

基于行洪除涝功能的适宜水域率确定方法研究

张云龙^{1,2}, 王烜^{1,2}, 李春晖², 蔡宴朋¹, 王慧聪¹

(1. 北京师范大学 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875;

2. 北京师范大学 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875)

摘要: 保障基于行洪除涝功能的适宜水域率是快速城镇化背景下, 增强降水储蓄能力、降低区域洪涝灾害损失的重要手段。提出了考虑暴雨强度和下垫面条件, 基于行洪除涝功能的适宜水域率确定方法, 并以国家重点防洪城市安徽省蚌埠市为例, 计算了不同行洪除涝标准下的各下垫面产流量, 结合区域现有的排涝能力, 通过减少水田面积和增加水体面积来提升区域行洪除涝能力, 从而估算出适宜水域率。计算得到在50年一遇1日暴雨量和100年一遇3日暴雨量标准下, 蚌埠市所需水域率阈值为12.5%~19.5%。该研究思路和计算方法可为全国其他区域适宜水域率的研究提供参考, 对面向区域水安全的城市规划和生态环境管理具有重要意义。

关键词: 行洪除涝; 适宜水域率; 暴雨强度; 下垫面产流; 水安全

中图分类号: TV122

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)04-0007-05

Research of the suitable water surface ratio based on flooding transfer and drainage management

ZHANG Yunlong^{1,2}, WANG Xuan^{1,2}, LI Chunhui², CAI Yanpeng¹, WANG Huicong¹

(1. State Key Laboratory of Water Environment Simulation, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Key Laboratory for Water and Sediment Sciences of Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Under the background of rapid urbanization, it is an important mean to enhance the storage capacity of precipitation and reduce the damage losses from floods by guaranteeing the suitable water surface ratio based on the functions of flooding transfer and drainage management. In this study, by considering the rainstorm intensity and the underlying surface conditions, the method of the suitable water surface ratio determination for flooding transfer and drainage management is proposed. Taking Bengbu City in Anhui Province, a national key flood control city as an example, surface runoff yield from various underlying surfaces was calculated under different standards of flooding transfer and drainage management for a certain rainstorm intensity. Then the drainage capacity was planned to increase through reducing paddy field area and increasing water area with a consideration of required drainage capacity, and the suitable water surface ratios were calculated. In Bengbu city, the suitable water surface ratio is 12.5%~19.5% under the standard of one day rainstorm amount in 50-year-returning period and three days rainstorm amount in 100-year-returning period. The research route and calculation methods can provide references for the research of suitable water surface ratios in other regions and have great significance to urban planning and ecological environment management oriented towards regional water security.

Key words: flooding transfer and drainage management; suitable water surface ratio; rainfall intensity; underlying surface runoff; water safety

1 研究背景

水域作为人类社会的重要组成部分, 为人类社

会的生产生活提供了多种生态服务功能, 如行洪除涝、改善人居环境等。然而, 随着城镇化进程的不断加速, 各地区下垫面发生着显著的变化, 大量的水体

收稿日期: 2018-03-08; 修回日期: 2018-04-13

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0401302); 国家自然科学基金项目(51679008)

作者简介: 张云龙(1990-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士研究生, 研究方向为流域水资源管理。

通讯作者: 王烜(1973-), 女, 云南昆明人, 博士, 教授, 研究方向为流域水安全。

被侵占,随之引发了一系列生态环境问题。其中,由于水域空间缺乏导致对降水储蓄能力降低、吸纳消解城市洪涝的能力严重不足等问题尤为突出,给人类的生命和财产带来巨大损失^[1-2]。行洪除涝作为区域水体最重要的功能之一,与人居环境的维护密切相关,同时也是水安全的核心评价指标之一^[3]。城市生态系统行洪除涝功能的正常发挥需要有一定的水域空间作为支撑。适宜水域率是从某一区域的现状和现行有效法律、法规、规范、标准出发,考虑水域的多种功能,提出评估在自然力与人类活动双重作用下人类社会和水域自身的协调发展程度的一项指标,旨在促进人类与自然和谐共处^[4]。因此,如何根据暴雨强度和下垫面特征,结合现行行洪除涝标准,提出兼顾科学性和可操作性、基于行洪除涝功能的适宜水域率计算方法对于城市水安全管理显得尤为重要。

我国在《城市水系规划规范》(GB50513-2009(2016年版))中,提出了针对城市的适宜水域面积率,对城市区位进行划分,分为一区城市、二区城市、三区城市,规定水域面积率分别为8%~12%、3%~8%、2%~5%。该划分结果没有充分考虑区域降水和下垫面结构特征,具有主观性,不符合实际水域发展需要。胡尧文等^[5]、王士武等^[6]根据区域行洪除涝标准,在城市防洪排涝治理时,对增加区域内部水域的滞洪能力的城区合理水域率进行论证。此外,一些学者通过数学模型模拟方法来计算基于行洪除涝功能的适宜水域率,其中最为常见的是利用MIKE系列软件进行区域水力学模拟^[3,7]。虽然模型模拟方法具有一定的优势,但该方法对基础数据的要求较高,并且模型的通用性较差,不适合在全国范围内推广。总体来看,目前适宜水域率没有统一的计算方法和标准,定量计算方法的研究亟待深入。针对各区域暴雨强度和下垫面产流量不同的特点,本文提出基于行洪除涝功能的适宜水域率确定方法,并以国家重点防洪城市安徽省蚌埠市为例进行实证研究。本研究可为制定面向洪涝灾害防治、人居环境健康的城市规划和生态环境管理提供科学依据,并为全国各地区适宜水域率的研究提供借鉴。

2 计算方法

本研究以不同地区暴雨强度和下垫面种类产流量不同作为出发点,构造水域行洪除涝的适宜水域率确定方法的理论框架及流程(图1)。首先,该模型根据区域暴雨强度以及各下垫面产流公式,计算

各下垫面条件下的产流特征以及区域总产流量;其次,根据当前下垫面情景下的总产流量,确定区域所需排涝能力($q_{需}$);再次,判断区域实际所能提供排涝能力($q_{实}$)能否满足所需排涝能力($q_{需}$),如果不能满足($q_{需} > q_{实}$),则调整研究区各类型下垫面所占比例,增加水域面积;最后,确定区域适宜水域率。该方法概念清晰、计算简便,实用性强,可避免运用流域水文模型(如MIKE系列软件等)时繁复的数据收集和运算,便于相关管理部门推广应用。

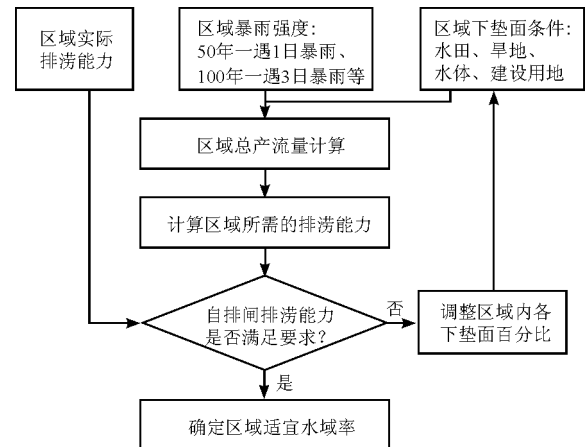


图1 适宜水域率计算的理论框架及流程

2.1 暴雨强度计算

暴雨强度公式用于计算单位面积上某一历时降雨的体积。目前,全国大部分城市都建立了适应于本地区的暴雨强度公式^[8]。本研究利用在城市化区域排水设计中常采用的短历时暴雨强度公式,设置不同防洪标准下的降雨情景,为城市洪涝灾害预警与预防提供基础。短历时暴雨强度公式如下:

$$q = \frac{167A_1(1 + C \lg P)}{(t + b)^n} \quad (1)$$

式中: A_1 为雨力参数, mm; C 为雨力变动参数; P 为重现期, a; t 为降雨历时, min; b 为降雨历时修正参数, min; n 为暴雨衰减指数; q 为重现期为 P 年的 t 时段内平均降水强度, $L/(s \cdot \text{hm}^2)$ 。

2.2 下垫面产流计算

针对平原地区,本研究采用蓄满产流的方法,对各下垫面在设计暴雨情景下的产流量进行计算。将下垫面划分为水田、旱地(包括荒地)、水体和建设用地4类,针对不同下垫面的产流特点,分别采用以下公式(2)~(6)计算其产流量。

$$R_{\text{水田}} = P - h_{\text{田蓄}} - E_{\text{水田}}t, E_{\text{水田}} = \beta E_{80} \quad (2)$$

$$R_{\text{旱地}} = \alpha_{\text{旱地}} P \quad (3)$$

$$R_{\text{水体}} = P - h_{\text{蓄}} - E_{\text{水体}}t, E_{\text{水体}} = \gamma E_{20} \quad (4)$$

$$R_{\text{建设}} = \alpha_{\text{建设}} P \quad (5)$$

$$R_{\text{总}} = f_{\text{水田}} R_{\text{水田}} + f_{\text{旱地}} R_{\text{旱地}} + f_{\text{水体}} R_{\text{水体}} + f_{\text{建设}} R_{\text{建设}} \quad (6)$$

式中: $R_{\text{水田}}$ 为水田产流量, mm; P 为降雨量, mm; $h_{\text{田蓄}}$ 为水田滞蓄水深, mm; $E_{\text{水田}}$ 为水田田间蒸发量, mm/d; t 为排涝天数; β 为水田蒸发折算系数; E_{80} 为 80 cm 蒸发皿水体平均日蒸发量, mm/d; $R_{\text{旱地}}$ 为旱地产流量, mm; $\alpha_{\text{旱地}}$ 为旱地径流系数, 取 0.2; $R_{\text{水体}}$ 为水体产流量, mm; $h_{\text{蓄}}$ 为水体滞蓄水深, 即汛前预降水深, mm; $E_{\text{水体}}$ 为水体蒸发量, mm/d; γ 为水体蒸发折算系数; E_{20} 为 20 cm 蒸发皿水体平均日蒸发量, mm/d; $R_{\text{建设}}$ 为建设用地产流量, mm; $\alpha_{\text{建设}}$ 为建设用地径流系数, 取 0.75; $R_{\text{总}}$ 为单位面积总产流量, mm; $f_{\text{水田}}$ 为水田面积百分比, %; $f_{\text{旱地}}$ 为旱地面积百分比, %; $f_{\text{水体}}$ 为水体面积百分比, %; $f_{\text{建设}}$ 为建设用地面积百分比, %。

2.3 适宜水域率确定

根据研究区单位面积总产流量($R_{\text{总}}$), 研究区面积(A) 以及作物允许耐淹历时确定的排涝天数(t), 计算各暴雨情景下区域所需的排涝能力($q_{\text{需}}$)。如果区域所需排涝能力大于实际所能提供的排涝能力($q_{\text{需}} > q_{\text{实}}$), 就会出现洪涝灾害风险。本研究通过合理调整各下垫面面积比, 从而减少产流量, 使所需排涝能力满足区域实际所能提供的排涝能力。最终, 根据优化后各下垫面的面积比, 确定区域适宜的水域率, 公式如下:

$$q_{\text{需}} = \frac{(f_{\text{水田}} R_{\text{水田}} + f_{\text{旱地}} R_{\text{旱地}} + f_{\text{水体}} R_{\text{水体}} + f_{\text{建设}} R_{\text{建设}}) \cdot A}{t \cdot k} \quad (7)$$

约束条件:

$$f_{\text{水体}} = 1 - f_{\text{水田}} - f_{\text{旱地}} - f_{\text{建设}}, q_{\text{实}} > q_{\text{需}} \quad (8)$$

式中: $q_{\text{需}}$ 为区域所需的排水能力, m^3/s ; $q_{\text{实}}$ 为区域实际所能提供的排水能力, m^3/s ; $R_{\text{水田}}$ 、 $R_{\text{旱地}}$ 、 $R_{\text{水体}}$ 、 $R_{\text{建设}}$ 分别为水田、旱地、水体、建设用地单位面积产流量, mm; $f_{\text{水田}}$ 、 $f_{\text{旱地}}$ 、 $f_{\text{水体}}$ 、 $f_{\text{建设}}$ 分别为水田、旱地、水体、建住用地面积比例, %; A 为区域面积, m^2 ; t 为排涝天数, 主要根据作物的允许耐淹历时确定; k 为时间单位换算系数, 8.64×10^7 。

3 应用实例

3.1 研究区概况

蚌埠市地处安徽省东北部(图2), 位于淮河中游, 地势相对平坦, 地面高程在 20 m 左右。境内水

系纵横, 河网众多, 属淮河流域内的中心城市, 同时也是全国性综合交通枢纽城市。由于淮河干流水位较高, 同时内河下游地势相对低洼, 导致蚌埠市内水自排不畅, 每年汛期洪水持续时间长达 5 个月(5 - 9 月)。因此, 蚌埠市是国家防汛抗旱指挥部首批确定的全国 25 座重点防洪城市之一, 暴雨时极易形成洪涝灾害, 如 1950、1954、1956、1965、1972 和 1991 年等均发生了较为严重的洪涝灾害^[9-10]。蚌埠市包括 4 区 3 县, 总面积为 5 952 km^2 , 总人口 345 $\times 10^4$ 人^[11]。淮河流域是我国各大流域中人口最稠密的地区和重要的粮食生产基地之一, 保障农业安全和人居安全具有举足轻重的地位。故本研究将蚌埠市作为研究基于行洪除涝功能的适宜水域率的代表性区域。

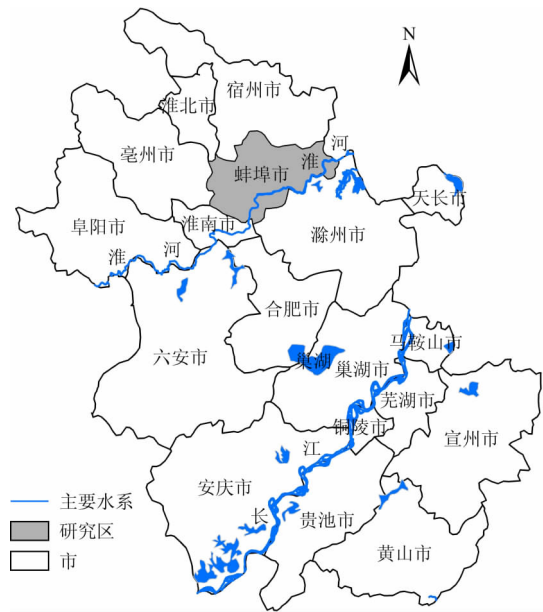


图2 研究区位置图

3.2 结果与分析

3.2.1 蚌埠市暴雨强度情景设置 根据蚌埠市暴雨强度公式(公式(1)中取 $C = 0.77$, $b = 12 \text{ min}$, $A_1 = 15.27 \text{ mm}$, $n = 0.774$)^[12], 计算不同重现期下 1 日和 3 日降雨历时平均暴雨强度(图3)。结果显示: 不同重现期下平均暴雨强度范围为 4.8 ~ 25 $\text{L}/(\text{s} \cdot \text{hm}^2)$ 。根据平均暴雨强度以及降雨历时, 计算蚌埠市不同重现期下 1 日和 3 日降雨历时总降雨量, 计算结果见图4。结果显示: 50 年一遇 1 日降雨历时下总降雨量为 181.54 mm, 100 年一遇 3 日降雨历时下总降雨量达到 257.17 mm。

3.2.2 各下垫面单位面积产流量 通过相关文献的查阅, 确定蚌埠市 $E_{\text{水田}} = 7 \text{ mm/d}$ 、 $E_{\text{水体}} = 4$

mm/d、 $h_{田蓄} = 60$ mm、 $h_{蓄} = 600$ mm, 研究区主要种植作物小麦耐淹天数为 2 d, 则 $t = 2d$ [13-15]。采用公式(2)~(5)计算各下垫面单位面积产流量。其中, 产流量负值代表在当前暴雨强度和滞蓄水深情景下, 下垫面不会发生蓄满产流, 相反还具有容纳其他下垫面产流量的能力, 负值越小表示剩余容纳能力越强。计算结果见图 5 和 6。

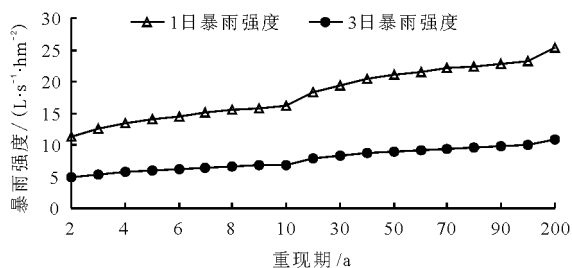


图3 蚌埠市不同重现期 1 日和 3 日降雨历时下平均暴雨强度

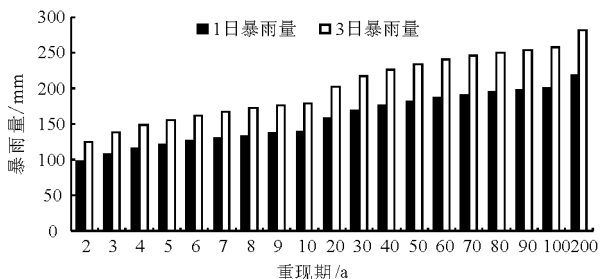


图4 蚌埠市不同重现期 1 日和 3 日降雨历时下总降雨量

蚌埠市 50 年一遇 1 日暴雨量情景下, 单位面积水田、旱地、水体及建设用地产流量分别为 107.5、36.3、-426.5 和 136.2 mm (图 5)。100 年一遇 3 日暴雨量情景下, 蚌埠市单位面积水田、旱地、水体及建设用地产流量分别为 183.2、51.4、-350.8 和 192.9 mm (图 6)。计算结果表明: 单位面积的建设用地和水田产流量较高。因此, 理论上预防暴雨洪涝灾害发生最有效的方式是优化各下垫面百分比, 降低建设用地和水田面积, 同时增加水体面积, 减少区域总产流量, 从而降低洪涝灾害发生的可能性和危害性。

3.2.3 蚌埠市单位面积总产流量 以 2005 年土地利用状况为例, 蚌埠市总面积为 5 952 km², 其中水田占 18%, 旱田及自然保留地占 59%, 建设用地占 13%, 水域面积占 10%。根据各下垫面单位面积产流量特点, 根据公式(6)计算蚌埠市单位面积总产流量, 结果见图 7。在 1 日暴雨情景下, 10 年重现期标准之内均不会发生蓄满产流现象。而在 3 日暴雨情景下, 4 年重现期标准以内不会发生蓄满产流。

在蚌埠市 50 年一遇 1 日暴雨量标准下, 单位面积总产流量为 15.8 mm。而在 100 年一遇 3 日暴雨量标准下, 单位面积总产流量达 53.3 mm。

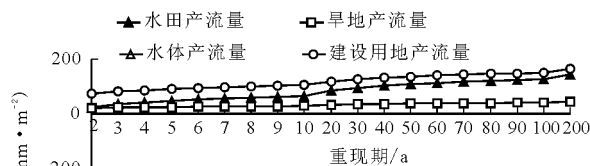


图5 蚌埠市不同重现期 1 日暴雨量下各下垫面单位面积产流量

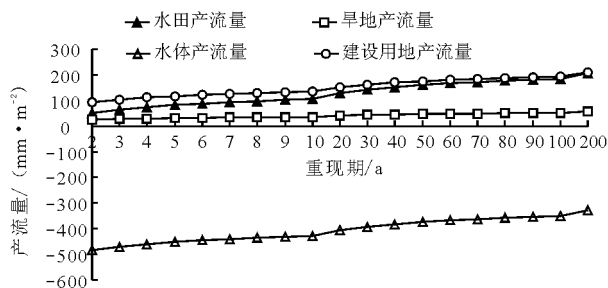


图6 蚌埠市不同重现期 3 日暴雨量下各下垫面单位面积产流量

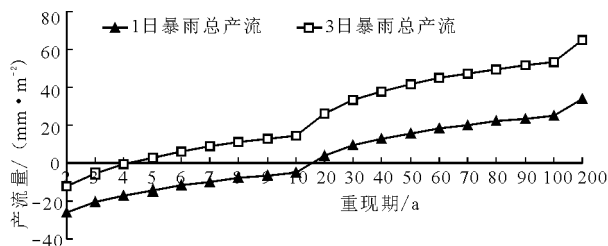


图7 蚌埠市不同重现期 1 日和 3 日暴雨量下单位面积总产流量

3.2.4 蚌埠市适宜水域率 将蚌埠市 50 年一遇 1 日暴雨 2 d 排到作物耐淹深度以下和 100 年一遇 3 日暴雨 2 d 排到作物耐淹深度以下情景作为排涝标准。以 2005 年为例, 采用式(7)计算蚌埠市不同排涝标准下所需的排水能力结果见表 1、图 8。其中, 50 年一遇 1 日暴雨 2 d 排完所需的区域排涝能力为 545.3 m³/s, 而 100 年一遇 3 日暴雨 2 d 排完所需的排涝能力为 1 836.1 m³/s。因此, 在该排涝标准下, 2005 年蚌埠需要的排涝能力为 545.3 ~ 1 836.1 m³/s。而蚌埠市实际排涝能力仅为 129.89 m³/s, 其中排水管网排水能力为 87.4 m³/s, 电排能力为 42.49 m³/s。因此, 2005 年的实际排涝能力无法满足当年土地利用条件下所产生的径流量。

在区域实际排涝能力不变的前提下, 根据单位

面积的水田和建设用地产流量较大的特点,本研究通过降低水田面积和增加水体面积的方法,降低区域产流量,来满足区域的实际排水能力。在 50 年一遇 1 日暴雨情景下,需将水田面积减少 2.5%,同时水体面积增加 2.5% (水体面积达 12.5%),区域所需排水能力将下降到 85.5 m³/s (小于实际排涝能力 129.89 m³/s)。而在 100 年一遇 3 日暴雨情景下,需将水田面积减少 9.5%,同时水体面积增加 9.5% (水体面积达 19.5%),区域所需排水能力将下降到 88.7 m³/s。因此结果表明:在 50 年一遇 1 日暴雨和 100 年一遇 3 日暴雨标准下,蚌埠所需的水域率阈值范围为 12.5% ~ 19.5%。

表 1 蚌埠市不同排涝标准下所需排涝能力 m³/s

重现期/a	1 日暴雨所需排水能力	3 日暴雨所需排水能力	重现期/a	1 日暴雨所需排水能力	3 日暴雨所需排水能力
2	-899.57	-424.50	30	316.02	1140.35
3	-717.56	-190.20	40	445.16	1306.59
4	-588.43	-23.96	50	545.32	1435.54
5	-488.26	104.98	60	627.16	1540.89
6	-406.42	210.34	70	696.36	1629.97
7	-337.23	299.41	80	756.29	1707.13
8	-277.29	376.58	90	809.16	1775.19
9	-224.42	444.64	100	856.46	1836.07
10	-177.12	505.52	200	1167.60	2236.61
20	134.02	906.06			

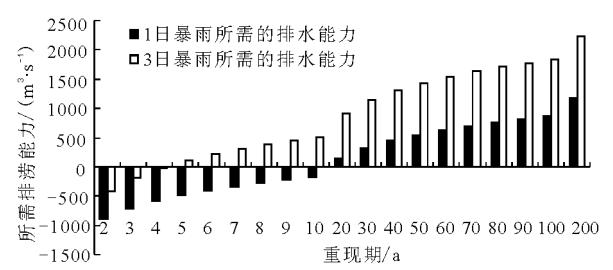


图 8 蚌埠市不同排涝标准下所需排涝能力

3.2.5 适宜水域率合理性分析 根据国内关于水域率的相关研究成果^[4,16-17],不同区域的适宜水域率存在显著差异。在我国水资源较为丰富的长江以南地区(广州、湖南、浙江、福建、海南等),所需的水域面积较大,应保持在 15% ~ 25%;在水资源量中等的长江和淮河之间的中东部地区(湖北、安徽、江苏等),水域率建议保持在 10% ~ 15%;在水资源较为短缺的黄河与淮河之间的中东部地区以及东北地

区,水域率应在 5% ~ 10%;而在水资源相对短缺的华北地区,水域率建议保持在 1% ~ 5%。本文研究结果与上述全国水域率建议标准基本吻合,而计算中充分考虑了区域的除涝标准、暴雨强度和下垫面产流量,较好地体现了区域下垫面结构的差异和不同的暴雨特征,因而更加客观、合理。

4 结 论

针对近年来洪涝灾害频繁,本文探究了不同暴雨量和下垫面条件下基于行洪除涝功能的适宜水域率,提出易于在全国推广和使用的基于行洪除涝功能的适宜水域率计算方法。同时本文以蚌埠市作为研究区进行实证研究,得出以下结论:

(1)本研究所建立的基于行洪除涝功能的适宜水域率计算方法,考虑了各区域暴雨强度不同和各个下垫面条件的产流量不同的特点,使计算结果可行、实用性强并且易于操作,可为全国各地区适宜水域率的研究提供经验和借鉴,对区域洪涝灾害预防具有重要意义。

(2)蚌埠市各类型下垫面具有不同的产流特点,其中单位面积的建设用地和水田产流量较高。在蚌埠市 50 年一遇 1 日暴雨量和 100 年一遇 3 日暴雨量情景下,单位面积总产流量分别为 15.8、53.3 mm,所需的排涝能力分别为 545.3、1 836.1 m³/s,远大于蚌埠市所能提供的排涝能力。城市规划中可通过降低水田面积和增加水体面积的方法,降低洪涝灾害发生的可能性和危害性,确定蚌埠市所需的水域率阈值范围为 12.5% ~ 19.5%。

参考文献:

[1] 侯春生. 城市洪涝灾害的形成及防治措施[J]. 环境与发展, 2017, 29(3):101-102.

[2] 黄春豹. 论我国城市洪涝灾害应急管理[D]. 长春:吉林大学, 2013.

[3] 张志飞. 平原河网地区城市人居环境合理水面率研究[D]. 杭州:浙江大学, 2006.

[4] 杨树滩, 仲兆林, 华 萍. 江苏省适宜水面率研究[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(7):31-34.

[5] 胡尧文, 申来明, 裘骅勇. 试论水库功能调整和调蓄水面在城市防洪排涝中的重要性[J]. 浙江水利水电学院学报, 2001, 13(3):19-21.

[6] 王士武, 杨铁锋, 温进化. 行洪除涝的合理水面率研究[J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(2):72-76.

(下转第 17 页)

- 流域生态系统健康评价[J]. 环境科学学报, 2015, 35(4): 1250-1258.
- [2] 魏建文, 赵淞盛, 王敦球. 基于PSR框架的漓江流域生态健康评价[J]. 桂林理工大学学报, 2013, 33(4): 706-710.
- [3] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). Environmental indicators development, measurement and use[R]. Paris: OECD, 2003, 13-15.
- [4] 裴辉儒, 张颖. 基于收益率与改善生态环境效率视角的碳金融风险研究[J]. 统计与信息论坛, 2015, 30(9): 48-54.
- [5] NIEMEIJER D, GROOT R S D. Framing environmental indicators: moving from causal chains to causal networks[J]. Environment Development & Sustainability, 2008, 10(1): 89-106.
- [6] 郭树宏, 王菲凤, 张江山, 等. 基于PSR模型的福建山仔水库生态安全评价[J]. 湖泊科学, 2008, 20(6): 814-818.
- [7] 王文敬, 任德有, 李铁松, 等. 基于PSR模型的四川省升钟水库生态安全评价[J]. 水土保持通报, 2010, 30(4): 198-200.
- [8] 颜利, 王金坑, 黄浩. 基于PSR框架模型的东溪流域生态系统健康评价[J]. 资源科学, 2008, 30(1): 107-113.
- [9] 杨倩. 基于PSR模型的河北省生态安全评价研究[J]. 环境科学与管理, 2017, 42(2): 185-189.
- [10] 申开丽, 俞洁, 傅智慧, 等. 基于PSR模型的长潭水库生态安全评价研究[J]. 环境科学与管理, 2014, 39(11): 166-169.
- [11] 李中才, 刘林德, 孙玉峰, 等. 基于PSR方法的区域生态安全评价[J]. 生态学报, 2010, 30(23): 6495-6503.
- [12] 李新旺, 张之韬, 张学沛. 基于PSR模型的华北平原水土流失易发性评价指标体系初探[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(2): 283-285.
- [13] 毕安平, 朱鹤健. 基于PSR模型的水土流失区生态经济系统耦合研究——以朱溪河流域为例[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(8): 1023-1030.
- [14] 冯惠娟, 杨海娟. 基于压力-状态-响应模型的榆林市可持续发展评价及预测[J]. 水土保持通报, 2013, 33(4): 64-69.
- [15] 张梦婕, 官冬杰, 苏维词. 基于系统动力学的重庆三峡库区生态安全情景模拟及指标阈值确定[J]. 生态学报, 2015, 35(14): 4880-4890.
- [16] 郭嵘, 黄梦石, 白玉静. 基于综合指数法的哈尔滨生态安全评价研究[J]. 城市环境与城市生态, 2015, 28(5): 23-28.
- [17] 秦国明, 孙希昌. 综合指数法在农业生态系统效益评价中的应用[J]. 广东农业科学, 2007(12): 94-95.
- [18] 熊鸿斌, 陆冬梅. 综合指数法在环巢湖旅游大道生态环境影响分析中的应用研究[J]. 环境污染与防治, 2013, 35(11): 46-50+55.
- [19] 费娟, 郑浩, 于洋, 等. 应用综合指数法评价江苏省城市生活饮用水水质[J]. 江苏预防医学, 2017, 28(4): 372-375.
- [20] 朱国宇, 熊伟. 模糊评价法与综合指数法在生态影响后评价中的应用比较研究[J]. 东北农业大学学报, 2011, 42(2): 54-59.

(上接第11页)

- [7] 初祁, 彭定志, 徐宗学, 等. 基于MIKE11和MIKE21的城市暴雨洪涝灾害风险分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2014, 50(5): 446-451.
- [8] 王杰, 杨银, 吴红, 等. 兰州市暴雨强度公式拟合方法研究[J]. 高原山地气象研究, 2016, 36(4): 23-27.
- [9] 张念强, 马建明, 邱沛炯, 等. 安徽蚌埠市城区洪水风险分析研究[J]. 中国防汛抗旱, 2015, 25(4): 21-24+68.
- [10] 陆桂华, 张亚洲, 肖恒, 等. 气候变化背景下蚌埠市暴雨与淮河流域上游洪水遭遇概率分析[J]. 气候变化研究进展, 2015, 11(1): 31-37.
- [11] 尹殿胜, 张玉梅, 习亚红. 浅谈蚌埠市城市防洪[J]. 水利规划与设计, 2005(4): 13-14.
- [12] 北京市市政设计院. 给水排水设计手册: 第五册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986.
- [13] 罗文兵. 下垫面变化对农田排涝流量的影响研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
- [14] 闫桂霞, 李登华. 1961-2006年我国水面蒸发时空变化特征分析[J]. 水电能源科学, 2015, 33(10): 1-5.
- [15] 王燕. 安徽省沿江圩区农田排涝模计算[J]. 水利经济, 2000(4): 40-45.
- [16] 王超. 城市水生态系统建设与管理[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市水系规划规范: GB50513-2009(2016年版)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.