

尉英华,东高红,徐姝. 海河流域不同地形站网密度对面雨量精度的影响[J]. 气象与环境学报,2014,30(6):75-79.
WEI Ying-hua, DONG Gao-hong, XU Shu. Impact of station density on accuracy of area rainfall under different topography over Haihe River basin[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2014, 30(6): 75-79.

海河流域不同地形站网密度对面雨量精度的影响

尉英华 东高红 徐姝

(天津市气象台,天津 300074)

摘要:利用2011—2013年汛期海河流域逐时降水量资料,将国家常规气象站与区域加密站进行分拆合成,通过面雨量离差系数和面雨量比值系数、点面关系综合分析不同地形条件下站网密度对海河流域各水系面雨量计算精度的影响。结果表明:站网密度是影响面雨量计算精度的重要因素,对不同地形面雨量分析存在不同程度的影响。其中,混合地貌水系以地形分布和降水分布差异尤为明显的滦河水系影响最大,站网密度较低的常规站对面雨量估计比高站网密度的合成站平均偏高2.5 mm,12%误差超过5.0 mm;其次山区永定河水系低站网密度常规站对面雨量估计平均偏高1.5 mm,相对误差达80.3%,尤其局地性短时强降水时,面雨量分析误差高达10倍以上;此外,混合地貌水系北三河和南运河站网密度对面雨量影响程度略低于滦河水系,平原区徒骇马颊河及混合地貌中地形差异较小的大清河和子牙河影响较小。

关键词:面雨量离差系数;点面关系;泰森多边形;站网密度

中图分类号:P468.0+24 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1673-503X.2014.06.011

引言

海河流域东临渤海,南界黄河,西靠太行山,北倚蒙古高原,地跨八省、自治区和直辖市,位处京津要地,是中国政治、经济和文化中心。与各大江河流域不同,海河流域地形陡峻,河道源短流急,洪水预报难度较大。近几年,受极端强降水影响,流域内不同地区洪涝灾害事件频繁发生,2012年“7.21”、“7.25”和台风“达维”等强降水过程均对流域内经济发展和人民生命财产安全造成不同程度影响和损失。随着强降水事件的频繁发生,流域暴雨研究取得了较多研究成果^[1-3]。

面雨量为气象与水文结合的纽带,是江河流域防汛抗洪调度中一个非常重要的参数,河道的流量及水库的蓄洪规模均与其密切相关^[4],因此客观、准确地计算面雨量对防汛抗洪及防灾减灾意义重大。近年来,国内外开展了大量面雨量计算方法的对比分析研究^[5-9],部分成果已得到广泛的业务应用,但目前采用的国家常规站面雨量监测由于站点分布稀疏,导致面雨量计算失真,间接影响洪水预报能力。王国庆等^[10]通过分析雨量站网密度对长江流域气候区月径流模拟的影响,指出站网密度是影响面雨量分析及洪水预报的重要因素。

海河流域地形复杂,站网分布极不均匀,站网密度对七大河流水系面雨量影响程度不同,目前缺乏该方面的系统性分析。为提高面雨量计算精度,本文对海河流域8个省(市、自治区)的国家常规气象站和

区域加密雨量站进行了分拆合成,分析不同地形条件下站网密度对流域内各水系面雨量的影响,对流域洪水预报具有重要的参考价值,从而为流域防洪调度提供客观和科学的决策依据。

1 资料与方法

1.1 资料处理

所用资料为2011—2013年汛期6—9月海河流域内234个国家常规站及2586个区域加密自动站逐时降水量资料。该资料已经过国家气象信息中心质量控制^[11],为确保资料的准确性及代表性,资料使用时再次对其进行人工质量控制,通过与人工观测资料对比剔除资料可信度较差的时次及站次;同时对无人工观测的自动站极值进行确认,并利用国家常规站人工观测值与该站雨量计自动观测值对比进行质量评估,分别计算其绝对误差和相对误差。分析表明,雨量大于2 mm的样本其人工观测值与自动站观测值的平均绝对误差为0.8 mm,相对误差平均为10.8%,资料具有一定的准确性及代表性。图1为海河流域七大水系及国家常规气象站分布示意图。

国家常规气象站站点稀疏,站网密度相对较低,为提高面雨量计算精度,将国家常规站及区域加密站分拆合成为高站网密度资料,即将国家常规站与区域加密自动站同期降水量资料进行合并,其中有人工观测的测站采用人工观测资料,并将区域加密自动站资料完整性较差的站点剔除。根据相关研究^[12],分别计算常规站与合成站面积权重系数,采用

泰森多边形法计算七大水系逐时面雨量,该方法充

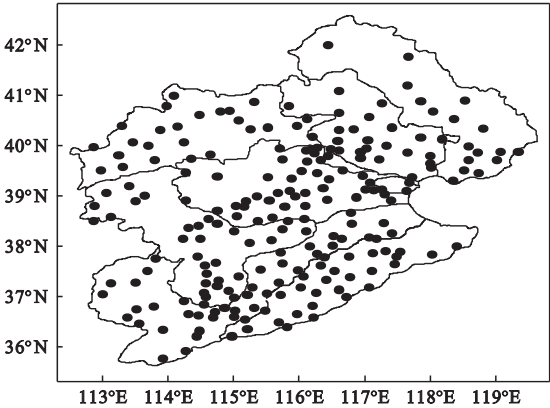


图 1 海河流域国家常规气象站分布

Fig. 1 Spatial distribution of conventional weather stations in Haihe River basin

分考虑了雨量站面积权重,相对较合理,精度较高。表 1 为七大水系国家常规站数、合成站数及样本选取(小时面雨量≥2.0 mm)情况。

表 1 海河流域雨量站网密度对比及样本选取
Table 1 Number of stations and sample selection in Haihe River basin

地点	常规站 数/个	合成站 数/个	面雨量 > 2 mm 样本数/个
滦河	19	349	115
北三河	28	371	110
永定河	25	323	64
大清河	34	369	116
子牙河	48	448	76
漳卫南运河	54	708	71
徒骇马颊河	27	252	114

1.2 研究方法

泰森多边形法又称垂直平分法或加权平均法,该法首先计算出雨量站面积权重系数,将站点雨量与其所占面积权重相乘后累加即得到面雨量。雨量站权重系数求法:将流域内各相邻雨量站用直线相连,作各连线的垂直平分线,平分线相交将流域划分为若干个多边形,每个多边形内均有且仅有一个雨量站,设雨量站所在的多边形控制面积为 ΔA,ΔA 与全流域面积 A 之比即为该雨量站的权重系数,面雨量计算公式为:

$$\bar{P}=f_1P_1+f_2P_2+\cdots+f_nP_n$$
 (1)

式(1)中, f_1,f_2,\cdots,f_n 分别为各雨量站用多边形面积计算的权重系数; $P_1,P_2,\cdots,P_n,\bar{P}$ 分别为各测站同时期降雨量和流域面雨量。

面雨量离差系数 C_v 为站点降雨量均方差与面雨量的比值,表示站点降水分布相对于面雨量的离散程度,其中面雨量为利用泰森多边形法计算的降雨量均值, C_v 越接近 0,离散程度越小,反之越大。面雨量比值系数 η 为国家常规站面雨量与合成站面

雨量的比值,反映二者的相对偏离程度, η 越接近 1,站网密度对面雨量计算的影响越小,反之越大。点面相关系数 r_{iz} 是指在面积 A 上,任一站点雨量序列与面雨量序列之间的相关系数,该系数反映雨量随机场的局部与整体之间的关系。计算公式为:

$$C_v=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(X_i(t)/Z(t)-1)^2}{n-1}}$$
 (2)

$$\eta=Z_c/Z_s$$
 (3)

$$r_{iz}=\frac{\sum_{i=1}^n(X_i(t)-\bar{X}_i)(Z(t)-\bar{Z})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n(X_i(t)-\bar{X}_i)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^n(Z(t)-\bar{Z})^2}}$$
 (4)

式(2)一式(4)中, $X_i(t)$ 为某一时次流域内第 i 个站点降雨量; $Z(t)$ 为相应时次站点所在河系面雨量; Z_c 为国家常规雨量站面雨量计算值; Z_s 为合成站面雨量计算值; n 为雨量站数。

2 结果分析

海河流域降水分布存在明显的地域差异,呈北少南多、西少东多分布态势,即平原多于山区,沿海多于内陆(图略)。其中山区水系降雨量虽少,但由于站点稀疏,站网密度对面雨量的影响较大;平原区降雨量虽多,但由于站点分布较密集,站网密度对面雨量影响相对较小。可见,站网密度对面雨量的影响与地形关系密切。

2.1 山区水系站网密度对面雨量分析的影响

永定河地处海河流域西北部,山区面积约占 95.8%。在流域七大水系中,永定河汛期降雨量最少,但由于地处山区,其降雨量空间变异性极大,面雨量超过 2 mm 的样本离差系数序列呈大幅度波动变化(图 2a),平均为 3.6,降水分布呈明显离散状态。

降水分布不均,且常规站分布稀疏,使永定河国家常规站对面雨量估计存在明显误差,分析表明,94% 的样本面雨量比值系数大于 1.0(图 2a),低站网密度常规站面雨量平均为高站网密度合成站面雨量的 3.1 倍,即永定河国家常规站对面雨量总体呈偏高估计,平均偏高为 1.5 mm,约占平均面雨量的 80.3%。此外,面雨量离差系数与面雨量比值系数存在明显的正相关关系,尤其对降水空间分布极不均匀的局地强降水,站网密度较低的国家常规站造成面雨量的分析误差超过合成站面雨量近 10 倍以上,小时面雨量绝对误差最大达 7.2 mm。可见,站网密度对山区水系面雨量影响极大,合成站能在极大程度上降低常规站对面雨量极值的过高估计,提高面雨量计算精度,从而降低洪水预报误差,为防洪调度提供客观和科学的决策依据。

2.2 平原区水系站网密度对面雨量分析的影响

徒骇马颊河水系位于海河流域最南端,为西南东北向带状平原区,受副热带高压外围控制暴雨天气频繁。该水系地势平坦,汇流速度慢,洪峰持续时间长,极易形成洪涝灾害。统计表明,该水系小时面

泰森多边形法计算七大水系逐时面雨量,该方法充

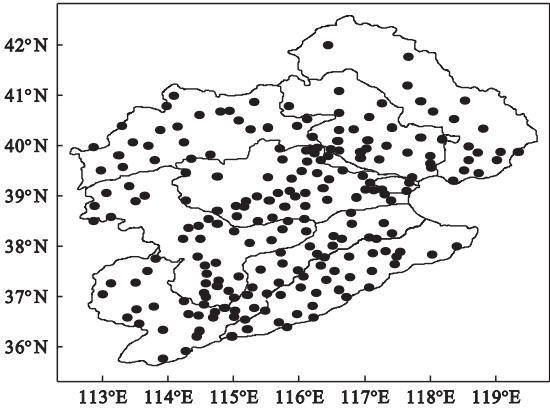


图 1 海河流域国家常规气象站分布

Fig. 1 Spatial distribution of conventional weather stations in Haihe River basin

分考虑了雨量站面积权重,相对较合理,精度较高。表 1 为七大水系国家常规站数、合成站数及样本选取(小时面雨量≥2.0 mm)情况。

表 1 海河流域雨量站网密度对比及样本选取
Table 1 Number of stations and sample selection in Haihe River basin

地点	常规站 数/个	合成站 数/个	面雨量 > 2 mm 样本数/个
滦河	19	349	115
北三河	28	371	110
永定河	25	323	64
大清河	34	369	116
子牙河	48	448	76
漳卫南运河	54	708	71
徒骇马颊河	27	252	114

1.2 研究方法

泰森多边形法又称垂直平分法或加权平均法,该法首先计算出雨量站面积权重系数,将站点雨量与其所占面积权重相乘后累加即得到面雨量。雨量站权重系数求法:将流域内各相邻雨量站用直线相连,作各连线的垂直平分线,平分线相交将流域划分为若干个多边形,每个多边形内均有且仅有一个雨量站,设雨量站所在的多边形控制面积为 ΔA,ΔA 与全流域面积 A 之比即为该雨量站的权重系数,面雨量计算公式为:

$$\bar{P}=f_1P_1+f_2P_2+\cdots+f_nP_n$$
 (1)

式(1)中, f_1,f_2,\cdots,f_n 分别为各雨量站用多边形面积计算的权重系数; $P_1,P_2,\cdots,P_n,\bar{P}$ 分别为各测站同时期降雨量和流域面雨量。

面雨量离差系数 C_v 为站点降雨量均方差与面雨量的比值,表示站点降水分布相对于面雨量的离散程度,其中面雨量为利用泰森多边形法计算的降雨量均值, C_v 越接近 0,离散程度越小,反之越大。面雨量比值系数 η 为国家常规站面雨量与合成站面

雨量的比值,反映二者的相对偏离程度, η 越接近 1,站网密度对面雨量计算的影响越小,反之越大。点面相关系数 r_{iz} 是指在面积 A 上,任一站点雨量序列与面雨量序列之间的相关系数,该系数反映雨量随机场的局部与整体之间的关系。计算公式为:

$$C_v=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(X_i(t)/Z(t)-1)^2}{n-1}}$$
 (2)

$$\eta=Z_c/Z_s$$
 (3)

$$r_{iz}=\frac{\sum_{i=1}^n(X_i(t)-\bar{X}_i)(Z(t)-\bar{Z})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n(X_i(t)-\bar{X}_i)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^n(Z(t)-\bar{Z})^2}}$$
 (4)

式(2)一式(4)中, $X_i(t)$ 为某一时次流域内第 i 个站点降雨量; $Z(t)$ 为相应时次站点所在河系面雨量; Z_c 为国家常规雨量站面雨量计算值; Z_s 为合成站面雨量计算值; n 为雨量站数。

2 结果分析

海河流域降水分布存在明显的地域差异,呈北少南多、西少东多分布态势,即平原多于山区,沿海多于内陆(图略)。其中山区水系降雨量虽少,但由于站点稀疏,站网密度对面雨量的影响较大;平原区降雨量虽多,但由于站点分布较密集,站网密度对面雨量影响相对较小。可见,站网密度对面雨量的影响与地形关系密切。

2.1 山区水系站网密度对面雨量分析的影响

永定河地处海河流域西北部,山区面积约占 95.8%。在流域七大水系中,永定河汛期降雨量最少,但由于地处山区,其降雨量空间变异性极大,面雨量超过 2 mm 的样本离差系数序列呈大幅度波动变化(图 2a),平均为 3.6,降水分布呈明显离散状态。

降水分布不均,且常规站分布稀疏,使永定河国家常规站对面雨量估计存在明显误差,分析表明,94% 的样本面雨量比值系数大于 1.0(图 2a),低站网密度常规站面雨量平均为高站网密度合成站面雨量的 3.1 倍,即永定河国家常规站对面雨量总体呈偏高估计,平均偏高为 1.5 mm,约占平均面雨量的 80.3%。此外,面雨量离差系数与面雨量比值系数存在明显的正相关关系,尤其对降水空间分布极不均匀的局地强降水,站网密度较低的国家常规站造成面雨量的分析误差超过合成站面雨量近 10 倍以上,小时面雨量绝对误差最大达 7.2 mm。可见,站网密度对山区水系面雨量影响极大,合成站能在极大程度上降低常规站对面雨量极值的过高估计,提高面雨量计算精度,从而降低洪水预报误差,为防洪调度提供客观和科学的决策依据。

2.2 平原区水系站网密度对面雨量分析的影响

徒骇马颊河水系位于海河流域最南端,为西南东北向带状平原区,受副热带高压外围控制暴雨天气频繁。该水系地势平坦,汇流速度慢,洪峰持续时间长,极易形成洪涝灾害。统计表明,该水系小时面

雨量超过 2 mm 的样本约占总样本数的 17%, 降雨强度及短时强降水发生频率明显高于山区水系, 但

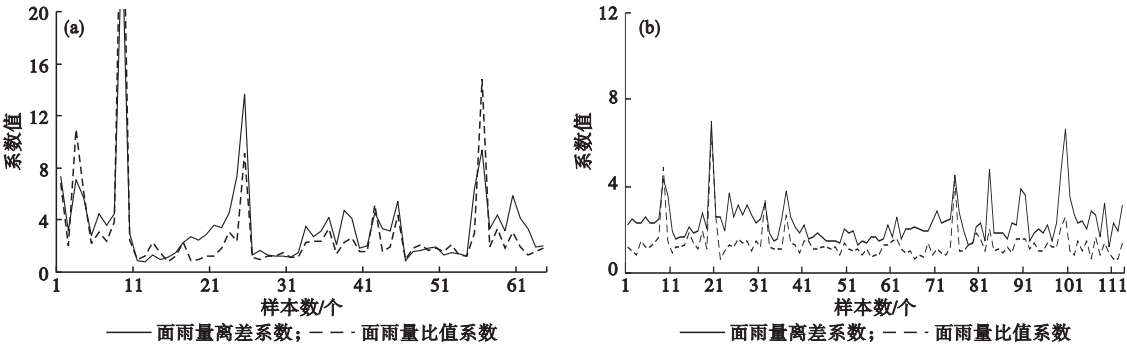


图 2 山区永定河(a)和平原区徒骇马颊河(b)面雨量离差系数及比值系数
Fig. 2 Deviation coefficient and ratio coefficient series of area rainfall in Yongdinghe River of mountain area (a) and in Tuhaimajiahe River of plain area (b)

离差系数序列值明显低于永定河水系(图 2b), 降水空间分布相对较均匀。此外, 低站网密度常规站与高站网密度合成站面雨量比值系数序列整体接近 1.0, 站网密度引起的面雨量分析绝对误差平均仅为 0.8 mm, 最大为 3.9 mm, 平均相对误差为 28.6%, 即徒骇马颊河常规站面雨量估计值接近合成站面雨量估计值。可见, 平原区水系降雨强度虽大, 但站点

空间分布比山区相对均匀, 站网密度对面雨量分析影响并不明显。

2.3 混合地貌水系站网密度对面雨量分析的影响
海河流域西部为太行山东麓, 北部为燕山山脉, 多数水系属于山区和平原两种地貌。其中, 滦河水系山区面积超过三分之二, 其山区站点极为稀疏, 面雨量离差系数明显偏高(图 3a), 平均为 3.4, 降水分

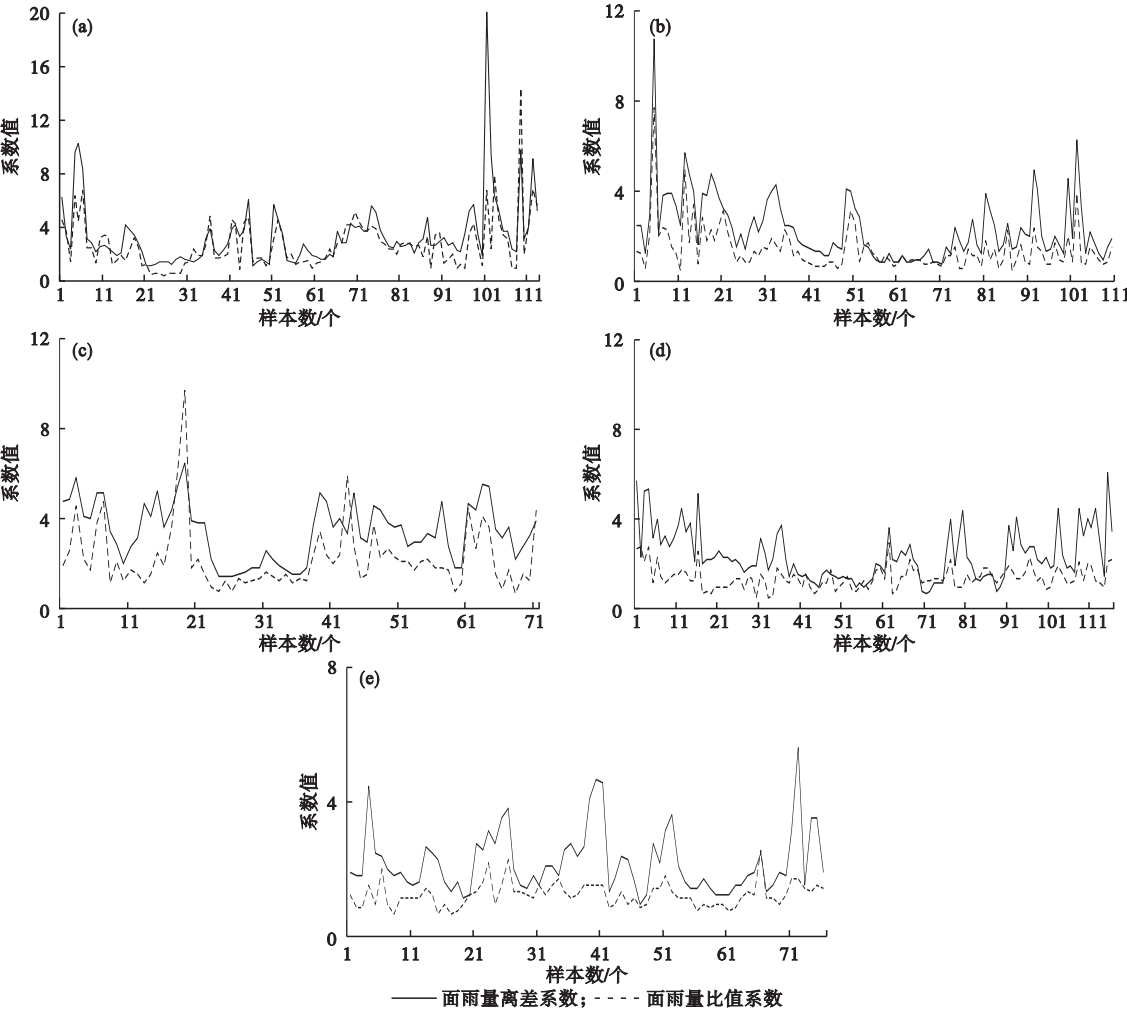


图 3 滦河(a)、北三河(b)、南运河(c)、大清河(d)和子牙河(e)混合地貌水系面雨量离差系数及比值系数
Fig. 3 Deviation coefficient and ratio coefficient series of area rainfall in Luanhe River (a), Beisanhe River (b), Nanyunhe River (c), Daqinghe River (d) and Ziyahe River (e) of complex topography

布的地形差异极为明显,主要降水位于水系下游冀东沿海的平原地区。地形、站点及降水分布的不均匀使得低站网密度常规站面雨量分析值与高站网密度合成站差异极明显,不同站网密度的面雨量比值系数序列中约 55% 的样本大于 2.0;绝对误差亦为七大河系中最大,平均为 2.5 mm,相对误差达 111.8%;其中 12% 样本站网密度引起的面雨量分析误差超过 5.0 mm,最大小时误差达 9.6 mm。

此外,北三河、大清河、子牙河和南运河均为混合地貌水系。大清河和子牙河山区面积所占比例较低,离差系数明显低于永定河及滦河水系,不同站网密度面雨量比值系数总体接近 1.0(图 3d 和图 3e);站网密度对面雨量分析影响相对较小,因站网密度引起的面雨量分析平均绝对误差分别为 0.9 mm 和 0.6 mm,相对误差分别为 33.9% 和 22.5%。南运河

和北三河水系山区面积约占二分之一,降水空间分布程度及面雨量估算误差略低于滦河水系(图 3c 和图 3b);平均绝对误差分别为 1.5 mm 和 1.3 mm,相对误差分别为 80.9% 和 36.8%,个别时次降水分布存在明显的地形差异导致面雨量分析误差较大。

上述分析表明,混合地貌水系中,因地形导致站点及降水分布差异最明显的为滦河水系,站网密度对其面雨量分析的影响极大;北三河和南运河地形差异虽明显,但由于降水分布及站点分布相对均匀,其对面雨量影响程度略低于滦河水系。点面关系分析进一步表明,国家常规站降水量点面关系中仅滦河下游地区与面雨量的相关系数较高,而滦河中上游山区与面雨量相关系数极低。站点合成后,滦河水系大部地区局部与整体之间具有更高的相关系数(图 4),即面雨量计算精度明显提高,能更好的反映

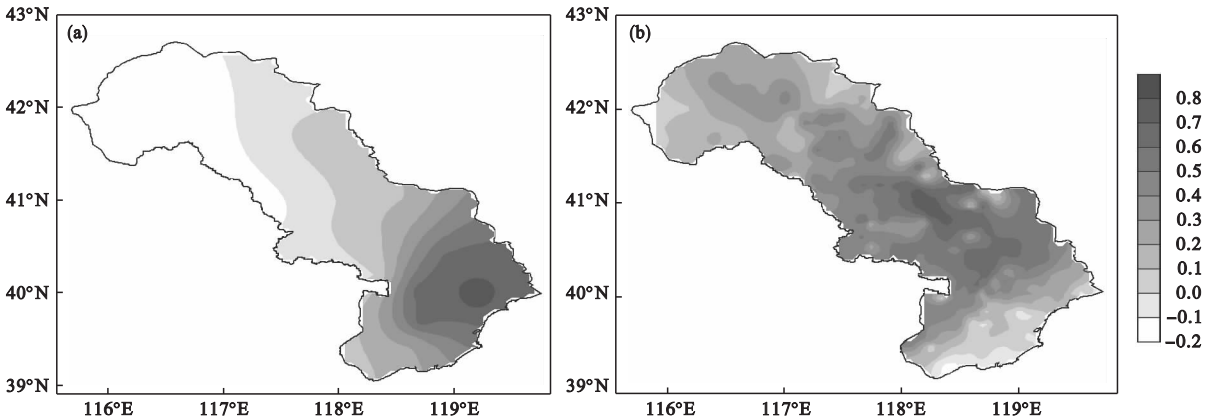


图 4 滦河水系常规站 (a) 及合成站 (b) 点面相关系数分布

Fig. 4 Spatial distribution of correlation coefficients between point rainfall from conventional stations (a) and area rainfall from synthetic stations (b) in Luanhe River

空间平均降水情况。

2.4 强降水过程个例分析

2012 年 7 月 21 日受高空槽及低空切变线影响,海河流域中北部出现明显强降水过程(图 5a),滦河

中下游、北三河中下游及大清河北支出现大暴雨,局部地区为特大暴雨。受强降水过程影响,大清河水系拒马河紫荆关 21 日 22 时流量达 $2580\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,南拒马河落宝滩 22 日 08 时流量达 $2510\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 。

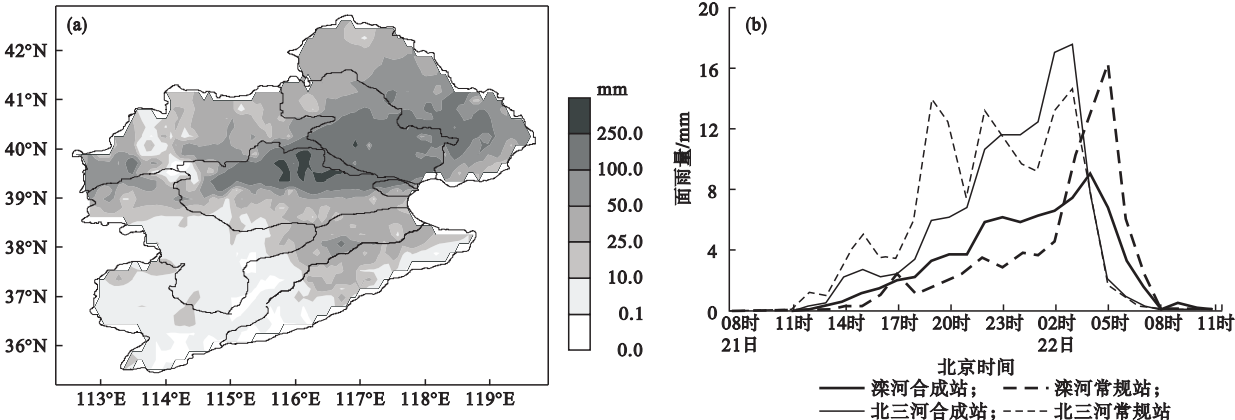


图 5 2012 年 7 月 21 日累积降水分布 (a) 和 7 月 21 日 08 时至 22 日 11 时逐时面雨量序列对比 (b)

Fig. 5 Spatial distribution of accumulated precipitation on July 21 (a) and comparison of hourly area rainfall from conventional weather stations and synthetic weather stations in Luanhe River and Beisanhe River from 08:00 on July 21 to 11:00 on July 22 (b), 2012

对比降雨量空间图,大清河降水分布南北差异极明显,强降水主要位于大清河北支,但因该水系站点分布较均匀,采用不同站网密度的国家常规站与合成站计算的面雨量(图略)差异不明显,平均绝对误差为0.6 mm,最大为1.7 mm。

与此同时,滦河及北三河因地形和降水分布差异均明显,仅采用国家常规站则易产生明显的面雨量估计误差(图5b)。其中,北三河7月21日23时前总体呈偏高估计,19时面雨量小时误差达8.0 mm;滦河22日05时峰值面雨量小时误差达9.6 mm,该误差将严重影响洪水预报效果。由此可见,强降水期间,通过高站网密度的合成站能极大程度提高面雨量计算精度,从而为洪水调度提供更加可靠的决策依据。

3 结论

(1)站网密度是影响面雨量计算精度的重要因素,对不同地形水系的面雨量分析存在不同程度的影响。对平原区水系面雨量的影响较小,徒骇马颊河水系强降水频繁,两种密度的站网计算的面雨量平均绝对误差仅为0.8 mm,最大为3.9 mm,相对误差平均为23.6%。

(2)对山区水系面雨量分析影响较大,采用永定河常规站计算的面雨量相对站网密度高的合成站总体偏高,平均偏高1.5 mm,相对误差平均为80.3%,当出现局地性短时强降水时,通过国家常规站计算的面雨量相对高密度的合成站误差可高达10倍以上。

(3)对混合地貌水系面雨量分析影响的程度不同,其中对地形分布和降水分布差异尤为明显的滦

河水系影响最大,站网密度低的常规站对面雨量的估计平均偏高2.5 mm,为高密度合成站面雨量平均值的1.1倍;对地形差异较小的大清河和子牙河影响程度接近平原区水系,对山区面积约占二分之一的南运河和北三河影响程度略低于滦河水系。

参考文献

- [1] 马鸿青,丁治英,张会,等. 2009年5月冀中南一次春季大暴雨成因分析[J]. 气象与环境学报,2011,27(5):32-37.
- [2] 李国翠,孙云,李国平,等. “20110809”石家庄西部大暴雨分析[J]. 气象与环境学报,2013,39(5):1-5.
- [3] 卢焕珍,刘一玮,张楠. 海河流域切变线类暴雨成因分析[J]. 气象与环境学报,2014,30(1):15-22.
- [4] 徐晶,林建,姚学祥,等. 七大江河流域面雨量计算方法及应用[J]. 气象,2005,27(11):13-16.
- [5] 方慈安,潘志祥,叶成志,等. 几种流域面雨量计算方法的比较[J]. 气象,2003,29(7):23-26.
- [6] 姚学祥,徐晶. 2003年淮河流域大水期间体积降水量的研究[J]. 气象学报,2004,62(6):803-813.
- [7] 林开平,孙崇智,郑凤琴,等. 丘陵地区面雨量计算方法及应用[J]. 气象,2004,29(10):8-12.
- [8] 朱红芳,王东勇,朱鹏飞,等. GRAPES模式在淮河流域面雨量预报中的应用[J]. 气象,2007,33(3):78-82.
- [9] 苗爱梅,郗玉玺,武捷,等. 山西省主要河流流域面雨量预报业务流程[J]. 气象,2004,30(9):24-28.
- [10] 王国庆,张建云,张明,等. 雨量站网密度对不同气候区月径流模拟的影响[J]. 人民长江,2009,40(8):45-48.
- [11] 张志富,任芝花,邹凤玲. 基于两种数据传输途径的国家级地面自动站逐小时数据差异分析[J]. 气象与环境学报,2014,30(1):64-68.
- [12] 毕宝贵,徐晶,林建. 面雨量计算方法及其在海河流域的应用[J]. 气象,2003,29(8):39-42.

Impact of station density on accuracy of area rainfall under different topography over Haihe River basin

WEI Ying-hua DONG Gao-hong XU Shu

(Tianjin Meteorological Observatory, Tianjin 300074, China)

Abstract: Based on hourly precipitation data from conventional weather stations and regional automatic stations over Haihe River basin in flood season from 2011 to 2013, a set of new rainfall data with high network density was generated and this new data is from synthetic weather stations. Effects of station density under different topography on accuracy of area rainfall were analyzed by using area rainfall dispersion coefficient and its ratio coefficient as well as relationship between point rainfall and area rainfall. The results show that station density is an important factor which affects accuracy of area rainfall, and it has different effects on area rainfall under different topography. In water system of mixed topography such as Luanhe River basin, topography and precipitation are complex, so effect of station density is also the most significant. Area rainfall is overestimated about 2.5 mm using lower density data from conventional weather stations compared with using higher density data from synthetic weather stations, and 12% errors exceed 5.0 mm. In water system of mountain area topography such as Yongdinghe River, it is more than 1.5 mm, and relative errors reach 80.3%, especially during local short-time precipitation, errors of area rainfall is ten times as large as the true value. Additionally, station density has lower impact in mixed topography such as Beisanhe River, Nanyunhe River than in Luanhe River, so is in Tuhaimajiahe River of plain area, and the area with small difference of topography such as Daqinghe River and Ziyahe River.

Key words: Deviation coefficient of area rainfall; Relationship between station rainfall and area rainfall; Thiessen polygons; Station density