 23–30.
- 黄茂栋, 张璞. 2009. 乌鲁木齐市地理地形因素对降水空间分布的影响 [J]. *气象科技*, 37 (1): 25–28. Huang Maodong, Zhang Pu. 2009. Influences of geographic and topographic factors on spatial distribution of precipitation in Urumchi [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 37 (1): 25–28.
- 黄嘉佑. 1990. 气象统计分析与预报方法 [M]. 北京: 气象出版社, 182–187. Huang Jiayou. 1990. *Meteorological Statistical Analysis and Forecasting Methods [M] (in Chinese)*. Beijing: China Meteorological Press, 182–187.
- 江志红, 杭月荷, 刘冬, 等. 2013. 我国南方输电线路覆冰极值序列重建试验 [J]. *气候与环境研究*, 18 (3): 407–413. Jiang Zhihong, Hang Yuehe, Liu Dong, et al. 2013. Reconstruction of an extreme wire icing series in southern China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 18 (3): 407–413.
- 李炳元, 潘保田, 程维明, 等. 2013. 中国地貌区划新论 [J]. *地理学报*, 68 (3): 291–306. Li Bingyuan, Pan Baotian, Cheng Weiming, et al. 2013. Research on geomorphological regionalization of China [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 68 (3): 291–306.
- 柳媛普, 吕世华, 李锁锁. 2008. 黄河源区草地农牧化对气候环境影响的数值模拟 [J]. *中国沙漠*, 28 (4): 733–740. Liu Yuanpu, Lü Shihua, Li Suosuo. 2008. Numerical simulation of grassland agricultural-pastoralization influencing climatic environment in source regions of Yellow River [J]. *Journal of Desert Research (in Chinese)*, 28 (4): 733–740.
- Lu E, Takle E S. 2010. Spatial variabilities and their relationships of the trends of temperature, water vapor, and precipitation in the North American Regional Reanalysis [J]. *J. Geophys. Res.*, 115 (D6), doi: 10.1029/2009JD013192.
- 马悦, 周顺武, 丁锋, 等. 2014. 中国东部地区冬夏季相对湿度变化特征 [J]. *气象与环境科学*, 37 (4): 1–7. Ma Yue, Zhou Shunwu, Ding Feng, et al. 2014. Change characteristic of relative humidity in winter and summer over East China [J]. *Meteorological and Environmental Sciences (in Chinese)*, 37 (4): 1–7.
- 申乐琳, 何金海, 周秀骥, 等. 2010. 近 50 年来中国夏季降水及水汽输送特征研究 [J]. *气象学报*, 68 (6): 918–931. Shen Lelin, He Jinhai, Zhou Xiuji, et al. 2010. The regional variabilities of the summer rainfall in China and its relation with anomalous moisture transport during the recent 50 years [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 68 (6): 918–931.
- 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 2003. 大气物理学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 18–24. Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. 2003. *Atmospheric Physics [M] (in Chinese)*. Beijing: Peking University Press, 18–24.
- 舒守娟, 王元, 熊安元. 2007. 中国区域地理、地形因子对降水分布影响的估算和分析 [J]. *地球物理学报*, 50 (6): 1703–1712. Shu Shoujuan, Wang Yuan, Xiong Anyuan. 2007. Estimation and analysis for geographic and orographic influences on precipitation distribution in China [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 50 (6): 1703–1712.
- 舒守娟, 王元, 储惠芸. 2009. 地理和地形影响下我国区域的气温空间分布 [J]. *南京大学学报 (自然科学)*, 45 (3): 334–342. Shu Shoujuan, Wang Yuan, Chu Huiyun. 2009. Spatial distribution of temperature in China: Geographic and orographic influences [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese)*, 45 (3): 334–342.
- Song Y F, Liu Y J, Ding Y H. 2012. A study of surface humidity changes in

- China during the recent 50 years [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 26 (5): 541–553, doi: 10.1007/s13351-012-0501-9.
- Trenberth K E, Fasullo J, Smith L. 2005. Trends and variability in column-integrated atmospheric water vapor [J]. *Climate Dyn.*, 24 (7–8): 741–758, doi: 10.1007/s00382-005-0017-4.
- Vicente-Serrano S M, Azorín-Molina C, Sánchez-Lorenzo A, et al. 2014. Temporal evolution of surface humidity in Spain: Recent trends and possible physical mechanisms [J]. *Climate Dyn.*, 42 (9–10): 2655–2674, doi: 10.1007/s00382-013-1885-7.
- Wang J X L, Gaffen D J. 2001. Late-twentieth-century climatology and trends of surface humidity and temperature in China [J]. *J. Climate*, 14 (13): 2833–2845, doi: 10.1175/1520-0442(2001)014<2833:LTCCAT>2.0.CO;2.
- 王菱, 谢贤群, 李运生, 等. 2004. 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*, 23 (1): 45–54. Wang Ling, Xie Xianqun, Li Yunsheng, et al. 2004. Changes of humid index and borderline of wet and dry climate zone in northern China over the past 40 years [J]. *Geographical Research (in Chinese)*, 23 (1): 45–54.
- 王名才. 1994. 大气科学常用公式 [M]. 北京: 气象出版社, 2–3. Wang Mingcai. 1994. *General Formula of Atmospheric Science [M]* (in Chinese). Beijing: China Meteorology Press, 2–3.
- 王秀荣, 徐祥德, 苗秋菊. 2003. 西北地区夏季降水与大气水汽含量状况区域性特征 [J]. *气候与环境研究*, 8 (1): 35–42. Wang Xiurong, Xu Xiangde, Miao Qiuju. 2003. Regional characteristics of summer precipitation and water vapor amount in northwest China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 8 (1): 35–42.
- 王遵娅, 丁一江, 何金海, 等. 2004. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析 [J]. *气象学报*, 62 (2): 228–236. Wang Zunya, Ding Yihui, He Jinhai, et al. 2004. An updating analysis of the climate change in China in recent 50 years [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 62 (2): 228–236.
- 谢义炳, 戴武杰. 1959. 中国东部地区夏季水汽输送个例计算 [J]. *气象学报*, 30 (2): 173–185. Hsleh Yiping, Tai Wuja. 1959. Certain computational results of water vapour transport over eastern China for a selected synoptic case [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 30 (2): 173–185.
- 熊敏途. 2015. 近 30 年中国地面风速分区及气候特征 [J]. *高原气象*, 34 (1): 39–49. Xiong Minquan. 2015. Climate regionalization and characteristics of surface winds over China in recent 30 years [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 34 (1): 39–49.
- 严登华, 耿思敏, 罗先香, 等. 2011. 中国北方地区四季的时空演变特征 [J]. *地理科学*, 31 (9): 1105–1110. Yan Denghua, Geng Simin, Luo Xianxiang, et al. 2011. Spatial and temporal variation characteristics of the four seasons in the northern China [J]. *Scientia Geographica Sinica (in Chinese)*, 31 (9): 1105–1110.
- 杨建平, 丁永建, 陈仁升, 等. 2005. 亚洲季风与中国干湿、农牧气候界线之关系 [J]. *地理科学*, 25 (4): 441–447. Yang Jianping, Ding Yongjian, Chen Rensheng, et al. 2005. Relationship of Asian Monsoon with dry and wet climate boundary and agro-pasturing climate boundary [J]. *Scientia Geographica Sinica (in Chinese)*, 25 (4): 441–447.
- Zhai P M, Eskridge R E. 1997. Atmospheric water vapor over China [J]. *J. Climate*, 10 (10): 2643–2652, doi: 10.1175/1520-0442(1997)010<2643:AWVOC>2.0.CO;2.
- 张俊岚, 王华, 谢国辉. 2003. 阿克苏地区地理因素对气候分布的影响 [J]. *气象*, 29 (3): 46–48. Zhang Junlan, Wang Hua, Xie Guohui. 2003. Geographic factors effects on the climatic distributions in Akesu area [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 29 (3): 46–48.
- 张文杰, 程维明, 李宝林, 等. 2014. 气候变化下的祁连山地区近 40 年多年冻土分布变化模拟 [J]. *地理研究*, 33 (7): 1275–1283. Zhang Wenjie, Cheng Weiming, Li Baolin, et al. 2014. Simulation of the permafrost distribution on Qilian Mountains over past 40 years under the influence of climate change [J]. *Geographical Research (in Chinese)*, 33 (7): 1275–1283.
- 赵天保, 涂锴, 严中伟. 2013. 大气水汽变化及其反馈效应研究进展 [J]. *气候变化研究进展*, 9 (2): 79–88. Zhao Tianbao, Tu Kai, Yan Zhongwei. 2013. Advances of atmospheric water vapor change and its feedback effect [J]. *Progressus Inquisitiones De Mutataions Climatis (in Chinese)*, 9 (2): 79–88.
- 周长艳, 何金海, 李薇, 等. 2005. 夏季东亚地区水汽输送的气候特征 [J]. *南京气象学院学报*, 28 (1): 18–27. Zhou Changyan, He Jinhai, Li Wei, et al. 2005. Climatological characteristics of water vapor transfer over East Asia in summer [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 28 (1): 18–27.
- Zhou S W, Wu P, Wang C H, et al. 2012. Spatial distribution of atmospheric water vapor and its relationship with precipitation in summer over the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 22 (5): 795–809, doi:10.1007/s11442-012-0964-8.
- 朱彦良, 凌超, 陈洪滨, 等. 2012. 两种再分析资料与 RS92 探空资料的比较分析 [J]. *气候与环境研究*, 17 (3): 381–391. Zhu Yanliang, Ling Chao, Chen Hongbin, et al. 2012. Comparison of two reanalysis data with the RS92 radiosonde data [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 17 (3): 381–391.