

# 全球变暖背景下不同暴雨对平原湖区涝灾影响模拟研究

朱勇辉<sup>1</sup>, 卢少为<sup>1</sup>, 廖鸿志<sup>2</sup>

(1. 长江水利委员会长江科学院, 武汉 430010; 2. 长江水利委员会江务局, 武汉 430010)

[摘要] 以洞庭湖腹地大通湖地区为例, 基于平面二维水流数学模型, 采用有限体积法和非结构网格, 模拟研究了全球变暖背景下不同暴雨对平原湖区涝灾的影响, 得出了不同强度暴雨下区域内涝灾分布情况及致涝率, 并定量计算分析了暴雨强度的增加对内涝造成的不利影响, 研究结果可为涝灾预测与评估等提供技术支持。

[关键词] 全球变暖; 暴雨; 平原湖区; 涝灾; 大通湖地区

[中图分类号] X43 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2010)06-0048-06

## 1 前言

近年来, 在全球变暖的大背景下, 我国局部暴雨和超强台风等极端气候事件呈现多发、并发的趋势<sup>[1]</sup>。随着全球变暖的持续发展, 这种极端气候事件的发生频率和强度仍将继续增加, 局部地区洪涝灾害发生的频率和严重程度也将进一步加剧<sup>[2]</sup>。

洞庭湖平原是我国水害最为频繁而严重的地区之一, 洪涝相伴, 两灾并重, 严重制约当地社会经济的发展, 并恶化生活环境, 污染水源, 扩大病媒昆虫滋生地。随着防洪标准的日益提高和防洪减灾技术的进步, 堤垸洪溃灾害逐渐减轻。相比之下, 区域涝灾日显突出。文章以洞庭湖腹地大通湖地区(大通湖垸)为例, 基于平面二维水流数学模型, 采用有限体积法和非结构网格, 研究该区域在3日210 mm降雨(大通湖地区排涝标准)、3日308.7 mm降雨(大通湖地区3日最大降雨 $P_{max}$ )和考虑全球变暖暴雨强度增加后的3日370.4 mm降雨(1.2 $P_{max}$ )、3日463.1 mm降雨(1.5 $P_{max}$ )和3日555.7 mm降

雨(1.8 $P_{max}$ )等不同暴雨情况下的涝灾情况, 定量分析全球变暖背景下不同强度暴雨对湖区内涝造成的不利影响。研究成果可为湖区水害治理提供技术支撑与科学依据, 对于防灾减灾, 促进洞庭湖平原的可持续发展具有重要意义。

## 2 研究区域概述

大通湖地区位于湖南省益阳市, 是洞庭湖区重点垸, 北与华容禹馨、新生两垸相接, 东与东洞庭湖相接, 南与沅江共双茶垸相望。大通湖地区分属益阳市南县、益阳市大通湖区和益阳市沅江市, 总面积1 127.4 km<sup>2</sup>, 总人口71.7万, 防洪堤长187.1 km, 设计防洪标准为20年一遇。区域内地形开阔平坦, 相对高程较小, 西高东低, 地面高程多在26.5~31 m之间, 河网发育, 沟渠纵横, 湖泊众多。

大通湖地区自然资源丰富, 农业发达, 但由于受气象、水文、地形地貌、土壤地质、水文和水利工程等因素的影响, 涝灾频繁, 经济发展受到严重制约。研究区域示意图如图1所示。

[收稿日期] 2009-12-22; 修回日期 2010-01-06

[基金项目] 中央级公益性科研院所基本科研业务费重点项目(YWF0709/HL02)

[作者简介] 朱勇辉(1975-), 男, 湖南道县人, 高级工程师, 博士, 主要从事防洪减灾、河流模拟、江湖演变与治理等方面的研究工作; E-mail: yhzhu75@yahoo.com

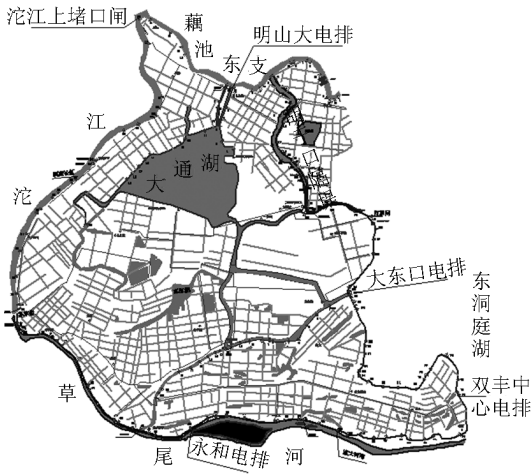


图1 大通湖地区示意图

Fig.1 Sketch of the Datong Lake region

### 3 模型介绍

采用平面二维水流数学模型,对大通湖地区进行排涝模拟,以研究该区域在不同强度暴雨情况下平原湖区的涝灾情况。

#### 3.1 基本方程

采用平面二维水流方程作为模型基本方程<sup>[3]</sup>:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1a)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{4}{3}}} - v_t \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] = 0 \quad (1b)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial y} + \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{4}{3}}} - v_t \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] = 0 \quad (1c)$$

式(1)中, $u, v$ 分别为垂线平均流速在 $x, y$ 方向上的分量; $z, h$ 分别为水位和水深; $g$ 为重力加速度; $v$ 为水流紊动黏性系数; $n$ 为糙率系数。

#### 3.2 定解条件

定解条件包括边界条件和初始条件。边界条件包括开边界和闭边界条件。在模型中进口给定流量边界条件,下游给定水位边界。闭边界即陆域边界,模型中令其法向流速分量为零。初始条件包括初始水位和初始流速条件,初始水位直接采用出口边界水位给出,初始流速为零。初始条件的偏差在计算中会很快消失,不会影响计算结果精度。

#### 3.3 模型概化

大通湖地区四面临水,北为藕池东支,南为草尾

河,西有沱江,东临东洞庭湖,内有大通湖(见图1)。考虑到内湖湖水为溃堤所隔开,堤内外流动特性不同,且涝灾易发生于内湖满蓄时,因此,文章主要模拟在内湖满蓄条件下,不同强度暴雨情况下的沥涝情况,大通湖内湖湖水不参与沥涝计算。

在计算过程中,计算域内部分节点有时会被“淹没”,有时会“干出”。为正确反映这部分节点的干湿变化,模型中采用了以下动边界模拟技术:水深小于 $h_{drying}$ 时不作为水域处理,不参与计算;水深大于某值 $h_{flooding}$ 时作为水域处理,参与计算。

本模型中将大通湖地区与外河关联处定义为开边界,主要开边界为:a. 明山大电排(抽排流量为 $126 \text{ m}^3/\text{s}$ ),大东口电排(抽排流量为 $90 \text{ m}^3/\text{s}$ ),其他小型外排泵站通过概化添加到沱江和草尾河上的两处外排泵站中;b. 五门闸(底板高程 $24.5 \text{ m}$ ,自流排水入东洞庭湖)。大通湖水系主要外排泵站概化情况见表1。

表1 大通湖水系主要外排泵站概化表

Table 1 Generalization of the main pump stations in the Datong Lake water system

名称	位置	设计流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	备注
明山	藕池东支	126	明山、大东口泵站为实际流量,双丰、永和流量是其余主要外排泵站经过概化后的值
大东口	东洞庭湖	90	
双丰	沱江	40.4	
永和	草尾	40.4	

### 4 沥涝标准

根据作物耐淹程度选定一定的水位作为涝灾评估的特征值,即为沥涝标准。涝灾发生时,农田淹水超过作物耐淹水深和耐淹历时,将对作物的正常生长形成障碍,导致农田低产。旱作物的排涝历时一般为 $2 \text{ d}$ ,水稻的排涝历时一般为 $3 \text{ d}$ 。也有规定排涝历时随设计暴雨历时而发生变动的,如不少地区采用 $1 \text{ d}$ 暴雨 $2 \text{ d}$ 或 $3 \text{ d}$ 排出, $3 \text{ d}$ 暴雨 $3 \text{ d}$ 或 $5 \text{ d}$ 排出。大通湖地区排涝标准为 $3 \text{ d}$   $210 \text{ mm}$ 降雨 $3 \text{ d}$ 排出。5月、6月、7月为洞庭湖地区涝灾多发期,这个时期属于农事活动繁忙时期,5月底至6月初抢收冬小麦,该时期发生涝灾将会影响小麦收割和其他旱地作物播种;7月棉花开花结铃、玉米抽穗、大豆开花、双季早稻成熟、双季晚稻插栽,这个时期如发生涝灾将给农业生产带来严重负面影响。大通湖地区的主要旱作物有棉花、玉米、大豆、甘薯,主要水

田作物有水稻,各种作物在易涝期的生育期、耐淹历时、耐淹水深见表 2<sup>[4]</sup>。

表 2 作物耐淹历时及耐淹水深  
Table 2 Submergence tolerating time and water depth for crops

作物	生长期	耐淹 历时/d	淹没 水深/cm
水稻	成熟(6月底~7月初)	3	50
棉花	开花、结铃(7月)	1	10
玉米	拔节抽穗(7月)	1	10
大豆	苗期(6月下旬~7月上旬)	2~3	5
	开花期(7月中下旬)	2	10
甘薯	全生育期(5月底~8月初)	2	10

## 5 模型计算

### 5.1 计算条件及参数选择

大通湖地区排涝标准为 3 日 210 mm 降雨 3 d 排出,同时,大通湖地区最大 3 日降雨为 308.7 mm。当前在全球变暖的大背景下,我国局部暴雨等极端气候事件呈现多发、并发的趋势,局部地区洪涝灾害发生的频率和严重程度也将进一步加剧。本研究中模型计算条件除考虑 3 日 210 mm 降雨(大通湖地区排涝标准)、3 日最大降雨 308.7 mm ( $P_{max}$ ) 以外,还考虑全球变暖暴雨强度增加后的 3 日 370.4 mm 降雨 ( $1.2 P_{max}$ )、3 日 463.1 mm 降雨 ( $1.5 P_{max}$ ) 和 3 日 555.7 mm 降雨 ( $1.8 P_{max}$ ) 等不同暴雨情况下的涝灾情况。

文章采用有限体积法对基本方程进行离散求解,利用非结构网格划分方法,根据区域地形,将整个计算域划分为 4 599 个三角形网格,三角形最大面积为  $40 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,最小允许角度为  $29^\circ$  (见图 2)。

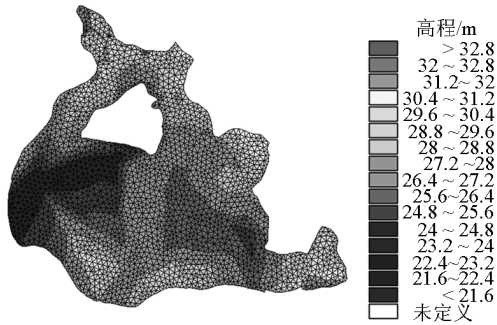


图 2 计算区网格图

Fig. 2 Meshes of the computation area

计算中主要系数包括糙率、动边界系数、紊动黏性系数和计算时间步长等,其中糙率根据经验,取 0.02 ~ 0.05;动边界系数  $h_{drying} = 0.005 \text{ m}$ ,  $h_{drying} = 0.010 \text{ m}$ ;计算时间步长取 60 s;紊动黏性系数采用 Smagorinsky 公式确定:

$$v_i = C_s \Delta^2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (2)$$

式(2)中, $u, v$  分别为  $x, y$  方向垂线平均流速; $\Delta$  为网格间距; $C_s$  为计算参数,根据经验取 0.28。

### 5.2 计算结果分析

各不同强度暴雨下在计算时段  $T = 4 \ 320 \Delta t$  即第 3 日末的致涝分布见图 3 ~ 图 7。以下以 3 日 210 mm 降雨和 3 日 308.7 mm 降雨为例进行说明。由图 3 可见,3 日 210 mm 降雨情况下,第 3 日末,积水深度超过 0.1 m 的区域主要分布在南县的八百弓和千山红农场、大通湖区的金盆镇、沅江市的南大膳镇、明山头镇和乌嘴乡的局部地区,另外在其他地方也有零星分布,这些地方积水已超过棉花、大豆和甘薯的耐淹水深和耐淹历时,严重影响其生长,造成这些旱作物减产。积水深度超过 0.5 m 的区域主要分布在八百弓、千山红、南大膳和明山头的局部地区,这些地方积水已经超过水稻耐淹历时和耐淹水深,双季早稻正处于成熟收割期,涝水将严重影响农事活动——“双抢”,如降雨持续,将会导致水稻失收,经济损失惨重。比较图 3 与图 4 可见,与 3 日 210 mm 雨型下的致涝情况相比,3 日 308.7 mm 雨型下乌嘴乡水稻致涝面积明显增大,八百弓、千山红农场、南大膳和金盆镇旱作物致涝面积、水稻致涝面积均有所增加,暴雨强度增加后所造成的灾害将更为严重。

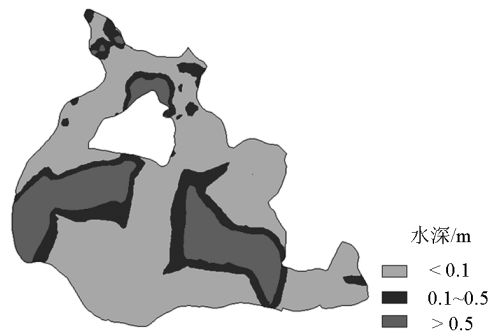


图 3 3 日 210 mm 降雨第 3 日末致涝分布图

Fig. 3 Spatial distribution of waterlogging at the end of the third day when the precipitation being 210 mm within 3 days

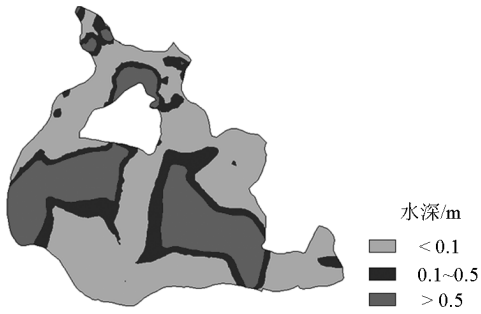


图4 3日308.7 mm降雨第3日未致涝分布图  
Fig.4 Spatial distribution of waterlogging at the end of the third day when the precipitation being 308.7 mm within 3 days



图5 3日370.4 mm降雨第3日未致涝分布图  
Fig.5 Spatial distribution of waterlogging at the end of the third day when the precipitation being 370.4 mm within 3 days

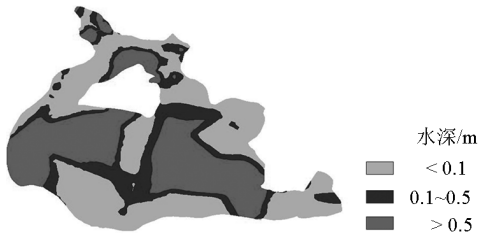


图6 3日463.1 mm降雨第3日未致涝分布图  
Fig.6 Spatial distribution of waterlogging at the end of the third day when the precipitation being 463.1 mm within 3 days

致涝率为超过作物耐淹水深的种植面积与作物

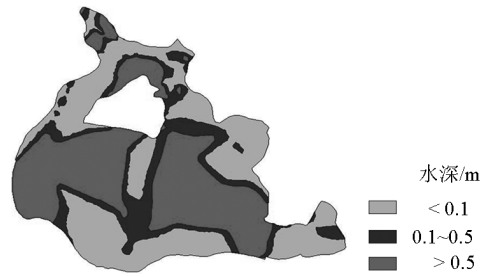


图7 3日555.7 mm降雨第3日未致涝分布图  
Fig.7 Spatial distribution of waterlogging at the end of the third day when the precipitation being 555.7 mm within 3 days

总种植面积的比值。统计大于作物淹没水深的网格数可计算得出各雨型下的致涝率(见表3~表7)。随着降雨历时的加长,致涝率迅速增加,降雨历时越长,增加幅度越大。3日210 mm雨型下降雨历时1 d,棉花、玉米首先受涝,致涝率为3.44%;降雨历时2 d,降雨超过棉花、玉米、大豆和甘薯耐淹历时和耐淹水深,致涝率为8.74%;降雨历时3 d,降雨超过全部旱作物及水稻耐淹历时和耐淹水深,致涝率为24.16%(见表3)。由此可见,内湖满蓄之后,大通湖地区设计排涝流量不足,已有排涝能力下遭遇3日210 mm降雨将造成24.16%的致涝率,不能满足排涝要求。特别是考虑全球变暖背景下极端气候事件的发生频率和强度将有所增加,如发生3日555.7 mm降雨,则第1日、2日、3日末的致涝率将分别增至5.61%、14.37%和44.98%,涝灾的严重程度和损失进一步加剧。

随着降雨历时的加长,致涝率迅速增加,降雨历时越长,增加幅度越大。此外,随着降雨强度的增大,致涝率随之加大,其中第1日末增加幅度相对较小,从3日210 mm雨型下的3.44%增加至3日308.7 mm雨型下的4.17%,绝对增加率为0.73%,相对增加率为21.2%;从3日308.7 mm雨

表3 3日210 mm降雨致涝率逐日计算表

Table 3 Calculation of waterlogging ratio when the precipitation being 210 mm within 3 days

降雨历时/d	耐淹水深/cm	大于作物耐淹水深的网格数	大于作物耐淹水深的网格百分数/%	受灾作物	受灾作物种植率/%	致涝率加权值/%
1	10	1 043	22.68	棉花、玉米受涝	15.16	3.44
	50	340	7.39			
2	10	1 325	28.81	棉花、玉米、大豆、甘薯受涝	30.32	8.74
	50	542	11.78			
3	10	1 538	33.44	旱作物、	30.32	24.16
	50	926	20.13	水稻受涝	69.68	

表4 3日308.7 mm 降雨致涝率逐日计算表

Table 4 Calculation of waterlogging ratio when the precipitation being 308.7 mm within 3 days

降雨 历时/d	耐淹水深/cm	大于作物耐淹 水深的网格数	大于作物耐淹水深的 网格百分数/%	受灾作物	受灾作物 种植率/%	致涝率加 权值/%
1	10	1 265	27.51	棉花、玉米受涝	15.16	4.17
	50	436	9.48			
2	10	1 611	35.03	棉花、玉米、大豆、甘薯受涝	30.32	10.62
	50	946	20.57			
3	10	1 870	40.66	旱作物 水稻受涝	30.32 69.68	30.77
	50	1 217	26.46			

表5 3日370.4 mm 降雨致涝率逐日计算表

Table 5 Calculation of waterlogging ratio when the precipitation being 370.4 mm within 3 days

降雨 历时/d	耐淹水深/cm	大于作物耐淹 水深的网格数	大于作物耐淹水深的 网格百分数/%	受灾作物	受灾作物 种植率/%	致涝率加 权值/%
1	10	1 393	30.29	棉花、玉米受涝	15.16	4.59
	50	504	10.96			
2	10	1 771	38.51	棉花、玉米、大豆、甘薯受涝	30.32	11.68
	50	1 081	23.51			
3	10	2 078	45.18	旱作物、水稻受涝	30.32 69.68	34.96
	50	1 403	30.51			

表6 3日463.1 mm 降雨致涝率逐日计算表

Table 6 Calculation of waterlogging ratio when the precipitation being 463.1 mm within 3 days

降雨 历时/d	耐淹水深/cm	大于作物耐淹 水深的网格数	大于作物耐淹水深的 网格百分数/%	受灾作物	受灾作物 种植率/%	致涝率加 权值/%
1	10	1 554	33.79	棉花、玉米受涝	15.16	5.12
	50	692	15.05			
2	10	1 976	42.97	棉花、玉米、大豆、甘薯受涝	30.32	13.03
	50	1 246	27.09			
3	10	2 342	50.92	旱作物、水稻受涝	30.32 69.68	40.14
	50	1 630	35.44			

表7 3日555.7 mm 降雨致涝率逐日计算表

Table 7 Calculation of waterlogging ratio when the precipitation being 555.7 mm within 3 days

降雨 历时/d	耐淹水深/cm	大于作物耐淹 水深的网格数	大于作物耐淹水深的 网格百分数/%	受灾作物	受灾作物 种植率/%	致涝率加 权值/%
1	10	1 702	37.01	棉花、玉米受涝	15.16	5.61
	50	867	18.85			
2	10	2 179	47.38	棉花、玉米、大豆、甘薯受涝	30.32	14.37
	50	1 428	31.05			
3	10	2 566	55.79	旱作物、水稻受涝	30.32 69.68	44.98
	50	1 852	40.27			

型下的 4.17 % 增加至 3 日 555.7 mm 雨型下的 5.61 % ,绝对增加率为 1.44 % ,相对增加率为 34.5 % 。第 3 日末增加幅度最大,从 3 日 210 mm 雨型下的 24.16 % 增加至 3 日 308.7 mm 雨型下的 30.77 % ,绝对增加率为 6.61 % ,相对增加率为 27.4 % ;从 3 日 308.7 mm 雨型下的 30.77 % 增加

至 3 日 555.7 mm 雨型下的 44.98 % ,绝对增加率为 14.21 % ,相对增加率为 46.2 % ;第 2 日末增加幅度居中,仅比第 1 日末的增加幅度略大,从 3 日 210 mm 雨型下的 8.74 % 增加至 3 日 308.7 mm 雨型下的 10.62 % ,绝对增加率为 1.88 % ,相对增加率为 21.5 % ;从 3 日 308.7 mm 雨型下的 10.62 %

增加至3日555.7 mm雨型下的14.37%，绝对增加率为3.75%，相对增加率为35.3%。不同强度暴雨情况下各日末的致涝率情况见图8。

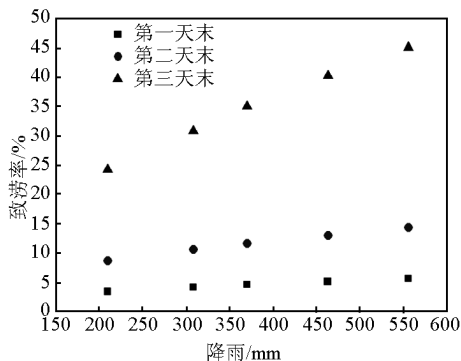


图8 不同强度暴雨情况下各日末致涝率情况  
Fig. 8 Waterlogging ratio at the end of each day under different rainstorms

## 6 结语

长江中下游平原湖区涝灾极为严重,文章以洞庭湖腹地大通湖地区为例,基于平面二维水流数学模型,采用有限体积法和非结构网格,模拟研究全球变暖背景下不同暴雨对平原湖区涝灾的影响,得到不同强度暴雨下区域内涝灾分布情况及致涝率,并定量计算分析暴雨强度的增加对内涝造成的不利影响。

研究结果显示,随着降雨历时的加长,致涝率迅速增加,降雨历时越长,增加幅度越大。同时,随着暴雨强度的增加,区域内涝灾分布和致涝率也显著增加。例如,当暴雨从大通湖地区3日最大降雨308.7 mm增加至全球变暖背景下暴雨强度增加后的3日555.7 mm降雨时,第1日末的致涝率从4.17%增加至5.61%,绝对增加率为1.44%,相对增加率为34.5%;第3日末的致涝率则从30.77%增加至44.98%,绝对增加率为14.21%,相对增加率为46.2%。

研究结果还显示,内湖满蓄之后,大通湖地区设计排涝流量不足,已有排涝能力下如遭遇大通湖地区排涝标准3日210 mm降雨将造成24.16%的致涝率。如考虑到全球变暖背景下极端气候事件的发生频率和强度将有所增加,涝灾的严重程度和损失还将进一步加剧。

## 参考文献

- [1] 刘吉峰,丁裕国,江志红. 全球变暖加剧对极端气候概率影响的初步探讨[J]. 高原气象, 2007, 26(4):837-842
- [2] 陈家其. 全球变暖与中国旱涝灾害大势的初步研究[J]. 自然灾害学报, 1996, 5(2):28-35
- [3] 谭维炎. 计算浅水动力学[M]. 北京:清华大学出版社,1998
- [4] 郭元裕. 农田水利学[M]. 武汉:武汉水利电力大学出版社,1997

# Modeling the influences of various rainstorms on the waterlogging in lake regions under the background of global warming

Zhu Yonghui<sup>1</sup>, Lu Shaowei<sup>1</sup>, Liao Hongzhi<sup>2</sup>

(1. Changjiang River Scientific Research Institute, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China; 2. River management Bureau, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

[Abstract] Based on the two-dimensional flow model and by applying the finite volume method and unstructured mesh, the waterlogging and drainage of the Datong Lake Region, heartland of the Dongting Lake Plain under various rainstorms were studied. The spatial distribution of waterlogging in the Datong Lake Region and the ratio of waterlogging were obtained. The negative influences of the increased intensity of the rainstorms on the waterlogging were analyzed quantitatively. The results of the research can provide technological support to the waterlogging forecasting and assessment.

[Key words] global warming; rainstorm; lake regions; waterlogging; the Datong Lake region