

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.06.004

太湖流域平原水文试验区降雨产流过程特征研究

杨海^{1,2},姜月华^{1,2},周权平^{1,2},刘鹏³

(1. 中国地质调查局南京地质调查中心,江苏 南京 210016;
2. 自然资源部流域生态地质过程重点实验室,江苏 南京 210016; 3. 中国地质科学院,北京 100037)

摘要:为研究太湖流域平原地区降雨产流特征,选取金坛水文试验区开展降雨产流过程观测,提取影响次降雨产流的特征要素,剖析典型蓄满、超渗产流案例中的产汇流过程。结果表明:试验区以蓄满产流机制为主,超渗产流现象较少。长历时小雨强条件下试验区产流过程可分为补给土壤水、填洼和排水沟出流、全面出流、雨止消退4个阶段。排水沟出流阶段径流系数小,以排水沟面积承接雨水出流为主;全面出流阶段为蓄满条件下的超渗产流,雨强阈值约0.1 mm/min,径流系数大。前两个产流阶段在短历时强降雨中同时发生。若全面出流阶段土壤尚未蓄满,则仍有较大比例雨水入渗,属传统意义上的超渗产流;若土壤已蓄满,则为蓄满条件下的超渗产流。

关键词:平原水文试验区;降雨产流;蓄满产流;超渗产流;排水沟;太湖流域

中图分类号:TV11 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2021)06-0506-09

Study on characteristics of rainfall-runoff generation processes at a plain experimental area in Taihu Lake Basin

YANG Hai^{1,2}, JIANG Yuehua^{1,2}, ZHOU Quanping^{1,2}, LIU Peng³

(1. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, China;
2. Key Laboratory of Watershed Eco-Geological Processes, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210016, China;
3. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: To study the characteristics of rainfall-runoff generation processes in the plain area of the Taihu Lake Basin, the Jintan hydrological experimental area was selected to carry out the observation of rainfall-runoff processes. The specific elements that affected the runoff generation during rainfall events were extracted and the whole hydrologic processes of two typical runoff generation events, which were dominated by saturation-excess and infiltration-excess mechanism respectively, were analyzed. The results indicate that the experimental area is dominated by the mechanism of saturation-excess and the phenomenon of infiltration-excess is rare. The runoff generation processes in the plain experimental area under the condition of long-duration light rainfall can be divided into four stages: soil water filling, surface depression filling & ditch outflow, whole area outflow, and recession after rainfall. The runoff coefficient in the ditch outflow stage is small and the outflow is mainly composed of the rainwater falling on the area of the ditch. The whole area outflow stage belongs to the infiltration-excess mechanism under the condition of soil moisture reservoir is saturated and the rainfall intensity threshold is about 0.1 mm/min with a large runoff coefficient. The first two runoff-generation stages may occur simultaneously in the short-duration heavy rainfall. If the soil is not saturated at the whole area outflow stage, it is a traditional infiltration-excess dominated runoff event with a large proportion of infiltration. While if the soil is saturated, it belongs to the infiltration-excess mechanism under the condition of soil moisture reservoir is saturated.

Key words: plain experimental area; rainfall-runoff; saturation-excess; infiltration-excess; ditch; Taihu Lake Basin

地表径流的形成机制大致可归纳为超渗产流机制^[1]和蓄满产流机制^[2],也有研究探讨了两者的混合情况,提出了Dunton的混合形式^[3]。超渗产流机制主要发生在雨强远超过地表土壤下渗率而足以产生积水的

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20190260)

作者简介: 杨海(1988—),男,工程师,博士,主要从事平原区产汇流机制研究。E-mail:yhasan@163.com

通信作者: 周权平,高级工程师。E-mail:18951757339@163.com

引用本文: 杨海,姜月华,周权平,等.太湖流域平原水文试验区降雨产流过程特征研究[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(6):506-514.

YANG Hai,JIANG Yuehua,ZHOU Quanping,et al. Study on characteristics of rainfall-runoff generation processes at a plain experimental area in Taihu Lake Basin[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2021,49(6):506-514.

情况^[1];蓄满产流机制则是当初始浅埋地下水水位在流域的局部区域超过地表时,饱和区通过回归流或直接降雨产生径流^[2]。通常认为半干旱-干旱地区以超渗产流机制为主导^[4],蓄满产流机制则多发生在湿润气候区^[5],然而,一般很难概括某一区域明确的降雨产流机制^[6-7]。以往对降雨产流机制的研究多集中于山丘区^[8-11],对于平原区的研究相对较少。

平原区地势平坦,受农业效应影响较大^[12]。Brauer 等^[13]对荷兰 Hupsel Brook 平原区流域的一场极端暴雨过程进行了分析,基于流域内的气象、土壤水、地下水、地表流量的变化过程,得出全流域降雨响应的 4 个阶段:(a)填充土壤水库容;(b)地下水响应;(c)地表填洼和地表径流;(d)回水反馈。该研究也加深了对平原区突发性洪水过程的认识。田块(plot)被认为是农业景观中最小的响应单元^[14-15],准确认识该尺度中的水文过程对于提高控制水污染、土壤流失和洪水形成等实践管理水平至关重要^[16]。Appels 等^[17]在荷兰地下水浅埋的平原区,分析了两个田块站点 1.5 年间的水文数据,在观测的 7 场降雨中发现有 4 场降雨因浅埋地下水影响而形成蓄满产流,另外 3 场则因为降雨和融雪的综合效应而发生超渗产流。五道沟实验站拥有 3 个嵌套尺度的产流试验区,研究发现区域内主要的产流机制为蓄满地表产流^[18-19],其中田块尺度的降雨产流规律分析非常具有借鉴意义。小区域的产流过程研究有助于量化描述微地形对区域产汇流的影响。明确降雨特征、微地形联合作用下的产汇流特征亦对更大尺度区域产流机制的剖析、田块营养元素迁移转化机制的探究等具有重要的指导意义。

目前,基于精细化试验观测的小尺度平原地区降雨产流机制探究仍然较少^[20-22]。太湖流域平原区地下水位普遍埋深较浅,梅雨季和台风秋雨季的降雨丰沛,地表极易发生涝渍灾害。为快速排水,小型排水沟在太湖流域平原区旱地、稻麦轮作田、林地等区域极其普遍。以往研究中未见涉及平原地区人工排水沟对地表产汇流过程的影响^[23]。本文基于太湖流域平原金坛水文试验区所收集的典型年份降雨产流过程资料,对区域内的降雨产流特征进行分析,明确水文过程中的水量转化机理,为平原区产汇流模拟提供指导。

1 试验区布局与土壤特性

1.1 试验区布局

试验区位于江苏省常州市金坛区朱林镇红旗圩村,地处太湖流域西部平原区,属亚热带季风区,四季分明,雨量丰沛。区域内多年平均气温和降水量分别为 15.3℃和 1 070 mm,年内大致分 3 个多雨期,即 4—5 月春雨期、6—7 月梅雨期及 9—10 月台风秋雨期,年内地下水平均埋深仅 55 cm。试验区内田块近似长方形,总面积约 1 008 m²(84 m×12 m)。北部为出口三角堰,以田埂中心线作为汇水区边界,堰口实际控制汇水面积约 912 m²,其中田埂面积约 48 m²,占汇水面积的 5%,因其高程与主田块相近,田埂片区的产流过程特征可一并纳入主田块考虑。试验区以北约 20 m 处为圩区主干河道,是水稻种植期灌溉水源,其余周边均为稻-麦轮作田,如图 1 所示。该田块最初亦为稻-麦轮作田,后将其改造为旱地进行监测。为保证集水区边界闭合及避免周边农田灌溉期地表水侧渗影响,采用双排水沟设计。外部排水沟可排出外部区域进入本区域的水量,内部排水沟包围核心试验区,收集并排出田块汇流区域的降雨产流。核心监测区与内部排水沟被两排水沟间的田埂包围,在田埂外侧设置深约 1.5 m 的隔水膜,切断表层的水力连通。集水区排水沟面积约 185 m²,占集水面积的 20%,平均深度为 0.3~0.4 m。核心监测区布设 1 个综合气象站、1 口地下潜水监测井、4 个土壤水分剖面(在 10 cm、20 cm、40 cm、60 cm、80 cm、100 cm 埋深处布设土壤水分传感器)和 1 个监控摄像头,见图 1(c)。

1.2 土壤分层特征

试验区内土壤为脱潜型水稻土中的乌栅土,垂向 0~60 cm 为粉质黏壤土(黏粒含量在 30%左右),60 cm 以下为粉质黏土(黏粒含量大于 40%)。利用烘干法测定不同埋深处的饱和含水量,恒定水头法测定分层饱和导水率,如表 1 所示,其中 θ_s 为平均饱和含水量, K_s 为饱和导水率。埋深 10 cm 处土壤最疏松,平均饱和含水量达

表 1 不同埋深处土壤物理水力参数

Table 1 Physical and hydraulic parameters of soil at different depths

深度/cm	土壤颗粒组成/%		$\bar{\theta}_s$ / ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	田间 持水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	K_s / ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)
	黏粒均值	粉粒均值			
10	31	57	0.520	0.330	10.8~36.0
20	29	61	0.470	0.330	7.2~46.8
40	29	63	0.440	0.330	18.0~46.8
60	33	61	0.420	0.350	18.0~64.8
80	41	54	0.410	0.370	7.2~32.0
100			0.420		

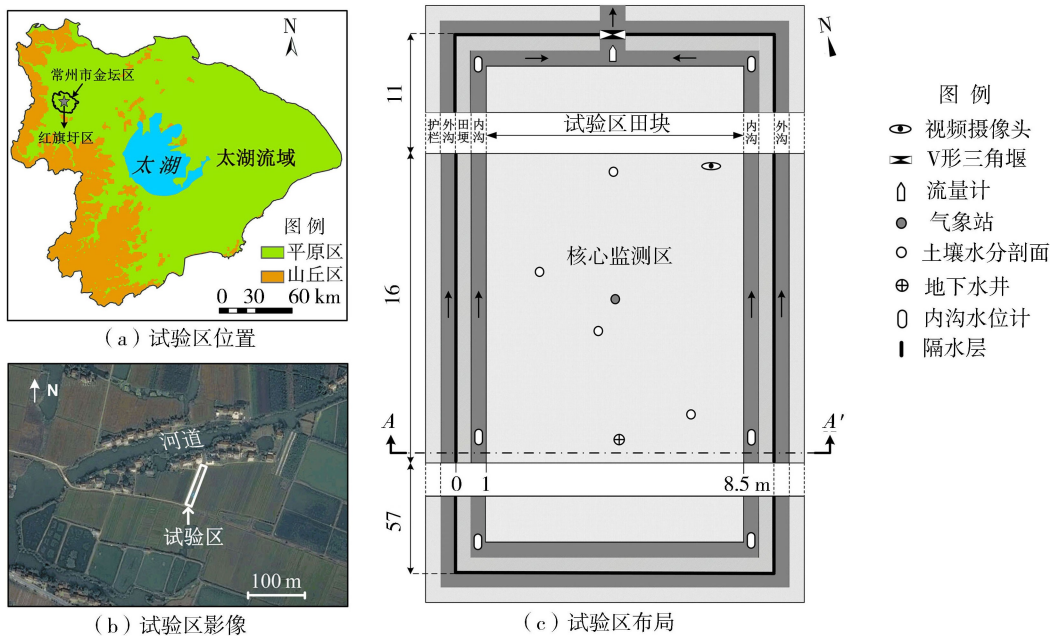


图1 金坛水文试验区位置及布局(单位:m)

Fig.1 Location and layout of the Jintan hydrological experimental area

0.520 m³/m³。随着埋深的增加,饱和含水量逐渐减小,在60 cm 以下保持在0.420 m³/m³左右,以土壤水吸力达30 kPa 所对应的含水量近似定为田间持水量,可以发现表层40 cm 以上土层田间持水量均为0.330 m³/m³,后随深度增加而增加。各层饱和和导水率变异性较强,10 cm、20 cm 和80 cm 处的饱和和导水率相对较小,可能成为控制地表稳定入渗率的关键因素。

2 次降雨产流要素分析

2.1 典型研究期选取

收集试验区2014—2016年降雨数据发现,2016年降水最丰,年降水量达1853.4 mm,是多年平均降水量(1070 mm)的1.73倍。将降雨间隔不超过12 h的不连续降雨定义为一场次降雨过程,从试验区现场观测发现,小于10 mm的次降雨基本无法形成明显出流,该降水量阈值也与Hofer等^[24]在小型人工流域产流研究中的结论一致。因此,剔选出3年间主要降雨期(3—11月)内大于10 mm的次降雨,共计83场,其中2016年最多,达34场,2014年为29场,2015年仅20场。根据不同雨量量级,分类统计剔选次降雨数量:2016年小于或等于40 mm的次降雨场次为24场,高于2014年的21场和2015年的13场;各年大于40 mm的次降雨场次差异较小,其中2016年有10场,2014年、2015年分别为8场和7场。综上,2016年大于10 mm的次降雨数量多,雨量分布也具有较高的代表性,可以反映试验区多年期降雨产流过程规律。

选取2016年主要降雨期进行次降雨过程特征分析,如图2所示。由图2可知,较大量级的径流场次集中于6—7月的梅雨季和9—10月的台风秋雨季。2016年7月1—5日间累积降水量达307.3 mm,7月3日试验区北部河道水位涨至地表,田间发生河水倒灌现象,无法得到确

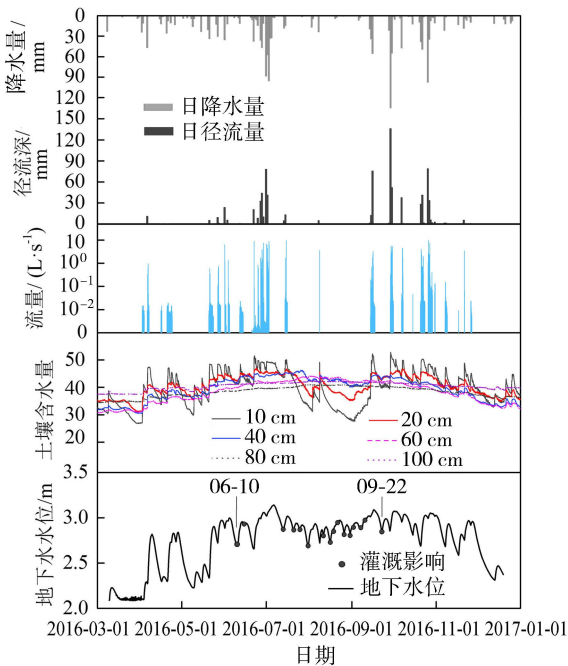


图2 2016年研究期试验区实测水量要素变化过程

Fig.2 Measured rainfall, runoff, soil moisture and groundwater level at the experimental area during the study period in 2016

切出流数据。表层土壤含水量、地下水位对降雨-径流过程响应剧烈。堰口出流过程与埋深 10 cm 处的峰值期土壤含水量相对应,可见表层土壤含水量的峰值期是判断产流发生的重要依据^[25-26]。研究期内地下水埋深较浅,最大埋深约 1.2 m,7 月 6 日埋深最浅,不足 0.1 m,已接近田面。6 月 10 日至 9 月 22 日期间,试验区周边稻田共计灌溉 16 次,受灌溉侧渗补给影响,田间地下水位抬升明显。在灌溉影响期和较大规模产流事件中,地下水位在排水沟底部平均高程上下波动。可以推断,排水沟对田间地下水位有着明显的控制作用。

2.2 产流要素分析

统计并提取 2016 年研究期内 34 场大于 10 mm 次降雨事件特征值,结果如表 2 所示,其中入渗量根据实测分层土壤水分变化量和土层厚度估算得到^[27]。所有次降水量在 11.5 ~ 307.3 mm,均值为 47.4 mm,最长降雨历时达 98.8 h,最短仅为 0.7 h,雨前地下水埋深在 0.20 ~ 1.15 m。共 27 场降雨有出流,占统计场次的 80%,其中 6 场降雨出流量较少,径流深未超过 1 mm。最大雨强范围为 2.4 ~ 90 mm/h,平均雨强在 0.7 ~ 35.5 mm/h。已知埋深 10 cm 处土壤饱和导水率代表区间为 10.8 ~ 36 mm/h,因降雨初期地表入渗率通常大于土壤饱和导水率,因此以区间最大值 36 mm/h 近似作为 Horton 超渗产流模型^[1]中的地表入渗能力。因此,仅 6 月 1 日、6 月 22 日、6 月 28—29 日、7 月 1—5 日、7 月 15 日、8 月 8 日、10 月 26—27 日和 11 月 21 日这 8 场次降雨可能在局部时段出现地表超渗现象。除 8 月 8 日次降雨平均雨强接近地表超渗雨强阈值外,其余场次平均雨强均小于 15 mm/h。因此,试验区内超过表层土壤饱和导水率阈值的降雨时段较少,区域主要为蓄满产流机制。入渗量与初始地下水埋深呈显著正相关关系,Spearman 秩相关系数达 0.81。灌溉期初

表 2 2016 年各降雨场次统计特征值

Table 2 Statistical characteristics of each rainfall event occurred in 2016

时 间	次降水量/ mm	降雨 历时/h	最大雨强/ (mm · h ⁻¹)	平均雨强/ (mm · h ⁻¹)	初始地下水 埋深/m	入渗量/mm	径流深/mm	径流系数
3 月 8—9 日	24.0	15.5	6.0	1.6	1.15	15.0		
4 月 2—3 日	35.2	31.7	19.2	1.1	1.13	30.0	0.6	0.02
4 月 6—7 日	47.9	26.7	10.8	1.8	0.96	30.1	11.2	0.23
4 月 15—16 日	17.2	19.3	14.4	0.9	0.92	10.4	0.4	0.02
4 月 20—21 日	33.4	22.8	10.2	1.5	0.93	29.0	1.0	0.03
4 月 22—23 日	11.5	17.5	6.0	0.7	0.50	6.9	0.6	0.05
4 月 26 日	13.3	9.8	5.4	1.4	0.48	10.2		
5 月 9—10 日	20.7	16.7	6.0	1.2	1.00	18.8		
5 月 15 日	23.3	16.5	7.8	1.4	0.94	21.9		
5 月 20—21 日	54.5	31.2	12.0	1.8	0.89	31.6	5.9	0.11
5 月 26—27 日	43.1	42.5	20.4	1.0	0.45	13.5	10.4	0.24
6 月 1 日	35.3	3.2	43.2	11.2	0.35	8.7	23.5	0.67
6 月 3 日	12.2	17.2	5.4	0.7	0.26	3.3	5.6	0.46
▲6 月 11—12 日	15.0	10.5	6.0	1.4	0.35	9.3	0.7	0.05
6 月 22 日	36.7	2.5	61.8	14.7	0.57	14.7	20.5	0.56
6 月 24—25 日	19.5	20.5	9.0	1.0	0.30	4.2	8.1	0.42
6 月 26—27 日	36.7	17.5	7.8	2.1	0.24	4.0	32.5	0.89
6 月 28—29 日	58.3	25.8	48.0	2.3	0.20	0.8	53.9	0.92
7 月 1—5 日	307.3	98.8	42.6	3.1	0.21	5.0		
▲7 月 14 日	18.2	10.0	25.2	1.8	0.30	8.1	5.1	0.28
7 月 15 日	14.6	2.2	51.6	6.7	0.24	1.8	12.5	0.86
8 月 3 日	15.9	2.3	27.0	6.8	0.36	12.2		
8 月 8 日	23.7	0.7	90.0	35.5	0.51	16.1	4.8	0.20
▲9 月 14—16 日	109.2	52.5	31.8	2.1	0.22	17.9	88.8	0.81
9 月 28—30 日	211.1	53.8	23.4	3.9	0.36	10.7	188.6	0.89
10 月 6—7 日	51.0	25.7	22.2	2.0	0.27	8.0	38.2	0.75
10 月 15 日	12.3	5.0	10.8	2.5	0.42	9.9		
10 月 20—22 日	97.3	65.5	25.2	1.5	0.51	16.4	71.3	0.73
10 月 26—27 日	132.2	38.2	40.8	3.5	0.23	1.4	119.7	0.91
10 月 30—31 日	13.9	11.5	2.4	1.2	0.21	2.7	2.8	0.20
11 月 7—8 日	23.8	18.2	8.4	1.3	0.55	13.1	2.7	0.11
11 月 17 日	12.8	6.8	8.4	1.9	0.64	10.3		
11 月 21 日	18.1	1.7	56.4	10.9	0.48	11.0	5.5	0.30
11 月 25—26 日	12.2	12.5	5.4	1.0	0.28	5.4	0.8	0.07

注:▲表示前 3 天内进行了灌溉,受灌溉期影响。

始地下水埋深较小,次降雨过程的入渗量相对较少,径流系数较高。径流量与初始地下水埋深呈负相关关系,相关系数为-0.44。非汛期初始地下水埋深相对较深时,次降雨过程形成的径流量普遍较少。径流量与入渗量相关性较弱,相关系数仅为-0.20。

3 典型次降雨产汇流过程分析

综合考虑雨量、雨强对径流过程的影响,分析27场出流事件中蓄满、超渗产流机制的主导特征。因篇幅所限,仅选取典型蓄满、超渗产流事件各两场进行剖析,总结试验区产汇流过程规律。

3.1 典型蓄满产流案例

选取非灌溉期内的两场典型蓄满产流案例进行分析,分别为2016年4月6—7日次降雨(编号为20160406)和2016年5月26—28日次降雨(编号为20160526),如图3所示。两场次降雨中各要素响应变化过程较为相似,仅针对初始地下水埋深较深、前期土壤含水量较低的20160406次降雨过程进行详细分析。该场次降雨量为47.9 mm,历时26.7 h,平均雨强1.8 mm/h,最大雨强10.8 mm/h,初始地下水埋深0.96 m,入渗量约30.1 mm,出流量为11.2 mm,径流系数约0.23。该场降雨3天前有35.2 mm降雨,因此雨前土壤较湿润,埋深60 cm以上土层都接近田间持水量。根据降雨分布、土壤水分变化及出流过程特征,围绕4个主要降雨时段进行分析。为对比土壤在不同次降雨中的真实饱和状态,使用土壤水分饱和度(即 θ/θ_s ,其中 θ 为实时土壤含水量)表示分层土壤水分条件。

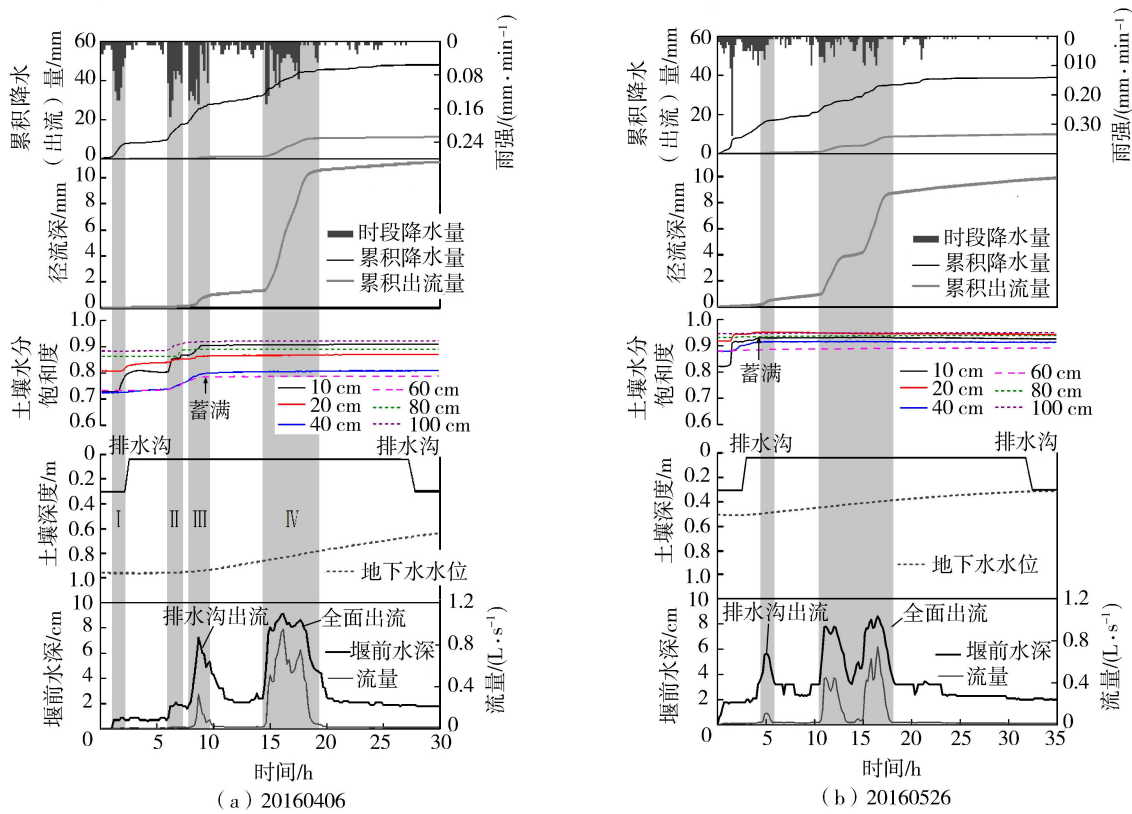


图3 2016年典型蓄满产流次降雨径流过程

Fig.3 Processes of two typical saturated-excess rainfall-runoff events in 2016

20160406次降雨时段I中平均雨强约0.1 mm/min,降雨开始后1.5 h(20160406T02:00),埋深10 cm、20 cm处的土壤含水量依次响应,10 cm处涨幅较大,土壤水分饱和度达0.8(对应土壤含水量 $\theta=0.416\text{ m}^3/\text{m}^3$),此时土壤含水量超过田间持水量,堰前排水沟形成薄层积水。有研究指出,当表层土壤水分饱和度达到0.75~0.90时,就可能开始积水,该含水量级亦被称作地表限制含水量^[28]。此外,雨滴动能对土壤表面的改造作用以及土壤中残余空气的阻滞效应^[29]等都可能减小地表下渗率,从而引起局部地面快速积水。在时段I后的小雨期,堰前积水基本不变,10 cm处含水量到达峰值后略有下降,而20 cm、40 cm和60 cm处的土壤含水量缓慢升高,反映了表层重力水逐渐向下入渗的过程。

时段Ⅱ中的平均雨强与时段Ⅰ中相似,该时段中堰前排水沟内积水继续抬升,各层土壤含水量几乎同时升高,10 cm处变幅最大,土壤水分饱和度达0.87($\theta=0.450\text{ m}^3/\text{m}^3$),地下水位也在此时段(距降雨开始时刻约7 h)开始抬升,非饱和带与饱和带已形成连通。

在短暂小雨期后进入时段Ⅲ,该时段中各层土壤含水量均达到最大值,并趋于稳定,已进入蓄满产流阶段。地下水位起涨速度加快,堰前积水深首次出现峰值,水深约7 cm(对应流量约0.3 L/s),后随雨强减小,水深快速消退。该时段累积降水量为9.8 mm,径流深为1 mm(折合约912 L水量),径流系数仅为0.1。已知排水沟面积约185 m²,时段内共承接降水量1 813 L,该部分水量即可供给试验区出流所需。因此,时段Ⅲ中的径流可能主要来自排水沟自身面积承接降雨后的出流,主田块积水尚未大面积连通汇入排水沟,处于填洼和排水沟主导出流阶段。随后约5 h的小雨期中,排水沟积水迅速下降,各层土壤含水量基本保持不变。

在最后一个主要降雨时段Ⅳ中,所有埋深处的土壤含水量基本不变,堰口积水迅速抬升,最深达9 cm(对应流量0.95 L/s),13 mm降雨产生约9 mm径流,时段径流系数高达0.7。假设排水沟承接的13 mm雨量全部出流,折算至全区也仅有2.63 mm径流量,远小于实际径流量。因此,该阶段除排水沟自身面积承接降雨出流外,必定有大量主田块产水汇入排水沟后出流,试验区进入全面出流阶段。该降雨时段后雨强迅速减小,堰前积水深逐渐消退。5月26—28日降雨也呈现相似的蓄满产流特征。

当出现排水沟主导出流时,主田块实际已达到蓄满状态,并形成一定深度的洼地积水,但尚未与排水沟大面积连通。此时,主田块地表仍以一较小速率稳定入渗,该入渗率与土壤层最小饱和导水率密切相关,并成为控制区域全面产流的阈值。若主田块继续经历一段超渗产流过程(雨强大于稳定入渗速率),则积水持续起涨,最终与排水沟大面积连通,形成全面出流。时段Ⅲ(排水沟主导出流)和时段Ⅳ(全面出流)间的小雨期雨强显然不足以使地表积水持续起涨,而时段Ⅳ中的雨强则超过了入渗控制阈值,从而使地表积水连通,形成全面出流。根据时段雨强推断,形成全面出流的阈值约为0.1 mm/min(折合6 mm/h),这一量级恰与20 cm、80 cm饱和导水率区间下限相近。因此,时段Ⅳ中是土壤蓄满条件下的超渗产流,该机制下的区域径流系数极高。

值得注意的是,时段Ⅲ后各层土壤稳定于一峰值含水量,但都未达到饱和含水量,其中40 cm和60 cm的饱和度仅有0.8,明显小于其他深度,这可能与各层不同的气压势有关。详细而言,表层土壤相对疏松,随着入渗量增加,其中的空气较易被排出,气压势较小,土壤最大含水量较接近饱和含水量,但因雨强较小,滞留空气很难完全排出。刘宏伟等^[25]也指出,产流期的土壤水分很可能处于与雨强相关的近饱和状态。40~60 cm处土壤较密实,前期入渗水量将地表排气通道封闭后,该层中滞留的空气很难被排出,气压势较大,土壤蓄水能力明显降低。而在更深处,因接近地下水位,土壤中滞留空气比例较小,气压势也较小。因此推断,土壤气压势会减小土壤的饱和含水量级,气压势越大,影响也越大。

3.2 典型超渗产流案例

试验区在夏、秋季易发对流雨,雨强大、持续时间短,其间可能出现超渗产流现象^[30]。选取非灌溉期内的两场典型超渗产流案例进行分析,分别为2016年8月8日次降雨(编号为20160808)和2016年11月21日次降雨(编号为20161121),如图4所示。两场次降雨中各要素响应变化过程较为相似,仅针对前期土壤含水量较低的20160808次降雨过程进行详细分析。该场次降水量为23.7 mm,历时仅40 min,最大雨强达90 mm/h,出流量为4.8 mm,径流系数约0.2,初始地下水埋深0.5 m,如图5所示。雨前除表层10 cm处含水量较低外,其余各层土壤含水量均较高(饱和度大于0.8),60~80 cm埋深处的土壤含水量已接近饱和含水量。排水沟主要出流时长仅1 h,流量呈单峰过程,堰前最高水深达14 cm。

当初始2.2 mm降雨(时段Ⅰ)后,10 cm、20 cm和40 cm深度的土壤含水量尚未响应,堰前排水沟已有薄层积水。时段Ⅱ中降水量为15 mm,时段雨强高达1.5 mm/min(90 mm/h),超过了地表饱和导水率阈值。40 cm以上土壤水分快速升高,但尚未达到最大值,产流类型是典型的超渗产流。时段径流量约1.5 mm,径流系数仅0.1。假设排水沟承接的15 mm雨量全部出流,折算至全区为2.59 mm径流量,高于实际径流量。因此,该时段试验区以排水沟出流为主,尚未进入全面出流阶段。时段Ⅲ降水量为6.4 mm,径流量2.3 mm,径流系数约0.36。雨强有所减弱,但仍大于地表饱和导水率,堰前积水深达到峰值,40 cm以上土壤含水量仍处于上升阶段,仍是典型的超渗产流。通过换算可知,该时段已进入全面出流阶段,但土壤尚未蓄满,时段入渗量较大,因此径流系数相对较小。时段Ⅳ中降水量仅为0.1 mm,堰前水深迅速消退,10 cm处土壤含水量有所下

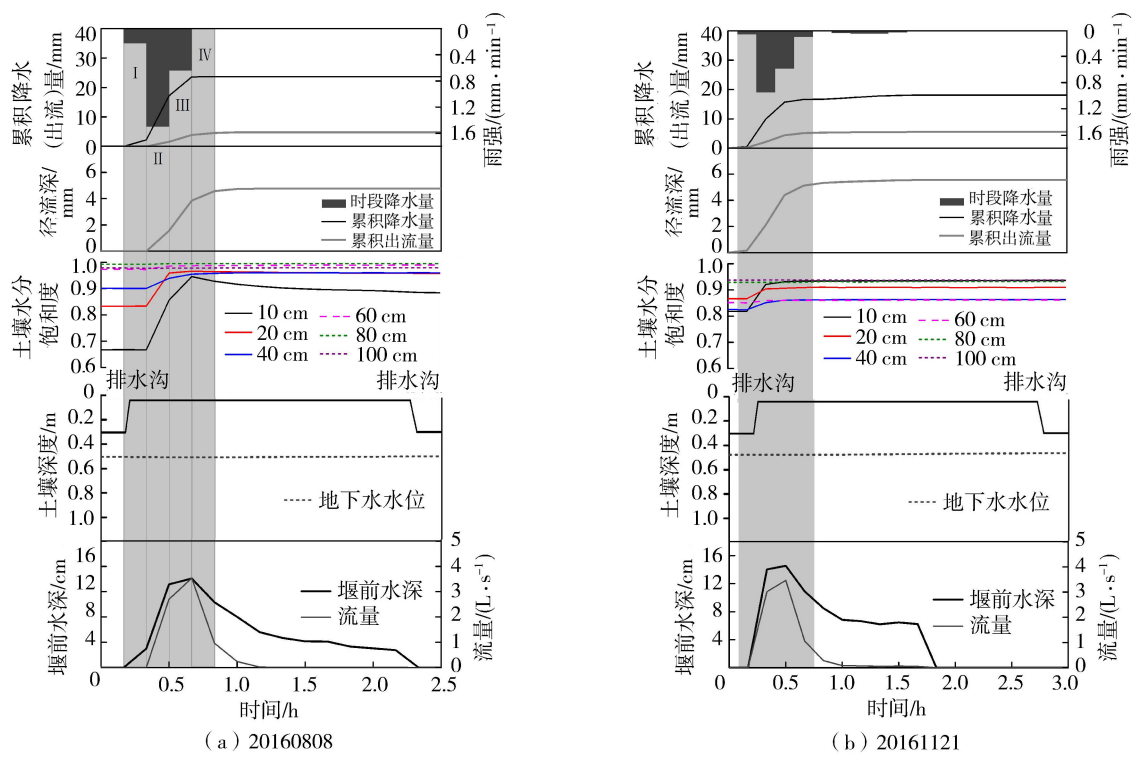


图4 2016年典型超渗次降雨径流过程

Fig.4 Processes of two typical infiltration-excess rainfall-runoff events in 2016

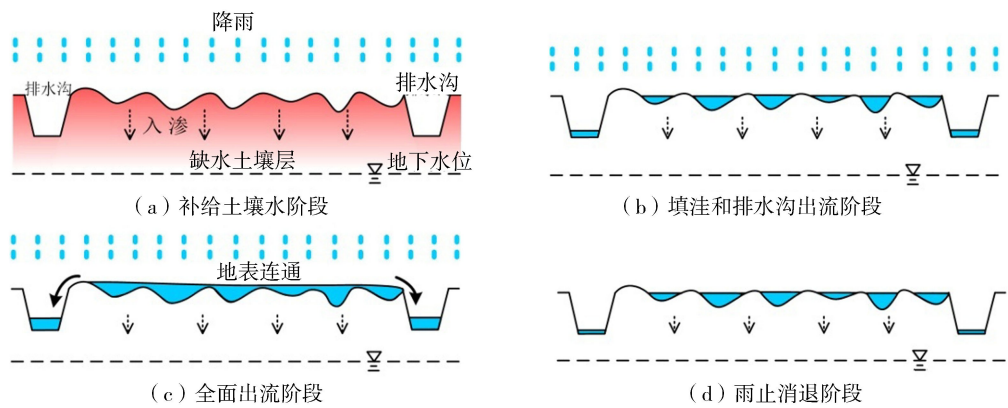


图5 平原试验区完整产流过程示意图

Fig.5 Diagram of whole runoff generation processes in plain experimental area

降,20 cm、40 cm 土壤含水量增加,表明地表土壤重力水逐渐向下入渗。因降雨历时较短,地下水位尚未响应。

强降雨形成的超渗产流事件中,土壤水补给、地表填洼、出流等过程都在极短时间内同时发生。传统意义上的超渗产流机制并未考虑土壤蓄满条件,但在地下水浅埋平原区,土壤初始缺水量较小,超渗产流过程中土壤可能很快达到蓄满状态,逐渐过渡至蓄满条件下的超渗产流现象。因此,在地下水浅埋平原区,传统意义上的超渗产流阶段很短暂,主要为蓄满条件下的超渗产流。

3.3 讨论

综合分析,试验区长历时小雨强条件下的产流过程可分为4个阶段,如图5所示。显然,地下水起涨对产流过程的影响较小,这与 Brauer 等^[13]在荷兰 Hupsel Brook 平原区总结的产流过程规律有所区别。

第Ⅰ时段:补给土壤水。该阶段主要为降雨的垂向入渗过程,各层土壤含水量随埋深逐次响应、升高。前期土壤湿度、初始地下水埋深、雨强、雨量等因素均影响土壤水补给量。

第Ⅱ时段:填洼和排水沟出流。主田块局部较低洼微地形区土壤缺水量小,表层土壤在入渗过程中最先接近饱和,出现积水。排水沟是试验区内最低洼区域,随着降水量的增加,排水沟内洼地积水形成连通,排水

沟将自身面积承接的雨水排出区域。该阶段出流量较少,径流系数低于排水沟面积比例。排水沟主导出流是区域土壤水库容饱和的信号,此时主田块局部微地形区域的积水即将与排水沟连通。

第Ⅲ时段:全面出流。当各层土壤水接近饱和条件后,只有在雨强达到一定阈值(约超过 0.1 mm/min)的连续降雨,才能使主田块表面积水不断抬升,经微路径汇入排水沟后排出,区域开始全面出流。该阶段是土壤蓄满条件下的超渗产流,下渗量小,流量大,径流系数大。

第Ⅳ时段:雨止消退。当雨强渐小至雨止,主田块汇流逐渐中断,排水沟水深迅速下降,出流量减小,排水沟中的残余水量继续出流,直至结束。

当雨强超过地表入渗能力发生超渗产流时,前两阶段在极短时间内同时发生。随着地表积水快速起涨而与排水沟形成连通,很快进入第Ⅲ阶段。该阶段土壤可能尚未蓄满,仍有较大比例雨水垂向入渗,径流系数略超过排水沟面积比例;若土壤已蓄满,则时段入渗量较少,径流系数较高。试验区内的产汇流过程与 Brauer 等^[13]在荷兰平原流域总结的暴雨响应过程较为类似。但笔者分析发现,在全面产流前,相对低洼的人工排水沟最先承雨出流,排水沟增加了区域的出流能力。

4 结 论

a. 平原试验区表层土壤疏松,地表下渗能力较强,可形成超渗产流现象的降雨时段较少,区域以蓄满产流机制为主。

b. 长历时小雨强条件下平原试验区产流过程可分为补给土壤水、填洼和排水沟出流、全面出流、雨止消退 4 个阶段。填洼和排水沟出流阶段以排水沟面积承接降雨出流为主,径流系数小;全面出流阶段需雨强达到一定阈值(约 0.1 mm/min),使主田块积水与排水沟连通,属蓄满条件下的超渗产流,径流系数大。

c. 在短历时强降雨中,补给土壤水、填洼和排水沟出流阶段在短时间内同时发生。若土壤在全面出流阶段尚未蓄满,则仍有较大比例雨水入渗,属传统意义上的超渗产流;若土壤已蓄满,则属蓄满条件下的超渗产流。

参考文献:

[1] HORTON R E. The role of infiltration in the hydrologic cycle[J]. Eos Transactions American Geophysical Union,1933,14(1): 143-154.

[2] DUNNE T,BLACK R D. An experimental investigation of runoff production in permeable soils[J]. Water Resources Research, 1970,6(2):478-490.

[3] LOAGUE K,HEPPNER C S,EBEL B A,et al. The quixotic search for a comprehensive understanding of hydrologic response at the surface:Horton,Dunne,Dunton,and the role of concept-development simulation[J]. Hydrological Processes,2010,24(17): 2499-2505.

[4] WILCOX B P,DAVENPORT D W,PITLICK J,et al. Runoff and erosion from a rapidly eroding pinyon-juniper hillslope[M]. New York:John Wiley & Sons,1996:61-71.

[5] ELSENBEEER H,VERTESSY R A. Stormflow generation and flowpath characteristics in an Amazonian rainforest catchment[J]. Hydrological Processes,2015,14(14):2367-2381.

[6] 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(14):2953-2969.

[7] 刘玉环,刘志雨,李致家,等. 华北地区分布式蓄超空间动态组合 TOKASIDE-D 模型研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(2):105-112. (LIU Yuhuan,LIU Zhiyu,LI Zhijia,et al. TOKASIDE-D model of spatial dynamic combination of saturation-excess and infiltration-excess runoff for North China region[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2021, 49(2):105-112. (in Chinese))

[8] 甘永德,刘欢,贾仰文,等. 土石山区山坡降雨入渗产流模型[J]. 水利水电科技进展,2018,38(2):8-13. (GAN Yongde, LIU Huan,JIA Yangwen, et al. A hillslope infiltration-runoff model in earth-rock mountain regions[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2018,38(2):8-13. (in Chinese))

[9] 严登明,翁白莎,宋新山,等. 那曲流域草地覆盖变化对降雨产流过程的影响[J]. 水资源保护,2019,35(6):44-51. (YAN Dengming,WENG Baisha,SONG Xinshan,et al. Effect of grassland cover change on rainfall and runoff yield in Naqu Watershed [J]. Water Resources Protection,2019,35(6):44-51. (in Chinese))

[10] KIRKBY M. Hillslope runoff processes and models[J]. Journal of Hydrology,1988,100(1):315-339.

- [11] 李致家,霍文博,张珂. 格林-安普特降雨径流模型改进及初步应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(5):385-391. (LI Zhijia, HUO Wenbo, ZHANG Ke. Improvement and preliminary application of Green-Ampt rainfall-runoff model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2020,48(5):385-391. (in Chinese))
- [12] BURT T P, SLATTERY M C. Land use and land cover effects on runoff processes: agricultural effects[M]. New York: John Wiley & Sons, 2006.
- [13] BRAUER C C, TEULING A J, OVEREEM A, et al. Anatomy of extraordinary rainfall and flash flood in a Dutch lowland catchment [J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2011, 15(6):1991-2005.
- [14] CERDAN O, LE BISSONNAIS Y, GOVERS G, et al. Scale effect on runoff from experimental plots to catchments in agricultural areas in Normandy[J]. Journal of Hydrology, 2004, 299:4-14.
- [15] MOUSSA R, VOLTZ M, ANDRIEUX P. Effects of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during flood events[J]. Hydrological Processes, 2002, 16(2):393-412.
- [16] AUGÉARD B, KAO C, CHAUMONT C, et al. Mechanisms of surface runoff genesis on a subsurface drained soil affected by surface crusting: a field investigation[J]. Physics and Chemistry of the Earth: Parts A/B/C, 2005, 30(8):598-610.
- [17] APPELS W M, BOGAART P W, VAN DER ZEE S E A. Surface runoff in flat terrain: how field topography and runoff generating processes control hydrological connectivity[J]. Journal of Hydrology, 2016, 534:493-504.
- [18] HAN Songjun, XU Di, WANG Shaoli. Runoff formation from experimental plot, field, to small catchment scales in agricultural North Huaihe River Plain, China[J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2012, 16(9):3115-3125.
- [19] 韩松俊,王少丽,许迪,等. 淮北平原农田暴雨径流过程的尺度效应[J]. 农业工程学报,2012,28(8):32-37. (HAN Songjun, WANG Shaoli, XU Di, et al. Scale effects of storm-runoff processes in agricultural areas in Huaibei Plain [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(8):32-37. (in Chinese))
- [20] 王船海,华文娟,杨海,等. 平原水文试验区(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. (WANG Chuanhai, HUA Wenjuan, YANG Hai, et al. The development and application of hydrological experimental areas (catchments) in plains[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2018, 46(1):7-15. (in Chinese))
- [21] 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. (in Chinese))
- [22] ZHAI Yue, WANG Chuanhai, CHEN Gang, et al. Field-Based analysis of runoff generation processes in Humid Lowlands of the Taihu Basin, China[J]. Water, 2020, 12(4):1216.
- [23] BARBER M E, KING S G, YONGE D R, et al. Ecology ditch: a best management practice for storm water runoff mitigation[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2003, 8(3):111-122.
- [24] HOFER M, LEHMANN P, BIEMELT D, et al. Modelling subsurface drainage pathways in an artificial catchment[J]. Physics and Chemistry of the Earth: Parts A/B/C, 2011, 36:101-112.
- [25] 刘宏伟,余钟波,崔广柏. 湿润地区土壤水分对降雨的响应模式研究[J]. 水利学报,2009,40(7):822-829. (LIU Hongwei, YU Zhongbo, CUI Guangbo. Pattern of soil moisture responding to precipitation in humid area [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(7):822-829. (in Chinese))
- [26] 鲍彪,毕华兴,云雷,等. 晋西黄土区刺槐林地土壤水分对降雨的响应[J]. 北京林业大学学报,2012,34(2):84-89. (BAO Biao, BI Huaxing, YUN Lei, et al. Response of soil moisture to precipitation in Robinia pseudoscacia forestland in loess region of western Shanxi Province, Northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2012, 34(2):84-89. (in Chinese))
- [27] 姚贤良. 红壤水问题及其管理[J]. 土壤学报,1996,33(1):13-20. (YAO Xianliang. Water problem of red soil and its management[J]. Acta Pedologica Sinica, 1996, 33(1):13-20. (in Chinese))
- [28] 杨诗秀,雷志栋. 均质土壤降雨喷洒入渗模型的数值计算[J]. 水利学报,1983(5):1-9. (YANG Shixiu, LEI Zhidong. Numerical method of infiltration model under rainfall or sprinkling in homogeneous soil or sprinkling in homogeneous soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1983(5):1-9. (in Chinese))
- [29] MOHAMMADZADEH-HABILI J, HEIDARPOUR M. Application of the Green-Ampt model for infiltration into layered soils[J]. Journal of Hydrology, 2015, 527:824-832.
- [30] 陆海明,孙金华,邹鹰,等. 平原河网区径流小区和田块尺度地表径流磷素流失特征[J]. 生态与农村环境学报,2013,29(2):176-183. (LU Haiming, SUN Jinhua, ZOU Ying, et al. Characteristics of phosphorus loss with surface runoff at plot and field scales in the plain river network region[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2013, 29(2):176-183. (in Chinese))