

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.01.009

太湖流域平原地区田间尺度产流机理试验研究

陈钢^{1,2},王船海^{1,2},翟月³,陈云飞⁴,张娉楠²,茅志兵²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098;
2. 河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098;3. 南京慧水软件科技有限公司,江苏 南京 210019;
4. 常州市金坛区河道湖泊管理所,江苏 常州 213200)

摘要:为量化评估区域产流的影响因子,构建野外试验基地,对太湖流域2个不同试验区的降雨、蒸散发量、土壤含水量、地下水位和地表水动态进行野外监测,通过对不同降雨径流过程的水量平衡分析可得:Dunne产流是太湖流域平原区产生径流的主要机制,红旗圩试验基地的总降雨量和径流量呈良好的线性关系,其确定性系数 $R^2=0.95$;土壤蓄水量与初始地下水埋深之间存在良好线性关系,反映了浅层地下水和土壤水之间的强相互作用,因此可以将地下水初始埋深作为前期土壤水分估算的指标;根据各次降雨过程的水量平衡分析,得到洼地蓄水量范围为4.72~8.03 mm,说明在计算平原区产流过程时不应忽略洼地蓄水量。

关键词:降雨径流;前期土壤水分;浅层地下水位;洼地蓄水;太湖流域

中图分类号:P338 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2021)01-0057-07

Field-scale experiment study of runoff generation mechanism in plain area of Taihu Basin, China

CHEN Gang^{1,2}, WANG Chuanhai^{1,2}, ZHAI Yue³, CHEN Yunfei⁴, ZHANG Pingnan², MAO Zhibing²

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Nanjing Huishui Software Technology Co., Ltd., Nanjing 210019, China;
4. River and Lake Management Department of Jintan District, Changzhou 213200, China)

Abstract: To quantitatively evaluate the influence factors of regional runoff, a field base was constructed, and field data about the rainfall, evapotranspiration, soil moisture, groundwater table, and surface water dynamics were collected in two different experimental sites of the Taihu Basin, China. Through the analysis of water balance in different rainfall runoff processes, it was found that the Dunne overland flow was the dominant mechanism responsible for the rapid runoff generation. The total rainfall and runoff expressed a good linear relationship with an R^2 of 0.95 in the Hongqiwei test site. In addition, the initial groundwater depth was considered as the indicator of the antecedent soil moisture estimation for the close linear relationship that indicated the strong interaction between shallow groundwater and soil moisture. The depression storage was recommended in a range from 4.72 to 8.03 mm according to an estimation based on the water balance analysis for each rainfall event, which proves that the depression storage should not be neglected when calculating the runoff generation process in plain areas.

Key words: rainfall runoff; antecedent soil moisture; shallow groundwater table; depression storage; Taihu Basin

太湖流域是我国典型的湿润平原区,约30%的地区是低地圩区^[1],其特点是地势平坦、地下水位浅、河网错综复杂^[2]。这些水资源丰富的地区人口稠密和农业活动密集容易受到洪水的侵袭,也易受到污染^[3-4]。因此,迫切需关注平原区的水文行为,为区域风险评估和水资源管理提供坚实的科学基础。

产流是陆地水文循环的关键部分^[5],对预测特定区域的水量 and 水质非常重要。典型的产流机制有:Horton产流^[6],当降雨量超过非饱和土壤的入渗率时发生;Dunne产流^[7]和地下径流发生在土壤饱和时。除

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0407900);国家自然科学基金(41901020);中央高校基本科研业务费专项(B200202030)
作者简介: 陈钢(1986—),男,讲师,博士,主要从事水文物理规律模拟及水文预报研究。E-mail:gangchen@hhu.edu.cn
通信作者: 王船海,教授。E-mail:chwang@hhu.edu.cn
引用本文: 陈钢,王船海,翟月,等.太湖流域平原地区田间尺度产流机理试验研究[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):57-63.
CHEN Gang, WANG Chuanhai, ZHAI Yue, et al. Field-scale experiment study of runoff generation mechanism in plain area of Taihu Basin, China [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(1): 57-63.

了前期条件和降雨特征等基本影响因素外,地下水和地表水之间的强相互作用对平原地区的水循环也很重要^[8]。在国外,Apples 等^[9]通过野外试验与数据分析得出荷兰地下水浅埋的平原农田区同时存在蓄满产流和超渗产流;Pyzoha 等^[10]根据美国南克罗莱纳州平原区历史水文数据分析洼地与地下水的相互作用并建立了概念模型;Krause 等^[11]在德国东北部 Havel 河洪泛区进行野外径流试验定性分析区域水平平衡。国内平原区水循环的野外试验研究始于 20 世纪 50 年代^[12],李帆等^[13]基于淮河流域五道沟的长序列观测资料分析了不同地下水埋深下的径流变化规律;顾慰祖等^[14]探讨了滁洲水文试验基地的径流成分与降水径流悖论。

野外试验可以直观地理解产流过程,因而对开发适用的产流计算方法至关重要^[15]。本研究在江苏省常州市金坛区典型的平原区设立 2 个基地进行了野外试验,探讨太湖流域平原区的产流过程;在分析降雨过程水量平衡的基础上,评价了洼地蓄水量在流域径流响应中的作用;采用 Pearson 相关分析方法,分析了降雨径流关系以及产流与影响因子之间的联系。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域概况

两试验基地(图 1)位于江苏省常州市金坛区。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 30m。红旗圩(HQW)试验基地位于朱林镇(31.725°N,119.471°E),总面积为 1 008 m²(84 m×12 m),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。白塔桥(BTQ)试验基地位于指前镇(31.667°N,119.457°E),总面积为 1 710 m²(85.5 m×20 m),地表高程范围 4.2~5.8 m;1 m 深度的土壤也具有相同的粉质黏壤土,其平均密度、平均饱和导水率、饱和体积含水率和有机质质量比分别为 1.52 g/cm³、30.22 mm/h、47.0%和 18.38 g/kg。

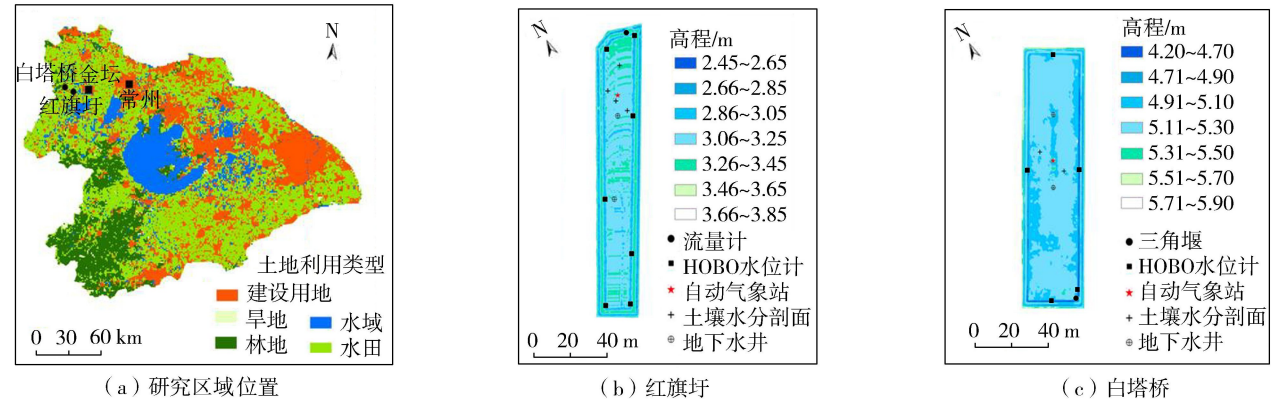


图 1 试验基地
Fig. 1 Test site

1.2 数据采集

两试验基地均采用双排水沟渠设计(图 1(b)(c)),外侧沟渠用于阻隔实验区与周边地区的地表水交换;核心实验区降雨后将产汇流的水量由内侧沟渠排出。红旗圩与白塔桥均安装微型综合自动气象站,自动连续监测降水、蒸发、风速、风向、气温等基本的水文气象要素的时间变化;均在出口处安设薄壁三角堰与水尺,同时在堰前和内侧沟渠中设置 HOBOT 压力式水位计用于监测地表水深的变化过程(图 2(a))。在红旗圩、白塔桥分别安装有 2 口地下水观测井,井口处安装 JH2004 型激光水位计。红旗圩试验基地共布设 4 个土壤水分监测剖面,将时域反射测量(TDR)传感器水平插入地面以下 10 cm、20 cm、40 cm、60 cm 和 80 cm 的深度处(图 2(b))。白塔桥试验基地共布设 2 个土壤水分监测剖面,各剖面 TDR 传感器的垂直布设与红旗圩剖面相同。

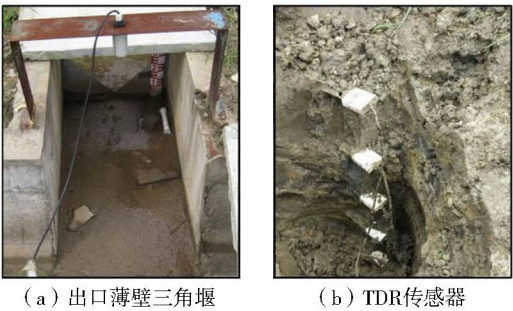


图 2 测量仪器布设
Fig. 2 Measuring instrument installation

在 2 个试验基地中,统一选择 10 min 作为各种数据的采样间隔。

1.3 数据分析

1.3.1 产流事件定义

根据总降水量大于 5 mm 和两次相邻降雨间隔不小于 24 h 这 2 条标准定义单次降雨事件。降水事件中区域出口处若观察到有出流现象,则被定义为产流事件。红旗圩和白塔桥分别确认了 29 次和 23 次降水事件。产流事件共发生了 29 次,其中红旗圩发生 17 次,白塔桥发生 12 次。与 Amatya 等^[16]研究中使用 29 个事件,Slattery 等^[17]的 23 个事件相比,本文 29 个事件对于探索径流与影响因素之间的联系具有可靠性。

1.3.2 次事件水量平衡

填注量指暂时存储在地表洼地中的降水,是影响地势平坦地区径流过程的重要因素^[18]。对田间尺度的水量平衡,设定地表为上边界,地面以下第一个相对不透水层为下边界。除填注量外所有项均已知。给定时期内的水量平衡公式为

$$D = P - E - R - I - \Delta V \tag{1}$$

其中

$$I = \sum_{i=1}^n \Delta \theta_i \Delta z_j$$

式中: D ——填注量; P ——降水量; E ——蒸散发; R ——区域径流深; I ——累积入渗量; ΔV ——研究区与周围区域之间的水量交换,试验基地为闭合区域, $\Delta V=0$; $\Delta \theta_i$ ——非饱和区第 i 层土壤水分的增量; Δz_j ——序号 j 和 $j + 1$ 的土壤水分传感器之间的垂直距离。

1.3.3 相关性分析

对每个事件从雨量图和流量过程线中提取可能影响产流的水文气象相关特征,并将其分为降雨前期条件和事件特征。雨前土壤含水量通过土壤蓄水容量(soil water storage capacity, SWSC)进行估算,SWSC 定义为将地下水位升至地表处所需的水深(单位面积时所需体积),采用梯面积包围法计算^[19]。

对于事件条件,降雨特征包括总降水量(P)、降雨历时(T)、降雨峰值强度($P_{\max}$)和平均降雨强度(P_{mean})。水文变量包括单个降雨事件的径流深(R)、洪峰流量($Q_{\max}$)、径流系数(α)、累积入渗量(I)、地下水位增量(ΔH)和填注量(D)。总径流量用深度表示,为每 10 min 间隔内试验区出口流量的增量之和除以试验区的总面积;径流系数是指降雨转化为径流的比例^[20]。计算所有事件的这些变量,并用 Pearson 相关系数^[21]进行分析。

2 结果与讨论

2.1 研究周期内的水文气候条件

红旗圩和白塔桥的基本气象水文特征包括日降水量、日蒸发量、地下水埋深以及土壤含水量(图 3)。2016 年红旗圩的总降水量为 1 853.4 mm,远高于年平均降水量。白塔桥在研究期间的总降水量为 1 148.9 mm,与年平均降水量一致。2016 年的总蒸发量为 1 301.3 mm,2018—2019 年为 1 063.4 mm。红旗圩实测的浅层地下水位在地表以下 0.08 ~ 1.20 m 之间,白塔桥实测范围为 0.08 ~ 1.00 m。红旗圩的地下水位平均埋深为 0.57 m,白塔桥为 0.45 m。每个研究区域的平均地下水埋深和排水沟渠底高(图 3 中的虚线标记)在同一高程上,表明研究区的地下水动态与沟底高程存在一定的关系。

红旗圩试验基地距地表 10 cm 土层的土壤含水量最大值为 0.584 m³/m³,最小值为 0.304 m³/m³,平均值为 0.417 m³/m³。白塔桥试验基地,土壤含水量在 0.377 ~ 0.602 m³/m³ 之间波动,其均值为 0.497 m³/m³。表层土壤水分动态对降雨很敏感,降雨后土壤含水量增加。地表以下土壤含水量的变化趋势与地下水的变化趋势基本一致,表明该区浅层地下水与土壤水之间存在较强的相互作用。

2.2 降雨径流事件特征分析

选择 6 个事件分析降雨径流事件中的降雨和水文要素动态(表 1),3 个选自红旗圩,命名为 H1、H2 和 H3;3 个选自白塔桥,命名为 B1、B2 和 B3。

根据地面以下 10 cm、20 cm、40 cm、60 cm 和 80 cm 深处的土壤相对饱和度(图 4),事件 H1、H2、H3 和 B2,土壤水分表现出相似的快速响应,尤其是在 10 cm 深度处,土壤含水量因降雨脉冲呈现台阶式上升的特点,在降雨停止后逐渐下降。随着土壤深度的增加,土壤水分随降水的增幅逐渐减少,响应时间也相应延长。事

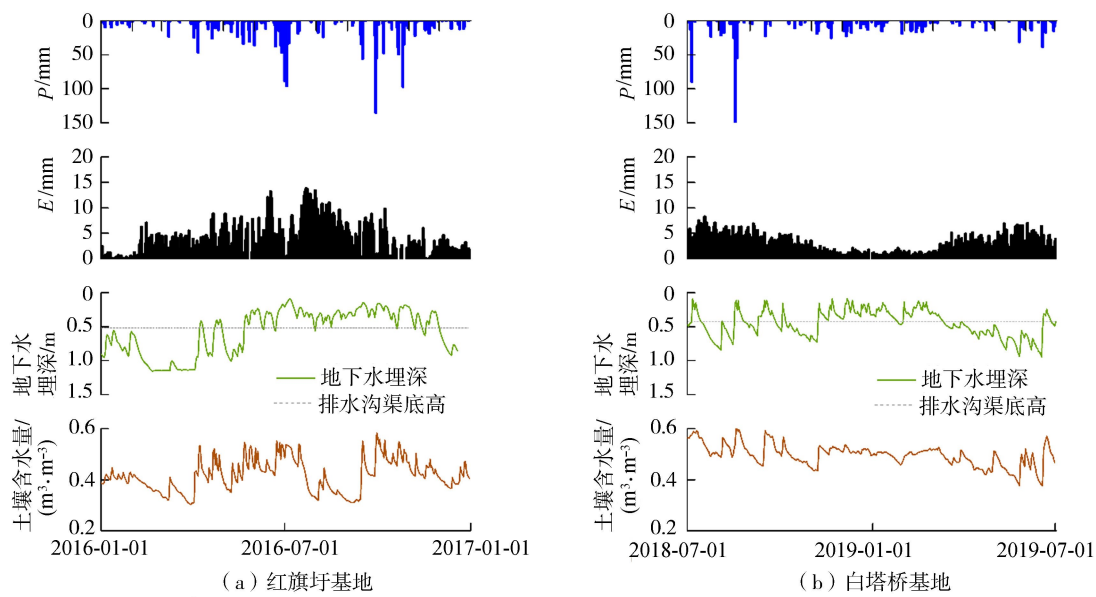


图 3 地表以下 10 cm 深度处的 P 、 E 、地下水埋深和土壤含水量

Fig.3 Daily rainfall depth (P), evaporation (E), groundwater depth and volumetric soil water content at 10 cm depth below ground surface

件 B1 和 B3 由于 2 d 前刚发生过降雨事件,表土处于接近饱和的状态,因此事件降水造成的土壤水分增量几乎可以忽略。当土壤深度超过 60 cm 时,所有事件中土壤水分的状态都没有明显变化,表明这一部分的土壤在整个时期内均保持饱和状态。

表 1 6 个降雨产流事件特征

Table 1 Rainfall and runoff characteristics for six selected rainfall events

事件名	开始时间	P/mm	T/h	$P_{\text{mean}}/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	$P_{\text{max}}/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	R/mm	α	SWSC/mm
H1	2016-05-20	54.5	31.20	1.80	6.6	5.99	0.11	72.2
H2	2016-05-31	35.3	3.20	11.20	28.4	23.50	0.67	41.4
H3	2016-10-19	97.3	65.50	1.26	1.5	71.30	0.73	43.5
B1	2018-07-08	23.5	3.83	6.13	22.0	14.64	0.62	21.4
B2	2018-11-06	32.5	39.83	0.82	4.9	9.12	0.28	75.0
B3	2019-06-19	24.5	39.50	0.62	9.6	7.43	0.30	44.4

浅层地下水呈现出与土壤水对降水的变化相似的快速响应,但表现为相对缓和的曲线形式,这是因为垂直入渗过程削弱了降水脉冲。在 H2 事件中大雨强条件下,地下水位增幅很小,是因为 H2 事件相对干燥的前期土壤水分条件使得入渗水量主要用于补充非饱和带而没有到达地下水面处。因此,地下水响应的差异认为是该地区地下水与土壤水之间存在强烈相互作用的结果,浅层地下水动态受降雨和前期土壤湿度条件共同影响。由图 4 可知,地表径流的产生条件是 10 cm 深处的土壤含水量达到相对饱和,这证实了蓄满产流模式的存在。6 个径流事件的流量过程有极高的变异性。不同的试验基地的径流总量相差 10 倍,而同一地点不同事件的峰值流量则相差 50 倍。产流事件的持续时间从 3 ~ 66 h 不等,径流系数的范围是 0.11 ~ 0.73。

2.3 降雨-径流关系

2.3.1 蓄满产流

根据 29 个事件得到总径流量与总降雨量之间的相关关系(图 5)。从红旗圩的不同时间序列数据获得了确定系数 $R^2=0.951$ 的拟合效果,表明该区域蓄满产流在径流过程中的主导地位。斜率接近 1 表明土壤基本处于湿润状态,这一结论与图 4 发现表层土接近饱和的现象一致。 -18.14 mm 的截距可以看作是产生径流的降雨量阈值。对于白塔桥,因为这几次降雨均属于中小雨事件,前期土壤水分、地表洼地和植被截留等对产流深造成了很大的不确定性。从图 5(a)的放大视角可以看出,在红旗圩中总降雨量小于 50 mm 的事件,同样表现出了很高的不确定性。

2.3.2 超渗产流

图 6 使用箱型图描述了红旗圩的 29 个降水事件和白塔桥的 23 个降水事件中最大小时雨强的分布,结

果表明该地区以低强度降雨事件为主。以 2 个地点的饱和导水率(K_s)作为土壤下渗能力的下限参考值用以判定超渗现象是否发生,除了极少的事件超过该阈值外,大多数事件中的最大雨强都小于引发超渗现象的阈值。另一方面,即使在土壤未饱和且有极端降雨的情况下有超渗地面径流产生,受该区域的微地形起伏影响,这部分水会存储在洼地中而难以到达流域出口。因此在这一区域,超渗产流模式的存在仅限于这一区域发生的极端降雨事件,并且对最终的产流贡献较小。

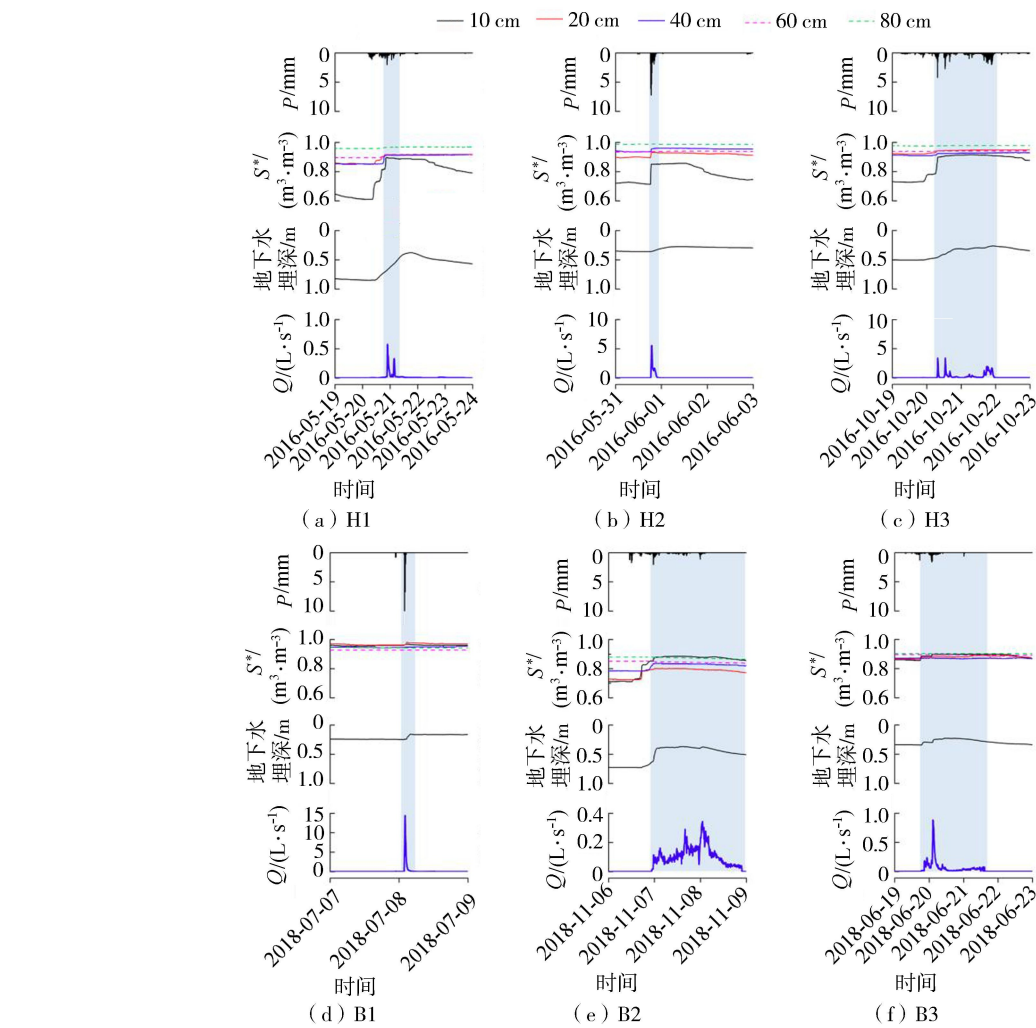


图 4 6 个降雨事件的 P 、相对饱和度(S^*)、地下水埋深和出口流量(Q)

Fig.4 Time series of rainfall (P), relative saturation (S^*), groundwater dept and discharge (Q) at the outlet for six rainfall events

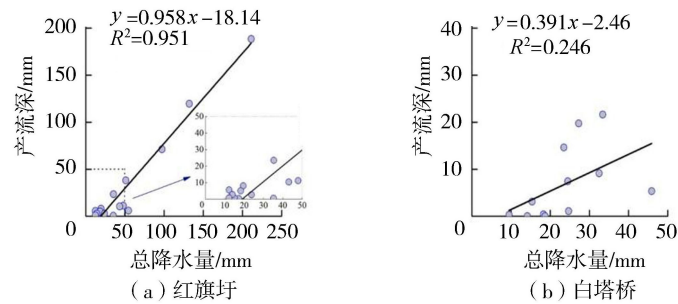


图 5 降水-径流线性关系

Fig.5 Linear corrections between rainfall and runoff depth for different events

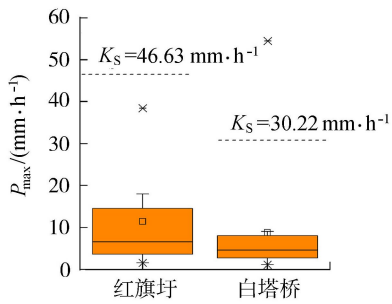


图 6 最大小时雨强箱型图

Fig.6 Boxplots of peak rainfall intensity per hour

2.4 前期条件-径流关系

地下水位埋深越浅,土壤蓄水量越小,降雨入渗量越低,累积入渗量与前期地下水位的相关性就越明显。

在不同降雨强度下,初始地下水深度与径流系数之间的关系如图7所示。当地下水初始埋深大于0.5 m时,没有出现径流系数大于0.5的事件。初始地下水深度在0.5 m以内的点显示出径流系数的变化较大。左上角的这些情况(图7(a))表明,地下水位埋深较浅的条件符合极端降雨事件,将导致急流,并使该地区容易遭受洪灾。

图8显示了红旗圩和白塔桥的土壤蓄水量与初始地下水埋深之间的良好线性关系, R^2 分别达到0.850和0.841,反映了浅层地下水和土壤水之间的强相互作用。由2个拟合函数得到的斜率倒数可以作为这类土壤的给水度的一个指标。给水度是土壤的基本性质之一,是指地下水位下降一个单位深度,从地下水位延伸到地表面的单位面积在重力作用下所释放出的水的体积。从函数关系可以用来估算土壤蓄水量,为事件前的渗透预测提供了依据。

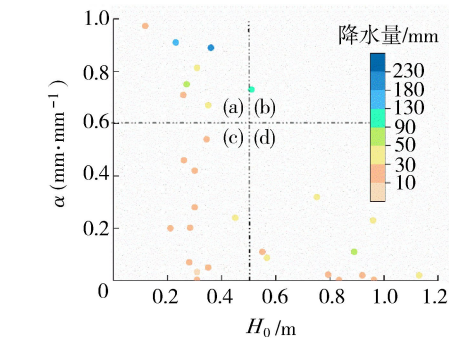


图7 径流系数与地下水初始埋深 H_0 关系

Fig. 7 Relationship between runoff coefficient and initial groundwater depth

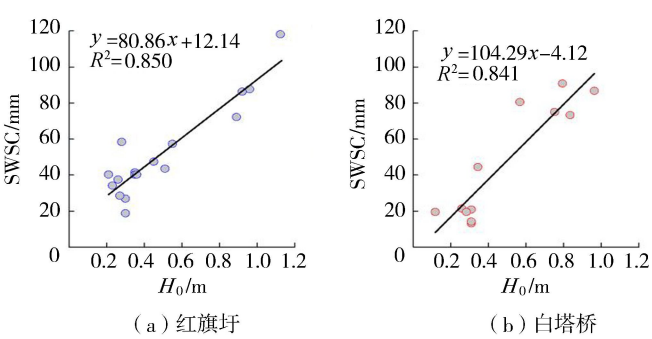


图8 地下水初始埋深与土壤蓄水量关系

Fig. 8 Relationship between initial groundwater depth and water storage capacity of soil

2.5 填洼蓄水-径流关系

基于29个径流事件水平衡计算得出填洼量,红旗圩的填洼量值在0.29~18.86 mm之间,而在白塔桥为0.19~12.13 mm。红旗圩平均值为6.20 mm,标准偏差为4.75 mm,白塔桥的平均值为6.63 mm,标准偏差为3.91 mm。不同地点的数据统计特征基本相似,平均值的细微差异是不同的地表植被所致。综合以上分析,认为可以将填洼量作为该地区常见但具有不确定性的径流损失项,并且在某种程度上贡献了图5中降雨-径流线性关系中截距的一部分。因此,综合考虑填洼量的影响因素和这一数值对径流影响的复杂性,基于收集的数据使用 t 检验,0.95 置信水平下填洼量的取值参考范围为4.72~8.03 mm。

2.6 讨论

太湖流域平原地区浅层地下水与土壤水的相互作用显著。地下水埋深较浅的土壤易饱和,导致蓄满产流占主导地位。引发Dunne产流的阈值由图5(a)中降雨-径流线性关系的截距确定。通过比较高强度降雨和饱和导水率,发现超渗产流仅限于极端降雨事件(图6)。地下水初始埋深是前期条件一个良好的指标。降雨前地下水位较浅,说明前期土壤含水量较高,径流系数较高。初始地下水位与土壤蓄水量之间的线性关系可用于估计该地区的湿润状况(图8)。Horton产流和Dunne产流的存在表明了平原区的多种产流机制,并确定了多种径流过程对降雨响应的影响。通过地表以下的初始地下水埋深是影响集水区径流形成的一个重要参数的定性结论,提出了地表以下的初始地下水埋深作为前期条件估计的依据。洼地蓄水量的取值范围与地下水初始埋深对模型中的参数选择和取值范围有一定的指导意义。本文所采用的方法将田间试验与降雨事件下的水量平衡相结合,有效地验证了监测数据的合理性和准确性,为径流机理的定量研究提供了良好的依据。

3 结 语

- a. 低强度降雨事件和易饱和土壤的普遍存在表明蓄满产流在径流过程中占主导地位,而超渗产流仅限于极端暴雨事件中,表明该地区存在多个径流过程。总降水量与径流量之间的强线性关系证实了这一观点。
 - b. 降雨前地下水初始埋深与土壤蓄水量呈良好的线性正相关关系,反映了该地区浅层地下水与土壤水的强相互作用。
 - c. 基于水平衡计算得出太湖平原区洼地蓄水量参考值区间,对数值模拟中该参数的取值范围有意义。
- 基于野外试验区研究的这一方法是可行的,因为其他研究人员已经讨论过,在小尺度上发现的机理在扩大到集水区尺度是有意义的。此外,这些结论仅在水量平衡的基础上获得。同位素示踪实验是揭示径流与

野外试验田特征之间内在关系的有力工具,应能证明本文结果,因此将在进一步研究中加以考虑。

参考文献:

- [1] 闫人华,高俊峰,黄琪,等.太湖流域圩区水生态系统服务功能价值[J].生态学报,2015,35(15):5197-5206. (YAN Renhua, GAO Junfeng, HUANG Qi, et al. The assessment of aquatic ecosystem services for polder in Taihu Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35(15):5197-5206. (in Chinese))
- [2] 王磊之,胡庆芳,王银堂,等.太湖流域2016年、1991年大洪水对比分析[J].河海大学学报(自然科学版),2018,46(6):471-478. (WANG Leizhi, HU Qingfang, WANG Yintang, et al. Comparison of the two flood events occurred in 2016 and 1991 in the Taihu Lake Basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018,46(6):471-478. (in Chinese))
- [3] 丁文浩,秦伯强,吴挺峰,等.夏季风下的太湖风场-流场野外观测研究[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(2):102-108. (DING Wenhao, QIN Boqiang, WU Tingfeng, et al. Study on Taihu Lake's wind field and flow field under summer monsoon[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020,48(2):102-108. (in Chinese))
- [4] 杨梓静.邯郸市农村生活用水安全评价[D].邯郸:河北工程大学,2020.
- [5] 李军,刘昌明,王中根,等.现行普适降水入渗产流模型的比较研究:SCS与LCM.[J].地理学报,2014(7):926-932. (LI Jun, LIU Changming, WANG Zhonggen, et al. Two universal runoff yield models:SCS vs. LCM [J]. Acta Geographica Sinica, 2014(7):926-932. (in Chinese))
- [6] HORTON R E. The Rôle of infiltration in the hydrologic cycle[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1933, 14: 446-460.
- [7] DUNNE T, BLACK R D. An experimental investigation of runoff production in permeable soils[J]. Water Resources Research, 1970, 6: 478-490.
- [8] 王秀艳.白洋淀湿地系统地表水和地下水相互关系的研究[D].保定:河北农业大学,2011.
- [9] APPELS W M, BOGAART P W, VAN DER ZEE SJOERD E A T M. Surface runoff in flat terrain: How field topography and runoff generating processes control hydrological connectivity[J]. Journal of Hydrology, 2016, 534:493-504.
- [10] PYZOHA J E, CALLAHAN T J, SUN G, et al. A conceptual hydrologic model for a forested Carolina bay depressional wetland on the Coastal Plain of South Carolina, USA[J]. Hydrological Processes, 2010, 22(14):2689-2698.
- [11] KRAUSE S, BRONSTERT A. The impact of groundwater-surface water interactions on the water balance of a mesoscale lowland river catchment in northeastern Germany[J]. Hydrological Processes, 2007, 21(2): 169-184.
- [12] 付丛生,陈建耀,曾松青,等.国内外实验小流域水科学研究综述[J].地理科学进展,2011,30(3):259-267. (FU Congsheng, CHEN Jianyao, ZENG Songqing, et al. An overview on the water science researches at the experimental catchments in China and abroad [J]. Progress in Geography, 2011,30(3):259-267. (in Chinese))
- [13] 李帆,陈喜.不同地下水位埋深下五道沟地区地表径流变化规律分析[J].水电能源科学,2014,32(9):19-23. (LI Fan, CHEN Xi. Analysis of surface runoff variation under different depths of groundwater table in Wudaogou Area [J]. Water Resources and Power, 2014,32(9):19-23. (in Chinese))
- [14] 顾慰祖,尚曼廷,翟劭燊,等.天然实验流域降雨径流现象发生的悖论[J].水科学进展,2010,21(4):471-478. (GU Weizu, SHANG Manting, ZHAI Shaoyan, et al. Rainfall-runoff paradox from a natural experimental catchment [J]. Water Science Progress, 2010,21(4):471-478. (in Chinese))
- [15] BLUME T, VAN MEERVELD I, WEILER M. The role of experimental work in hydrological sciences-insights from a community survey[J]. Hydrological Sciences Journal, 2016, 62:334-337.
- [16] AMATYA D, GREGORY J, SKAGGS R. Effects of controlled drainage on storm event hydrology in a loblolly pine plantation[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2010, 36(1):175-190.
- [17] SLATTERY M C, GARES P A, PHILLIPS J D. Multiple modes of storm runoff generation in a North Carolina coastal plain watershed[J]. Hydrological Processes, 2006,20:2953-2969.
- [18] 赵龙山,张青峰,宋向阳,等.基于微尺度下DEM的黄土高坡耕地地表坑洼特征研究[J].土壤学报,2012,49(1):179-183. (ZHAO Longshan, ZHANG Qingfeng, SONG Xiangyang, et al. Study of characteristics of surface depressions in farmland on loess slope based on micro-DEM [J]. Acta Pedologica Sinica, 2012,49(1):179-183. (in Chinese))
- [19] NACHABE M, MASEK C, OBEYSEKERA J. Observations and modeling of profile soil water storage above a shallow water table[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(3): 719-724.
- [20] 詹道江,徐向阳,陈元芳,等.工程水文学[M].北京:中国水利水电出版社,2020.
- [21] 陈素洁,鞠琴,郝振纯,等.淮河流域近70年极端水文气象特征分析.[J]河北工程大学学报(自然科学版),2019,37(1):75-83. (CHEN Sujie, JU Qing, HAO Zhenchun, et al. Analysis of extreme hydrometeorological characteristics in Huaihe River Basin in recent 70 years [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2019,37(1):75-83. (in Chinese))