

城镇化背景下中小流域洪水风险研究

——以厦门市东西溪流域为例

项捷, 许有鹏, 杨洁, 李广, 王跃峰, 邓晓军

(南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023)

摘要: [目的] 以厦门市东西溪流域为例, 对城镇化背景下中小流域洪水风险进行评价和研究, 为该区有效实施防洪减灾措施提供参考依据。[方法] 以 GIS 空间分析作支持, 将暴雨洪水频率分析与平原区洪水淹没模拟计算相结合, 基于 MIKE21 平面二维水动力学模型进行洪水风险分析, 对研究区洪水风险程度以及淹没状况进行模拟计算。[结果] 绘制出厦门市东西溪流域动态洪水风险图, 并根据洪水淹没区内的土地利用等因素的变化等实际情况, 调整不同频率洪水淹没范围, 实现东西溪流域洪水风险图的实时动态更新。[结论] 研究区洪灾风险主要分布在东溪、西溪、汀溪等主干流河段, 总体上呈现随着洪水重现期增大, 灾害风险由上游向下游, 由近岸向远岸不断扩大的趋势。

关键词: 洪水风险; 二维水动力学模型; 淹没模拟; 洪水风险图; 东西溪流域; 厦门市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)02-0283-05

中图分类号: TV877

文献参数: 项捷, 许有鹏, 杨洁, 等. 城镇化背景下中小流域洪水风险研究[J]. 水土保持通报, 2016, 36(2): 283-287. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.02.053

Flood Risk in Medium and Small Basin During Urbanization

—A Case Study on East and West Streams Watershed in Xiamen City

XIANG Jie, XU Youpeng, YANG Jie, LI Guang, WANG Yuefeng, DENG Xiaojun

(School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China)

Abstract: [Objective] The flood risk evaluation in medium and small basin caused by urbanization were carried out in East and West Stream watershed in Xiamen City in order to provide some references for the flood control and disaster mitigation in study watershed. [Methods] Based on the spatial analysis of GIS and the two-dimensional hydrodynamic model named MIKE21, the flood risk analysis and submerged conditions were simulated by the combined rainstorm flood frequency analysis and plain flood submerging model. [Results] The dynamic flood hazard map of the East and West streams watershed in Xiamen City was created, together with the current land use change condition, the instant flood hazard map is able to establish according to the flood frequency. [Conclusion] The flood risk in the study area was mainly distributed in the main stream of the East stream, West stream and Ting stream watershed. With the increase of the flood recurrence period, the flood hazard tends to increase from upstream to downstream and from near-shore to off-shore.

Keywords: flood risk analysis; two-dimensional hydrodynamic model; submerging simulation; flood hazard map; the East and West streams watershed; Xiamen City

中国东南沿海地区经济快速发展, 城镇化进程不断加快, 人民生活水平不断提高, 但与此同时, 洪水灾害也愈加严重^[1]。赵庆良等^[2]认为, 受全球气候变化的影响, 东南沿海城市所面临的洪涝灾害风险水平日

益增加, 防洪减灾研究是当前经济快速发展下的一个重要课题。厦门市地处东南沿海, 所属区域内流域集水面积小, 调蓄能力差, 每年受台风洪水威胁较大。随着近年来经济的快速发展, 城市规模的不断扩大,

收稿日期: 2015-03-18

修回日期: 2015-06-01

资助项目: 国家自然科学基金项目“流域水系结构与连通变化对洪涝与水环境影响研究”(41371046; 41371044); 江苏省自然科学基金项目(BK20131276); 江苏省水利科技基金重点项目(2015003); 水利部水利公益专项(201201072; 201501041)

第一作者: 项捷(1992—), 男(汉族), 福建省平潭县人, 硕士研究生, 研究方向为水文与水资源。E-mail: XiangJ@smail.nju.edu.cn。

通信作者: 许有鹏(1956—), 男(汉族), 江苏省南京市人, 教授, 博士生导师, 主要从事水文、水资源和水环境方面的教学和科研工作。E-mail: xuy305@163.com。

洪水危害日趋加剧,目前洪水已成为该市频繁发生、损失严重的主要自然灾害之一。由于影响洪水灾害的因素错综复杂,尽管水利工程可以部分减轻洪水带来的灾害,但人们还不可能完全消除洪水危害,因此开展洪水风险分析以及防洪减灾研究就具有重要意义。许有鹏等^[3]认为,洪水风险分析是指通过历史资料调查、洪水分析计算以及洪水风险的判别,当某地区受洪水威胁而发生某一频率的洪水时,以图表的形式直观反映该地区可能被淹没的范围及水深,并可评估不同等级洪水的潜在风险及其对社会经济的损害程度,既是一种防洪减灾问题的宏观战略评价,又是一项防洪非工程措施^[4-5]。本研究以厦门市东西流域为例,基于 MIKE21 平面二维水力学模型,结合研究区流域内的水文特性与实际情况,进行洪水风险分析;并以 GIS 技术为依托,借助 GIS 的空间图形分析功能,以厦门市同安区东西流域的 1:5 000 地形图为基础,根据厦门市东西流域的实际情况及其特点,最后通过绘制洪水风险图来显示研究区域的洪水淹没情况,为有效实施防洪减灾措施提供参考依据。

1 研究区概况

1.1 自然地理概况

东西流域位于厦门市同安区境内,流域面积 491.48 km²,主河道全长 34 km。同安东西溪是主流西溪在大同镇南面的双溪口与同安东溪汇合后的合称,河道在西柯翁窑又分成两股,东股石浔支流经石浔流入东咀湾,西股浦声支流经瑶头流入东咀湾^[6]。东西流域属小流域,流域调节能力差,河流源短流急,暴涨暴落,汇流时间短,入海快。该流域属于亚热带海洋性季风气候,常年受海洋气团影响,倚山面海,温暖湿润,雨量充沛。多年平均降水量:山区为 1 800~2 500 mm,沿海为 1 100~1 600 mm,总趋势是西北向东南递减。降水时空分布不均,主要雨型有锋面雨和台风雨两种类型。锋面雨一般在 5—6 月,降雨强度一般不大。台风雨一般在 7—9 月,雨水历时一般不超过 3 d,时间短,强度大,特别是在广东东部、漳州沿海地区登陆后转向偏北或东北方向移动的台风或热带风暴,常降大暴雨或特大暴雨,沿海地区如遭遇天文大潮,其危害性更大。

1.2 社会经济概况

同安区面积 649.73 km²。2000 年同安区总人口 54.82 万人,其中城镇人口 7.46 万人,占总人口的 13.61%;同安区完成国内生产总值 65.02 亿元,工业总产值 96.12 亿元,农民人均纯收入 3 553 元。2013 年,该区户籍总人口 34.21 万人,城镇人口 15.51 万

人,占全区人口的 45.33%;国民生产总值 225.84 亿元,规模以上工业总产值 417.98 亿元,农林牧渔业总产值 19.81 亿元;城镇人均可支配收入 36 344 元,农民人均纯收入 12 756 元^[7]。因此,同安在近 10 a 来的经济发展迅速,城镇化进程飞快。据《同安县志》、《同安县水利电力志》、《同安气象志》、《厦门市防汛抗旱简明手册》及其他有关历史资料记载,从 1547 年至建国前,同安城区共发生特大水灾 33 次,即平均 12.2 a 就发生 1 次;建国后至 2006 年,同安城区受台风暴雨袭击而造成的大小洪涝灾害累计 30 次,即平均 1.9 a 便发生 1 次,其中,发生较大洪灾 15 次,尤以 1956,1990,1999 年发生的洪灾最为严重。虽然该研究区的经济快速发展,城镇化进程不断加快,而洪水灾害发生的频率也由此加快,给人民的财产及生命安全带来严重威胁。

2 研究方法

2.1 设计暴雨和洪水计算

洪水风险评估,主要是基于历史水文资料,通过统计频率计算分析,来推求不同等级洪水对应的洪水重现期^[8]。由于东西流域下游无实测水文资料,本研究洪水风险分析的方法主要是采用由设计暴雨来推求洪水风险等级,即流域暴雨与洪水采用相同的频率,首先推求出不同等级的设计暴雨,然后再由设计暴雨推求出相同频率的设计洪水。本文根据实际情况,采用 5 个洪水风险频率: $P=1\%$,即表示 100 年一遇; $P=2\%$ 为 50 年一遇; $P=5\%$ 为 20 年一遇; $P=10\%$ 为 10 年一遇; $P=20\%$ 为 5 年一遇。洪水风险分析计算中的设计暴雨,是利用东西流域内主要站点的长系列暴雨资料,通过多站平均求得两个流域不同地区的面平均雨量,然后采用频率计算分析求得各单元内的不同等级的设计暴雨,再选择典型暴雨进行暴雨的时空分配,分析得到设计暴雨过程分配。选用赵人俊^[9]的新安江三水源模型作为计算模型来进行洪水计算分析,根据东西流域特点,利用流域内各区域的设计暴雨及其过程,对东西流域和各区域进行了设计洪水计算,计算结果和东西流域防洪规划中的设计洪水数值差别不大,可以作为流域洪水风险的依据。设计洪水计算成果详见表 1。

2.2 MIKE21 模型

平面二维数学模型 MIKE21 是丹麦水利研究所开发的,它是一款应用较为广泛的水力学模型^[10-11],由于该模型在平面二维自由表面流数值模拟的方面功能强大,已在世界多个地区得到了较成功的应用。

目前国内一些大型水利工程都应用了该模型进行了分析计算。本研究为了分析东西溪流域洪水演进情

况,采用 MIKE21 模型对洪水演进过程进行了二维模拟计算。

表 1 东西溪流域设计洪水计算结果

位置	面积/km ²	P=1%	P=2%	P=5%	P=10%	P=20%
汀溪水库坝址以上	100.8	1 204.4/3 945.1	1 095.3/3 443.7	926.1/2 598.1	800.7/2 124.2	636.2/1 599.1
莲花水库坝址以上	157.0	1 638.0/5 109.8	1 461.5/4 365.5	1 177.4/3 110.1	976.9/2 459.3	710.3/1 716.6
东溪河口以上	152.8	1 369.2/4 566.7	1 273.8/4 037.4	1 068.8/2 980.0	939.1/2 512.8	748.2/1 922.4
西溪河口区间	62.9	489.4/1 827.0	435.5/1 589.4	344.9/1 159.2	288.9/951.1	217.6/704.3
东西溪河口以上	473.5	2 709.8/12 124.0	2 497.1/10 682.7	2 111.7/7 770.7	1 878.4/6 523.2	1 430.1/4 945.8

注:数据为:洪峰流量(m³·s⁻¹)/总量(10⁴ m³)。

2.2.1 模型范围及边界选取 在采用二维水流模型对厦门东西溪流域进行分析时,首先结合东西溪流域的水文特性以及下垫面特性,选取模型的计算范围。东西溪流域的特点表现为上下游高程相差较大,且下游地势平坦,强降雨形成的洪水难以排出,容易积水成灾。另外,东西溪双溪口水位站下游段为感潮河道,由于河流短,河床浅窄,坡度平缓,沿溪没有可供滞洪的湖泊,发生的洪水常受潮位顶托,使同安区区的雨水无法排泄或溪水往排涝口、排污口倒灌造成城区内涝。因此,模型模拟范围应选取流域下游地势平坦,易受洪水淹没且短时期内难以排出的区域。考虑到模型对输入水量的要求,模拟范围的选取条件还应包括该范围内的进水口可以控制住来水量,即各主要进水口的水量均能获得。综合以上考虑,根据东西溪流域的特点,在本次模拟中,东西溪流域则主要采用汀溪水库以下、莲花溪莲花水库坝址以下以及东溪安峰水闸以下流域进行模拟。

2.2.2 模拟参数设置 二维水流数值模拟的时间步长、空间步长以及计算时间应合理取值,从而既能保证一定的精度,同时不会导致运算量过大。在东西溪流域的二维洪水演进模拟中, x 及 y 方向的空间步长均取 50 m。另外,由于流域面积较小,洪水演进时间较短,因此时间步长可以取一个较小值从而使精度提高,本次模拟选取 5 s 作为时间步长。根据模拟范围的规模以及洪水量级,本次模拟采用的计算时间为 5.5 h。通过对地形图的判读,结合流域实地考察发现,模拟区域的土地利用类型以居民地和农田为主,且土地利用类型的变化主要是由居民地转变为农田。由于居民地和农田的糙率较为接近,模拟区域的糙率选取 0.065。在边界处理方面,由于模拟洪水为 100 年一遇和 50 年一遇洪水,来水量大,受淹没地区水深均较大,因此干边界取 0.2 m,湿边界取 0.3 m。即涨水时当计算区域水深大于 0.3 m 的时候,设该区域状态为“湿”,参加计算,而落水时当计算区域水深小于 0.2 m 的时候,设该区域状态为“干”,不参加计算。

2.3 基于 GIS 的二维洪水模拟

当前平原地区的洪水淹没模拟计算,一般是采用二维水动力方程数值计算方法动态地模拟洪泛区的洪水淹没变化。该计算需要大量的下垫面基础资料以及边界条件,然而这部分资料的获取和更新都较为困难^[12],近年来,GIS 技术的不断发展为下垫面资料的提取和计算网格的确定带来了便利。本文对 50 年、100 年一遇的大洪水,采用二维非稳定流洪水淹没演进方法,并结合下游涉水情况综合确定不同等级洪水淹没的范围。在此基础上,借助 GIS 的空间分析功能进行成果的分析与显示^[1]。GIS 支持下的二维洪水模拟流程图如图 1 所示。

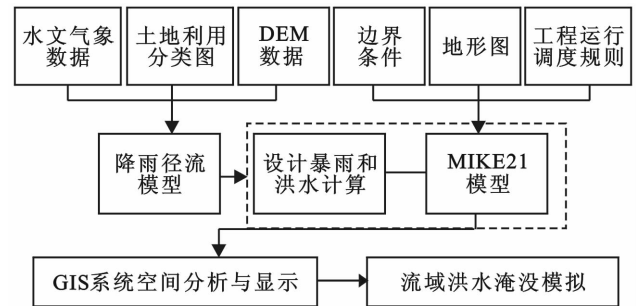


图 1 GIS 支持下二维洪水模拟分析流程

3 研究区洪水风险分析

3.1 流域二维洪水淹没模拟结果分析

由于东西溪流域中下游河道普遍进行了治理,防洪能力有了较大的提高,河道防洪标准基本都达到 20 年一遇以上。本文的洪水风险分析以 20 年一遇为界线,5 年一遇、10 年、20 年一遇洪涝灾害主要是在下游潮水高潮位顶托,排水不畅,由平原区同频率暴雨所引发涉水淹没所致;20 a 以上的洪水(50 年一遇、100 年一遇)所造成的洪涝灾害主要是由于河道洪水水位超过堤防高程,发生漫堤、溃堤、溃坝等,以及平原区的本身涉水所造成。针对 50 年一遇、100 年一遇的洪水淹没过程采用水文学方法计算出流域上游各支流

不同时段暴雨洪水过程,同时考虑上游水库调洪作用,然后再采用二维非稳定流洪水淹没演进方法,并结合下游涉水情况综合确定不同等级洪水淹没的范围。

由于本文所分析的厦门市东西溪流域(492 km²)面积相对较小,参照了研究区流域规划中的分析,在洪水风险等级分析时,上下游采用同频率洪水分析方法,下游潮位分析参照该地区已有研究成果,并考虑较不利情况,采用同频率潮位顶托情况进行分析。

东西溪流域二维水流数值模拟的水量输入包括了各个支流的水量输入过程,这些水量输入包括两部分,一部分是经过调蓄作用后的水库出流量,该部分的流量过程主要根据各水库调洪以后的出流过程得到;另一部分则为主要入流口的径流量,该部分的流量过程由新安江模型计算得到。在计算过程中,东西溪流域考虑了汀溪水库和莲花水库调洪以后洪水过程,其他上游边界入流还包括东溪安峰水闸等入流口。输入由新安江模型计算以及水库调度规则得到的各个出水口50年,100年一遇洪水的流量过程,由模型进行二维洪水演进模拟。然后借助 MIKE21 数值模拟软件,输入模拟区域的数字高程模型、模型参数以及流量过程,对东西溪流域进行50年,100年一遇洪水演进模拟,模拟结果如图2所示。由模拟结果可知,受淹没范围主要是东溪、西溪、汀溪等主干河段沿岸。

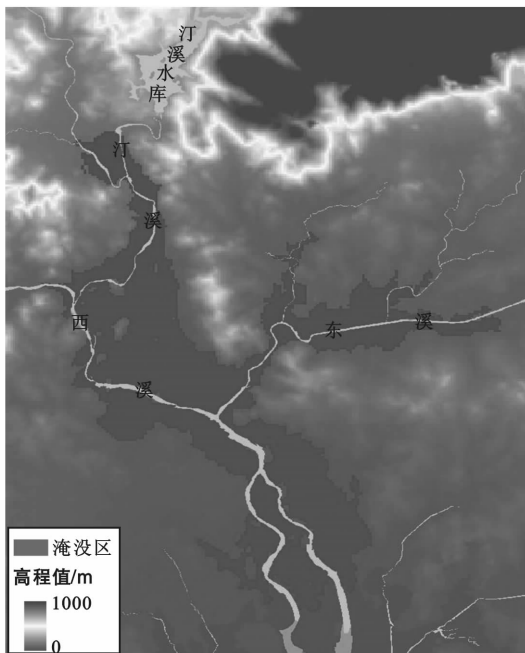


图2 东西溪流域100年一遇洪水淹没范围分布

水风险图,以显示东西溪流域地区的实时洪水淹没情况,以便人们在防洪减灾时作为参考依据。在洪水风险图绘制时,本文以厦门市同安区东西溪流域的1:5 000地形图为基础,以GIS技术作支持,通过模拟计算和GIS空间图形分析技术,充分分析了研究区所属流域的水文特性,计算不同频率洪水风险,并根据不同地区的地形、地貌以及水利工程的状况,通过洪水淹没演进计算,分析并确定不同等级洪水的淹没范围。在此基础上,借助流域GIS系统的支持,绘制出东西溪流域不同等级洪水(5,10,20,50,100年一遇)的淹没范围,分别标注为5年一遇、10年一遇、20年一遇、50年一遇、100年一遇的洪水风险区域^[13-14]。图3反映了东西溪流域洪水风险分布状况。由图3可以看出,洪灾风险主要分布在东溪、西溪、汀溪等主干流河段,100年一遇的洪灾风险则几乎遍布整个东西溪流域,影响面积约为35.97 km²。

另外,50年一遇淹没范围面积约为20.45 km²,20年一遇淹没范围面积约为6.43 km²,10年一遇淹没范围面积约为2.66 km²,5年一遇淹没范围面积约为0.578 km²。总体趋势表现为,随着洪水重现期增大,灾害风险由上游向下游,由近岸向远岸不断扩大。此外,根据洪水淹没区内土地利用等因素的变化,对不同频率洪水淹没范围进行调整修改,并借助GIS的图形编辑功能,实现东西溪流域的动态洪水风险图绘制。

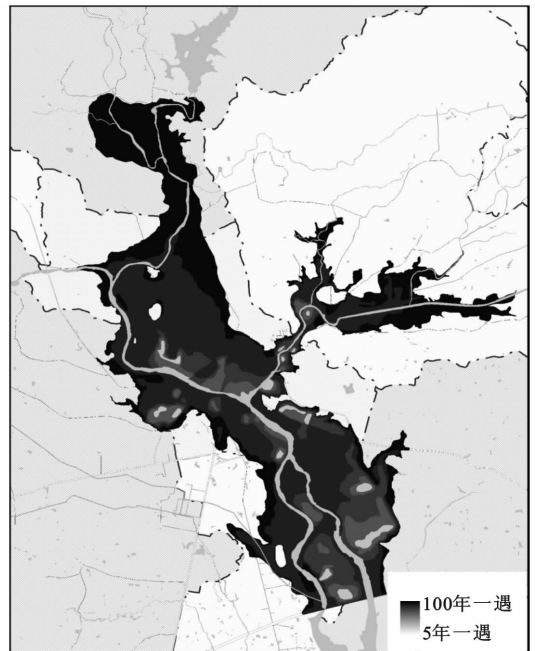


图3 厦门市东西溪流域洪水风险分布

3.2 动态洪水风险图绘制

经过上述洪水风险分析研究之后,绘制成动态洪

因动态洪水风险图中包含着洪水信息、流域图形信息以及灾情信息等内容,它作为一项防洪非工程措

施,在流域防洪减灾中发挥着重要作用,为防洪减灾工作提供了有力支持。首先,在洪水来临前,可预估洪水淹没状况以及洪灾损失情况;其次,在洪水发生时,可快速评估洪水淹没范围以及损失情况;最后,在洪水发生后,还可进行洪水淹没和损失验证分析。防汛部门可根据洪水风险图提供的相关信息来制定有效的救灾方案,提高防洪决策水平,保护人民的生命财产安全,减轻洪水可能造成的社会经济损失。

4 结论

根据城镇化背景下东南沿海小流域洪水的特点,以厦门市东西溪流域为例,重点开展了平原区洪水风险研究。本研究基于 MIKE21 平面二维水动力学模型进行洪水风险分析,以 GIS 技术为依托,综合考虑东西溪流域的实际情况及特点,进行二维洪水模拟分析;在不同等级洪水风险分析方面,本文将降雨径流概念性模型应用于设计暴雨洪水计算、洪水风险等级评估;最后,以流域 GIS 作支撑,绘制出东西溪流域的动态洪水风险图,并可根据洪水淹没区内的土地利用等因素的变化等实际情况,调整不同频率洪水淹没范围,实现东西溪流域洪水风险图的实时动态更新。

[参 考 文 献]

- [1] 许有鹏,葛小平,张立峰,等. 东南沿海中小流域平原区洪水淹没模拟[J]. 地理研究,2005,24(1):38-45.
- [2] 赵庆良,王军,许世远,等. 沿海城市社区暴雨洪水风险评价:以温州龙湾区为例[J]. 地理研究,2010,29(4):665-674.
- [3] 许有鹏,李立国,蔡国民,等. GIS支持下中小流域洪水风险图系统研究[J]. 地理科学,2004,24(4):452-457.
- [4] 李娜,程晓陶,邱绍伟. 上海市城区洪水风险图制作[J]. 中国防汛抗旱,2009(6):38-41.
- [5] 李帅杰,谢映霞,程晓陶. 城市洪水风险图编制研究:以福州为例[J]. 灾害学,2015,30(1):108-114.
- [6] 张青. 厦门市东西溪城区河道景观水位分析[J]. 水利科技,2014(2):7-10.
- [7] 厦门市统计局. 2014年厦门经济特区年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2014.
- [8] 韩学军. 连江流域设计洪水计算与研究[D]. 湖北 武汉:武汉大学,2004.
- [9] 赵人俊,王佩兰. 新安江模型参数的分析[J]. 水文,1988,8(6):2-9.
- [10] 姜俊厚. 基于 MIKE 和 GIS 洪水风险计算的应用研究[D]. 辽宁 大连:大连理工大学,2010.
- [11] 魏凯,梁忠民,王军. 基于 MIKE21 的滌洼蓄滞洪区洪水演算模拟[J]. 南水北调与水利科技,2013,11(6):16-19.
- [12] C R Yang, C T Tsai. Development of A GIS-based flood information system for floodplain modeling and damage calculation [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2000,36(3):567-577.
- [13] 马建明,徐旭,张念强,等. 沂河左堤洪水风险图编制[C]//中国水利学会青年科技工作委员会编. 中国水利学会第三届青年科技论坛论文集. 郑州:黄河水利出版社,2007:310-316.
- [14] Mark R Stevens, Steve Hanschka. Municipal flood hazard mapping: The case of British Columbia, Canada [J]. Natural Hazards, 2014,73(2):907-932.
- [15] 张运福,胡春丽,赵春雨,等. 东北地区降水年内分配的不均匀性[J]. 自然灾害学报,2009,18(2):89-94.
- [16] 李结华,陆宝宏,王童,等. 长江流域年降水集中程度分析[J]. 水电能源科学,2010(11):9-11.
- [17] 蒋薇,高辉. 21世纪长江中下游梅雨的新特征及成因分析[J]. 气象,2013,39(9):1139-1144.
- [18] 王米雪,延军平,李双双. 1960—2013年中国东南沿海地区旱涝时空变化特征及其趋势分析[J]. 资源科学,2014,36(11):2307-2315.
- [19] Liao Wenhui, Wang Xuemei, Fan Qi, et al. Long-term atmospheric visibility, sunshine duration and precipitation trends in South China[J]. Atmospheric Environment, 2015,107:204-216.
- [20] Yu Meixiu, Li Qiongfang, Michael J H, et al. Are droughts becoming more frequent or severe in China: Based on the standardized precipitation evapotranspiration index; 1951—2010 [J]. Royal Meteorological Society, 2014,34(3):545-558.

(上接第 282 页)