

居住区“蓄排平衡”调度智能化的设计

刘广文¹, 徐福龙², 张荣辰¹, 蒋水兵², 孙庆霞¹, 赵蕾¹, 刘欣¹, 柴琦¹

1. 山东城市建设职业学院, 山东 济南 250103;

2. 中铁建设集团中原建设有限公司, 河南 郑州 450000

DOI: 10.61369/SSSD.2025140024

摘要: 随着城市开发建设的不断发展, 内涝现象不断增多, 虽然城市建设者们采取了提升管网重现期设计标准等一些列的措施, 但是内涝仍然频发, 部分内涝造成的经济损失很大。基于城阳区棘洪滩街道棘洪滩项目(C地块)“蓄排平衡”思路进行调度智能化设计, 研究了如何获取气象信息、包气带信息, 并利用这些信息进行智能化调度, 利用滞蓄空间, 有效提高居住区的韧性, 缓减内涝, 使居住区排水系统达到健康可持续发展。研究表明, 在居住区内设置自动气象监测站, 并结合天气预报, 依据工程地质勘察报告中的包气带厚度, 结合预测降雨量、降雨强度、蒸散发量、上层和下层土壤的初始含水量、壤中流、饱和地面径流及地下水径流, 根据计算结果提出蓄排平衡调度建议, 实现蓄排平衡管理, 可为增强居住区韧性提供借鉴。

关键词: 居住区; 蓄排平衡; 调度; 智能化

Design of Intelligent Scheduling for "Storage and Discharge Balance" in Residential Areas

Liu Guangwen¹, Xu Fulong², Zhang Rongchen¹, Jiang Shuibing², Sun Qingxia¹, Zhao Lei¹, Liu Xin¹, Chai Qi¹

1. Shandong Vocational University of Urban Construction, Jinan, Shandong 250103

2. China Railway Construction Group Central Plain Construction Co., Ltd, Zhengzhou, Henan 450000

Abstract: With the continuous development of urban development and construction, the phenomenon of waterlogging is increasing. Although urban builders have taken a series of measures such as improving the return period design standards of pipeline networks, waterlogging still occurs frequently, and some waterlogging causes significant economic losses. Based on the "storage and discharge balance" concept of the Jihongtan project (Block C) in Jihongtan Street, Chengyang District, intelligent scheduling design was carried out. The study investigated how to obtain meteorological information and unsaturated zone information, and use this information for intelligent scheduling. By utilizing the stagnant storage space, the resilience of residential areas can be effectively improved, waterlogging can be alleviated, and the drainage system of residential areas can achieve healthy and sustainable development. Research has shown that setting up automatic meteorological monitoring stations in residential areas, combined with weather forecasts, based on the thickness of the unsaturated zone in the engineering geological survey report, combined with predicted rainfall, rainfall intensity, evapotranspiration, initial moisture content of upper and lower soil, soil flow, saturated surface runoff, and groundwater runoff, proposes storage and discharge balance scheduling suggestions based on the calculation results to achieve storage and discharge balance management, which can provide reference for enhancing the resilience of residential areas.

Keyword: residential area; storage and discharge balance; dispatch; intelligentization

引言

近年来异常天气频发, 城市内涝灾害不断, 既反映了自然气候的不确定性, 也暴露出城市建设及灾害预防中存在的问题。究其原因, 在城市大规模开发建设中, 没有充分考虑蓄排平衡, 没有采用先进的技术手段对降水情况预测和蓄排平衡组织是一个重要原因。采取“汇流分析-降水预测-蓄水预测-智能调度”的“蓄排平衡”思路进行居住区蓄排平衡调度, 研究如何结合降水、汇流和蓄水, 以当前城市排水系统标准, 缓减城市内涝压力, 提高居住区韧性, 形成居住与自然协调的居住环境^[1]。

一、“汇流分析 – 降水预测 – 蓄水预测 – 智能调度”方法

(一) 汇流分析

居住区蓄排平衡调度智能化需要先了解径流的形成过程，根据径流形成的过程，采取智能化措施进行调度。居住小区的蓄排平衡考虑以式(1)计算。

$$(P+E_1+R_{s1}+Rg_1) - (E_2+R_{s2}+Rg_2+q) = W_2 - W_1 \quad (\text{式1})$$

式中：

P—降水量；E₁—水蒸气凝结降水量；R_{s1}—地面径流流入量；R_{g1}—地下径流流入量；E₂—蒸发量；R_{s2}—地面径流流出量；R_{g2}—地下径流流出量；q—拦蓄水量；W₁—时间段初期区域内蓄水量；W₂—时间段末期区域内蓄水量^[2]。

(二) 降水预测

1. 降水量

降水量的估算方法包括卫星云图估算、器测法和雷达探测。通过分析可见光云图和红外云图的反照率指标，以及云顶部的温度和高度，并结合湿度和气压数据，可以进行降水量预报；器测法使用雨量器和自记雨量计^[3-5]，可以直接得到实际的降水量数值；雷达探测的回波可以分析并预报降雨量。

2. 大气温度和土壤温度

智能化调度可以采用探针式土壤墒情监测站，这种土壤墒情监测站高集成、高精度、低功耗、集成一体化、参数可定制、有显示屏，可以实现短信报警、超长待机和上传云平台的功能。

3. 湿度与蒸发量

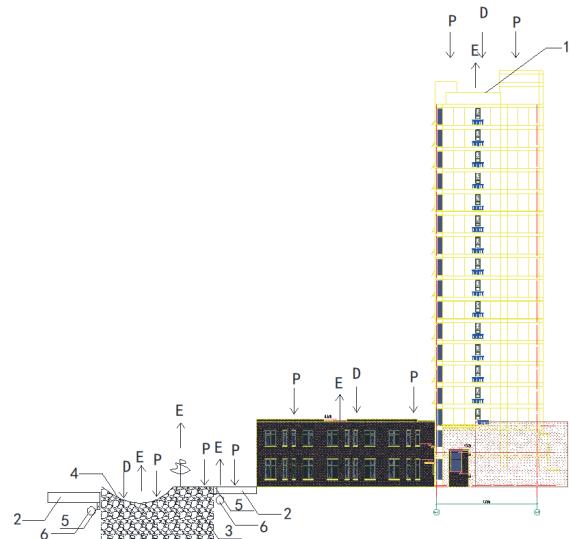
测量湿度的仪器主要有干湿球温度表、毛发湿度表、毛发湿度计、通风干湿表、库伦湿度计、光学形湿度计、离子晶体冷凝湿度计、手摇干湿表等。通过气象卫星探测大气中的水汽的分布，可得出水汽随高度分布的廓线，进一步了解水汽的时空分布规律^[6-7]。单位时间的土壤水分蒸发量称土壤蒸发率，以mm/d计，其测定方法有实测法（器测法）和数学模型法。

(三) 蓄水预测

1. 降水与径流形成

降水开始后，发生在居住区坡地上的水文过程见图1。最初一段时间内的降雨，除小部分直接参与径流形成外，大部分降雨消耗于植物截留（I）、下渗（f）、填洼（D）和蒸散发（E）。随着降雨的继续，满足填洼的地方开始产生地面径流。硬质屋面下水口附近和不透水铺装处首先产生地面径流，之后在绿地和透水铺装部位产生^[8-10]。绿地和透水铺装部位渗入土壤中的水分一部分耗于蒸散发，另一部分使包气带含水量不断增加，体现为地下水位上升。在那些包气带含水量已达到饱和的地方，水分将沿着坡度方向产生侧向流动，形成壤中水径流或地下水径流。当包气带含水量达到饱和含水量时，则具备了形成饱和地面径流的条件。

在居住区蓄渗阶段，损失量包括植物截留量、填洼量及土壤持水量，这些种类的水分最终通过蒸散发而耗散。净雨量包括地面径流、壤中水径流和地下水径流等，这些是形成内涝的根源^[11-13]。



P—降水；D—填洼；E—蒸腾或植物蒸腾；1—硬质屋面；2—不透水铺装或路面；

3—土壤；4—蓄水绿地；5—雨水口；6—雨水管道

图1 居住区蓄渗过程

2. 居住区径流汇流过程

居住区汇流过程是坡面漫流过程。在居住区的设计坡度上，屋顶的水经汇流至落水管，排到地面上，不透水铺装上的水，顺坡度汇流至透水铺装或者绿地上。居住区汇流过程包括坡面漫流（R_o）、壤中水汇流（R_{ss}）和地下水汇流（R_g）等。每次降雨并不一定同时存在坡面漫流、壤中水汇流和地下水汇流，但三种水流同时出现的情况是常见的。

3. 河网或雨管网汇流过程

来自坡地的地面水流、壤中水流和地下水水流，先汇入附近的小河流或雨管网，再汇入更大的河流或雨管网，最后汇集至居住区出口断面，形成居住区出口断面流量过程线。至此，居住区一次降雨的径流形成过程即告结束。当本次降雨形成的径流全部通过居住区出口断面后，河槽或雨管网中的水位和流量就恢复到原先状态。

4. 智能调度

地面径流的汇流情况可以根据输入的信息参数，根据选定的产流理论，综合考虑植物截留、填洼、土壤水运动、下渗、下渗后的土壤水分再分配和蒸散发进行预测。居住区蓄排平衡调度智能化的输出包括地面径流的汇流情况、地面径流发展趋势的预测以及需要采取的调度措施。

需要注意的是城市道路和屋面等均可认为是包气带厚度等于零的情况。其表面的下渗容量可视为零。因此，只要满足雨强大于蒸发强度，就会产流。这种情况下，每场降雨的产流量为

$$R_d = \sum_{i>e} (i - e) \Delta t$$

根据汇流分析、降水预测和蓄水预测情况，对居住区的蓄排平衡进行调度。当降水量小于可拦蓄水量时，可以不采用任何操作。

智能化调度采用自动气象监测站，自动气象监测站可以同时测量风速、风向、空气温度、空气湿度、降雨量、大气压力、总

辐射、光照强度、土壤水分、土壤温度、土壤PH、土壤盐分、PM2.5、PM10、CO₂、CO、NO₂、SO₂、NO等指标，并且可以上传云平台，是居住区蓄排平衡调度智能化的良好帮手。

二、结果分析

(一) 项目概况

城阳区棘洪滩街道棘洪滩项目位于青岛市城阳区，总用地面积约4.4万平方米，总建筑面积16.21万平方米。年径流总量控制率为77.2%，对应的设计降雨量为30.1mm。下垫面类型包括硬质屋顶、绿地、透水铺装和不透水铺装。

(二) 包气带厚度、土壤渗透系数和不透水层埋深

在工程建设中，包气带厚度可以通过地质勘察报告查出，地质勘察报告还会给出不同地层的渗透系数和不透水层的埋置深度。根据工程的地质剖面图中地下水位标高，可以算出不同位置的包气带厚度。

由工程地质剖面图还可以得出不透水层的埋置深度，图中可以看出下伏的不透水基岩的高程。工程地质勘察报告中还有不同土层的渗透系数，可以作为产流的计算依据。

(三) 信息输入设计

城阳区棘洪滩街道棘洪滩项目（C地块）的蓄排平衡智能化调度的信息输入包括一台自动气象监测站，用于测量风速、风向、空气温度、空气湿度、降雨量、大气压力、总辐射、光照强度、土壤水分、土壤温度等信息，并上传云平台。

为了分析产流情况，在雨水管和雨水干管设计了流量记，用以分析汇流情况。

(四) 预测模块设计

蓄水预测是根据预测的降雨量和包气带的含水情况，按照蓄水预测计算方法进行蓄水预测分析，预测本次降雨的包气带所需水量，进而推测内涝的可能性。

云平台根据上传的气象情况进行分析计算降雨量、降雨强度、蒸散发量、上层和下层土壤的初始含水量、壤中流、饱和地面径流、地下水径流等。

(五) 输出设计及蓄排平衡调度

云平台根据计算结果输出当前时段的降雨量、降雨强度、蒸散发量、上层和下层土壤的初始含水量、壤中流、饱和地面径流、地下水径流，并根据计算结果对蓄排平衡提出调度建议。

三、结论

对地表径流形成原因分析，并结合施工现场的工程地质勘察报告，确定包气带厚度和包气带的分层情况，采用自动气象监测站并结合天气预报，把采集的气象信息输入到云平台系统进行计算，输出降雨量、降雨强度和蒸散发量的计算结果，结合上层和下层土壤的初始含水量，推断壤中流、饱和地面径流和地下水径流，并根据计算结果对蓄排平衡提出调度建议是可行的。精确确定场地的包气带厚度、包气带分层情况和土壤的渗透系数，对于蓄排平衡的智能化调度，意义非常重大。

参考文献

- [1] 陈子杰.极端天气下雨水系统改造措施对雨洪的控制效果研究 [D]. 福州大学, 2018.
- [2] 芮孝芳.径流形成原理 [M]. 2版. 南京: 河海大学出版社, 2004.5
- [3] (美) 美国水环境联合会 (WEF) 著; 蒋玖璐等译. 城市雨水控制设计手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.9
- [4] 百度百科. (2025年9月). 检索来源: 棘洪滩街道: <https://baike.baidu.com/item/%E6%A3%98%E6%B4%AA%E6%BB%A9%E8%A1%97%E9%81%93/2275550#3-1>
- [5] 范世香, 程银才, 高雁. 洪水设计与防治 [M]. 北京: 化学工业出版社, (2008).
- [6](英) 贝文 (Beven, K.J.) 著; 马骏等译. 降雨 -- 径流模拟 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006
- [7](荷兰) 克里克利 (Critchley, W.) 著; 孙振玉等译. 径流集蓄 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1996. 9
- [8] 吴思, 陈雄志. 基于城市内涝防控的用地竖向控制规划研究——以武汉市主城区为例 [J]. 给水排水, 2021, 57(S1):206-211.
- [9] 陈诗扬, 程小文. 提升防涝韧性的城市调蓄空间量化方法研究 [J]. 中国给水排水, 2022, 38(12):132-138.
- [10] 栗玉鸿, 李帅杰, 宗晶. 海绵城市理念下的老城排水防涝系统化治理实践——以武汉青山海绵试点区为例 [J]. 给水排水, 2023, 59(S1):644-648.
- [11] 葛晓光, 李子阳, 张建良, 等. 基于"蓄排平衡"的城市市政 - 水利综合排涝探究与实践 [J]. 净水技术, 2024, 43(11):141-147.
- [12] 祁丽艳. 城市水韧性评价与规划的理论及实践 [D]. 青岛理工大学, 2023.
- [13] 胡萌, 盛英武. 青岛年降水量和水资源量变化特征研究 [J]. 水文, 2022, 42(01):103-108+28.