

太湖流域平原区非饱和带降雨 入渗规律分析

可 灏, 王船海, 叶小川, 宋 晨, 雷振远, 陈 钢

(河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要:为分析太湖流域平原区非饱和带的降雨入渗规律,基于野外试验基地资料,对实测降雨径流过程进行分析,总结了降雨要素的变化对土壤含水量、地下水的影响规律。在此基础上计算入渗量、径流深等产流要素,并进行了 Spearman 相关分析。结果表明,入渗量与降水量减径流深的相关关系最为明显,可认为该区域产流模式以蓄满产流为主。以土壤水库容为指标将土壤划分为干旱和湿润状态,对比两种状态下的相关分析结果可知降雨入渗特征不尽相同,可为后期降雨入渗过程模拟提供参考依据。

关键词:降雨径流; 土壤水分; 地下水位; 太湖流域

中图分类号:TV125 **文献标识码:**B **文章编号:**1007-7839(2022)01-0047-04

Measurement and analysis of rainfall infiltration law in unsaturated zone of Taihu Lake Basin

KE Hao, WANG Chuanhai, YE Xiaochuan, SONG Chen, LEI Zhenyuan, CHEN Gang

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To analyze the rainfall infiltration law of the unsaturated zone in the Taihu Lake Basin, based on a field test, the measured rainfall runoff process was analyzed, and the influence law of changes in rainfall factors on soil moisture and groundwater was summarized. On this basis, the runoff generation factors such as infiltration volume and runoff depth were calculated, and they were subjected to Spearman correlation analysis. The results show that the correlation between infiltration volume and rainfall minus runoff depth is most significant, and it can be considered that the runoff generation model in this area is dominated by saturation excess runoff. The infiltration capacity is used as an indicator to divide the soil into dry and humid states, and the correlation analysis results of the two states indicate that the characteristics of rainfall infiltration are different, which could provide reference for the simulation of rainfall infiltration process.

Key words: rainfall runoff; soil moisture; groundwater table; Taihu Basin

太湖流域为典型平原区,河网交错密布,湖泊星罗棋布,拥有发达的水系。其地表水、土壤水和地下水之间交换频繁,准确模拟该区域产汇流能够为平原区产汇流模拟提供理论依据与经验参考^[1-2]。

土壤水运动作为产汇流模型研究中最复杂、关键的模块,对水文、农田水利、水土保持、农业土壤等领域有着重要理论指导意义,并受到了国内外学者的重视^[3-6]。随着计算机技术、精密仪器技术、遥感技术以及数值模拟理论的发展,土壤水运动方程

收稿日期:2021-08-21

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC1508200);江苏省水利科技项目(2020003);国家自然科学基金(41901020)

作者简介:可灏(2000—),男,本科,主要研究方向为水文水资源。E-mail:kehaody@hhu.edu.cn

的建立、模拟和完善方面取得了丰富成果。

降雨入渗过程分析与模拟是土壤水运动研究的重要内容,但其研究主要集中在干旱半干旱地区如黄土高原以及农业生产方面^[7-8]。此外,国内关于降雨入渗的研究仍以概念性模型为主,缺少对实际物理因素的考虑,如入渗滞后作用、雨型复杂、土壤不均匀等,并不能完全适用于平原区。由于平原区野外实测资料的缺乏,现有模型的适用性检验及改正成为约束平原区降雨入渗规律发展的瓶颈^[9-10]。

1 研究现状

目前国内关于降雨入渗的研究,多应用在边坡稳定性和干旱半干旱地区的水资源规划管理等,在太湖流域平原区非饱和带方面的研究较少,如徐晗等^[11]用基于水力渗透曲线的有限元模型模拟雨水下渗非饱和土边坡过程,白盛愿等^[8]在黄土丘陵半干旱区的米脂实验站观测、分析自然降雨下土壤水分入渗深度。此外,针对降雨入渗过程的分析多为定性的研究和描述,在定量模拟方面存在一定的空白。蒋定生等^[12]曾在分析 Kostikov 和 Horton 入渗公式的基础上,结合黄土高原大量实测资料总结了黄土高原土壤在积水条件下的入渗公式,具有一定参考意义。

平原区由于野外降雨观测资料的缺乏,现有研究的模型多为概念性模型,缺少一定物理意义,其在平原区降雨入渗的适用性上有待评估。目前已经在太湖流域非饱和带建立了常州市金坛水文实验基地,该基地可进行野外观测并积累了可用于土壤水运动研究的实测资料,为研究进行提供了条件。

2 试验区概况

红旗圩(HQW)试验基地位于江苏省常州市金坛区朱林镇,该区地层多为第四系松散沉积物,主要由泥灰岩和钙质泥岩组成,厚度约 30 m,总面积为 1 008 m²,地表高程为 2.4~3.8 m。土壤质地为粉质黏壤土,平均密度为 1.36 g/cm³,平均饱和导水率为 46.63 mm/h,饱和体积含水率为 45.0%,有机质质量比为 14.78 g/kg,具体位置和土地利用情况如图 1 所示。

3 研究内容

试验区能够实时测量气温、降雨、蒸发、多层土

壤含水率、浅层地下水位,并将数据传回服务器,对 2016 年实测数据整编,分析了包括全年降雨从划分的 26 次降雨中选取的 5 场典型降雨在内共计 6 场降雨过程,有关分析过程如下。

3.1 土壤含水量对降雨响应规律

2016 年全年的土壤水动态变化过程中,变化幅度定义为变化量与初始值之比,以反映含水量受降雨影响的变化程度。土壤表层(10 cm、20 cm 处)的含水量与降水的趋势变化非常接近,受降水影响产生的波动较大,10 cm、20 cm 处含水量的最高变化幅度分别为 102.9%、53.3%。40 cm、60 cm 处土壤含水量变化过程基本相同,幅度较小,而 100 cm 处基本上不发生波动。随着降水量的增加,整体土壤含水量变化幅度明显增大,大暴雨级别对应幅度小于暴雨级别,原因是发生大暴雨前的土壤含水量为 0.414,远高于发生暴雨时的 0.319,因此相对变幅变小。这也说明,土壤含水量对不同量级降水的响应也和初始土壤含水量有关。

3.2 地下水对降雨响应规律

由全年的地下水动态变化过程分析可知,地下水受降雨影响明显,呈现显著的季节性变化,水位在冬春季较夏秋季节较低,其变化受到雨量、雨强、持续时间等因素的影响。降水量级在中雨及以上时才会引起地下水的波动,小雨量级的降水以补充土壤为主。各降水量级,从小雨、中雨、大雨、暴雨和大暴雨的场次降雨,引起的地下水位变化量分别为 0.02 m、0.08 m、0.54 m、0.11 m、0.48 m。总体看,随着降水量的增加,地下水变动幅度明显增大,暴雨场次对应地下水变化量仅为 0.11 m,因为初始潜水埋深为 0.264 m,接近地表,因此变化量受到了限制,这也佐证了地下水变化与初始地下水水位有关的观点。

3.3 Spearman 秩相关系数分析

采用 Spearman 秩相关分析系数作为降雨各特征值之间相关关系的检验标准^[13],对 2016 年全年降雨过程进行划分得到 26 场次降雨过程,分别统计和计算历次降雨的次降水量、降雨历时、入渗量、土壤水库容等特征值。进行全年范围内计算结果如表 1 所示,包括入渗量与地下水涨幅、初始地下水埋深、土壤水库容、降水量、降雨历时、平均雨强、最大雨强的相关系数。

由表 1 可知,入渗量与地下水涨幅、初始地下水埋深和土壤水库容呈显著正相关,其 Spearman 秩相关系数分别为 0.822、0.780 和 0.704。

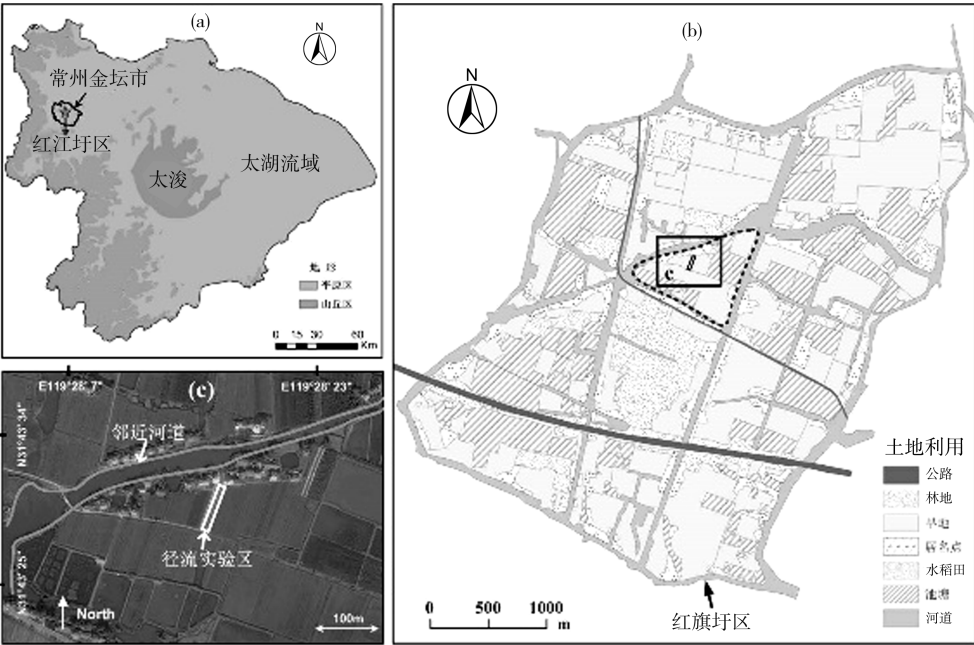


图 1 实验区位置概况与土地利用示意图

表 1 全年入渗量相关关系分析结果

相关分项	入渗量 & 降水量减径流深	入渗量 & 地下水涨幅	入渗量 & 初始地下水埋深	入渗量 & 土壤水库容	入渗量 & 次降水量	入渗量 & 降雨历时	入渗量 & 平均雨强	入渗量 & 最大雨强
相关系数	0.904 *	0.822 *	0.780 *	0.704 *	0.326	0.265	0.119	0.085

注: * 表示通过 1% 显著性水平检验。

地下水主要由降雨入渗量补给,发生降雨时地下水水位的变动是降雨入渗量大小的直观反映,因此入渗量和地下水涨幅呈明显正相关。初始地下水埋深指降雨开始前地下水水面到地表的距离,初始地下水埋深越高,说明地下水水位越低,该区域干旱程度越深。入渗量与初始地下水埋深的正相关,说明在干旱状态下表层土壤对地下水补给作用有限,其地下水水位维持较高水平主要来自于降雨入渗量的补给。

土壤水库容也称为入渗能力,指次降雨发生前土壤所能容纳的最大水量,与土壤干旱程度呈正比,入渗量和次降水量及其他降雨要素等没有显著相关关系,说明太湖流域平原区土壤水接近饱和状态,降雨发生前期的部分降水量以下渗的形式损失,中期及后期的大部分降水量以径流的形式损失,较之降水量与径流深的相关关系更明显,这暗示着实验区内土壤含水量达到饱和是产生径流的重要前提条件,研究区的产流机制以蓄满产流为主。

为进一步分析不同干旱程度下入渗量和其他入渗特征值之间的相关关系,将全年 26 场次降雨的土壤水库容按降序排列后,取接近土壤水库容中位数的整数 50,以此为标准划分为 2 组数据,分别以湿润组($I_p < 50$ mm)、干旱组($I_p \geq 50$ mm)命名。相关分析结果如表 2 所示。

分析可知:干旱组的入渗量与降雨相关性显著,相关系数高达 0.988,而湿润组的相关性不显著,相关系数为 0.305;湿润组的入渗量与土壤水库容相关性显著,说明土壤水库容约束降雨对地下水的补给,土壤越接近饱和越明显。要想进一步精确模拟降雨入渗过程,可以考虑建立耦合干旱、湿润两种状态的非饱和带降雨入渗模型。

4 结 论

(1)土壤水变化量、涨幅随土壤深度增加而减小,随降水量增加,整体的涨幅增加;在发生同样降水量情况下,土壤含水量涨幅与瞬时雨强的大小和持续时间有关。

表 2 湿润、干旱两组入渗量相关关系分析结果

相关分项	入渗量 & 降水量 减径流深	入渗量 & 地下水 涨幅	入渗量 & 初始地下水 埋深	入渗量 & 土壤水 库容	入渗量 & 次降水量	入渗量 & 降雨历时	入渗量 & 平均雨强	入渗量 & 最大雨强
相 湿润组	0.844 *	0.861 *	0.704 *	0.839 *	0.305	0.235	0.038	0.071
关 数 干旱组	0.976 *	0.827 *	0.697 *	0.612	0.988 *	0.673 *	0.584	0.479

注：* 表示通过 1% 显著性水平检验。

(2)地下水变化量、涨幅和降水量、瞬时雨强及持续时间、初始潜水埋深等因素有关;降雨停止后,地下水恢复或接近原有水平的快慢与地下水位有关。当降水量级为大暴雨时,如瞬时雨强较大、持续时间短时,潜水埋深变化曲线呈双峰甚至多峰型。如瞬时雨强变化均匀且持续时间长,其变化曲线不呈现前述情况。

(3)实验区降雨发生前期的部分降水量以下渗的形式损失,中期及后期的大部分降水量以径流的形式损失,这说明太湖流域平原区的产流机制很可能以蓄满产流为主。

(4)干旱状态下入渗量与降雨相关性显著,与土壤水库容相关性不显著,而湿润状态下相关性不显著;湿润状态下则反之,因此建立耦合干旱和湿润两种状态下的入渗模型对精确模拟入渗过程具有重要参考意义。

参考文献:

[1] 程文辉,王船海,朱琰.太湖流域模型[M].南京:河海大学出版社,2006.

[2] 陈景波,王船海,杜世鹏,等.平原区饱和-非饱和土壤水运动模型及数值算法研究[J].水力发电,2016,42(9):3-6.

[3] 雷志栋,胡和平,杨诗秀.土壤水研究进展与评述[J].水科学进展,1999(3):311-318.

[4] 庄季屏.四十年来的中国土壤水分研究[J].土壤学报,1989(3):1-8.

[5] PHILIP J R. The theory of infiltration;4. sorptivity and Algebraic infiltration equations[J]. Soil Science, 1957, 84(3):257-264.

[6] ROGER E. S. The infiltration envelope: Results from a theoretical infiltrometer[J]. Journal of Hydrology, 1972, 17(1):21-22.

[7] 陈洪松,邵明安.黄土区坡地土壤水分运动与转化机理研究进展[J].水科学进展,2003(4):13-20.

[8] 白盛元,汪有科,马建鹏,等.黄土高原半干旱区降雨入渗试验研究[J].干旱地区农业研究,2016,34(2):23-31.

[9] 王船海,王娟,程文辉,等.平原区产汇流模拟[J].河海大学学报(自然科学版),2007(6):27-32.

[10] 王船海,华文娟,杨海,等.平原水文实验区(流域)的发展及应用[J].河海大学学报(自然科学版),2018,46(1):7-15.

[11] 徐晗,朱以文,蔡元奇,等.降雨入渗条件下非饱和土边坡稳定分析[J].岩土力学,2005(12):1957-1962.

[12] 蒋定生,黄国俊.黄土高原土壤入渗速率的研究[J].土壤学报,1986(4):299-305.

[13] ZAR J H. Significance testing of the Spearman rank correlation coefficient[J]. Journal of the American Statistical Association, 1972(2):67.

(上接第 46 页)

[8] 唐天均,杨晟,尹魁浩,等.基于 EFDC 模型的深圳水库富营养化模拟[J].湖泊科学,2014,26(3):393-400.

[9] 马斌.洪泽湖水体富营养化现状、原因及对策研究[D].南京:南京农业大学,2006.

[10] 周露洪,谷孝鸿,曾庆飞,等.江苏省固城湖围垦区池塘河蟹生态养殖效益及污染输出分析[J].湖泊科学,2013,25(3):406-413.