

不同下垫面-气象条件下小流域分层径流混合产流机理解析

马昱斐^{1,2}, 马啸赞^{1,3,4}, 陈 璐⁵, 廖爱民¹, 刘翠善^{1,2}, 鞠 琴^{3,4}, 王国庆^{1,2,4}

(1. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室; 2. 河海大学长江保护与绿色发展研究院;
3. 河海大学水文水资源学院; 4. 河海大学水安全与水科学协同创新中心; 5. 华中科技大学土木与水利工程学院)

摘要:以南大洼流域为研究对象,基于水文地貌特征将流域径流划分为地表径流(SR)、地下 0~50 cm 径流(SSR50)及地下 50~100 cm 径流(SSR100),通过典型降雨事件下各水体(降雨、土壤水、地下水、分层径流)氢氧同位素-水化学指标测试,结合高分辨率水文气象监测数据,解析了不同下垫面-气象条件下的分层径流形成机制,并耦合水文示踪技术与端元混合模型,揭示了各水源对分层径流贡献比例的动态变化。结果表明:不同下垫面-气象条件下分层径流产流机制及水分来源差异显著,湿润-多段式降雨模式下多呈超渗和蓄满的混合产流模式(SR 大于 SSR100 大于 SSR50),湿润-短时强降雨模式下以地表的超渗产流为主导(SR 大于 SSR100 大于 SSR50),干旱-连续型降雨模式下则由超渗向蓄满产流过渡(SSR100 大于 SR 大于 SSR50);分层径流水分来源整体呈现沿深度增加方向,事件水贡献比例降低、事件前水贡献比例升高的特征;SSR50 作为径流分层的过渡层,其水分来源受下垫面条件影响显著,呈现“主导-均衡”的动态转换特征。

关键词:氢氧同位素;分层径流;端元混合模型;径流分割;产流机理;南大洼流域

Analysis of layered runoff generation mechanisms in a small watershed under different underlying surface and meteorological conditions//Ma Yufei^{1,2}, Ma Xiaozan^{1,3,4}, Chen Lu⁵, Liao Aimin¹, Liu Cuishan^{1,2}, Ju Qin^{3,4}, Wang Guoqing^{1,2,4} (1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute; 2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University; 3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University; 4. Cooperative Innovation Center for Water Safety and Hydro Science, Hohai University; 5. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology)

Abstract: Taking the Nandadish Watershed as the research object, the watershed runoff was divided into surface runoff (SR), subsurface 0~50 cm runoff (SSR50), and subsurface 50~100 cm runoff (SSR100) based on hydrological and geomorphological characteristics. Through testing hydrogen and oxygen isotopes and hydrochemical indicators in various water bodies (precipitation, soil water, groundwater, layered runoff) during typical rainfall events, combined with high-resolution hydrometeorological monitoring data, the formation mechanisms of layered runoff under different underlying surface-meteorological conditions were analyzed. Hydrological tracing techniques coupled with end-member mixing models revealed the dynamic changes in contribution proportions of various water sources to layered runoff. Results show that layered runoff generation mechanisms and water sources differ significantly under various underlying surface-meteorological conditions. Under wet-multistage rainfall patterns, mixed runoff generation modes of infiltration-excess and saturation-excess predominate (runoff SR is higher than SSR100, which in turn is higher than SSR50). Under wet-short duration intense rainfall patterns, surface infiltration-excess runoff is dominant (runoff SR is higher than SSR100, which in turn is higher than SSR50). Under drought-continuous rainfall patterns, there is a transition from infiltration-excess to saturation-excess runoff (runoff SSR100 is higher than SR, which in turn is higher than SSR50). The water sources of layered runoff generally show a pattern where, with increasing depth, the contribution proportion of event water decreases while that of pre-event water increases. SSR50, serving as a transition layer for runoff stratification, has water sources significantly influenced by underlying surface conditions, exhibiting dynamic “dominant-balanced” conversion characteristics.

Key words: hydrogen and oxygen isotopes; layered runoff; end-member mixing analysis model; runoff segmentation; runoff generation mechanism; the Nandadish Watershed

基金项目:“十四五”国家重点研发计划青年科学家项目(2023YFC3081000);国家自然科学基金项目(52409036);中央级公益性科研院所
基本科研业务费专项资金项目(Y524006);江苏省基础研究计划自然科学基金项目(BK20240283)
作者简介:马昱斐(1996—),女,工程师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:yfma@nhri.cn
通信作者:马啸赞(2002—),男,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:mxz200202@163.com

中小流域因其特殊的地形条件与水文响应特性,对暴雨事件响应极为敏感,常易引发突发性洪涝灾害,造成显著的生态环境与社会经济损失^[1-3]。解析其分层混合产流机理是揭示降雨-径流非线性响应过程的关键科学问题^[4-6]。传统径流分割方法多采用图解划分法,其关键是确定一条基流分割线,将径流简单划分为地表径流和地下径流两部分,该方法具有较大的主观性和不确定性,存在水源贡献量化粗放、过程解析不足等局限^[7]。氢氧同位素作为追踪水循环过程的天然示踪剂^[8-13],能够很好地解析产流过程及水体转化关系,因此在径流水源解析中应用广泛^[14-18]。例如,马天文等^[19]基于氢氧同位素解析了秦岭森林小流域的径流水源,并指出雨前包气带湿润程度和降雨强度对径流形成过程具有较大影响;Qu 等^[20]通过场次径流过程分割研究,指出降雨增量能够更准确地分割径流过程,更有效地评估“新”水的重要性;卢小慧等^[21]运用氢氧同位素和水化学指标,评估了元荡湖湖水与河水、地下水、降雨之间的补给关系;许秀丽等^[22]通过采集并测试汾河入黄口湿地各水体的氢氧同位素组成,分析了不同时期地表水与地下水的转化关系;左玉珠等^[23]以黄土区 5 个不同植被类型小流域为研究对象,探讨了不同植被类型下事件水对径流的贡献比例。然而现有研究多聚焦于河道的汇流过程,较少考虑地表径流、壤中流等分层径流的水源组成及其贡献比例的动态变化,且对不同下垫面-气象条件下的分层径流产流机理缺乏系统认知。

我国东部低山丘陵区地形起伏较大,雨季暴雨频发^[24],其径流形成过程受下垫面-气象条件协同作用,呈现显著的复杂性和异质性,分层径流混合产流机理尚未明确^[25]。鉴于此,本文以南京水利科学研究院滁州水文实验基地的南大洼实验流域为原型,基于高分辨率水文气象监测数据与典型降雨事件下各水体(降雨、土壤水、地下水和分层径流)氢氧同位素-水化学指标测试,系统解析不同下垫面-气象条件下的分层径流形成机制;运用端元混合图识别径流主要水源,并构建端元混合模型揭示各水源对分层径流贡献比例的动态变化,探讨分层径流混合产流机理,以期完善水文模型参数化方案及洪涝灾害防控提供科学参考。

1 研究区概况

南大洼流域(32°17'N,118°12'E)位于长江流域下游的花山流域出口附近,流域面积 7 897 m²,是一天然小流域;地处中国南北气候分界的江淮过渡带^[26],气候湿润,雨热同季^[27],降雨多集中于 6—

9 月,年降水量为 10 00~1 100 mm,雨季暴雨频发。研究区暴雨以锋面雨、低压型暴雨居多,此外还有对流雨和台风雨,降雨历时长可达 1 周,短则数分钟。南大洼流域地表高程为 38~50 m,坡面坡度为 6.7%~17.1%,基岩面高程为 36~45 m,为典型的低山丘陵地貌,径流响应速度较快。流域内主要为麻栎和构树组成的林地,植被覆盖度较高;土壤类型主要为棕壤,土壤层平均厚度约为 2.46 m,土壤结构以块状、棱柱状为主,水平和垂直裂隙较为发育^[28-29];基岩主要为安山岩、凝灰岩,且为无裂隙的整合岩层^[30],四周用混凝土密封,除降雨外基本无其他水源输入;中央集水沟位置设有分层径流集水槽,将流域内径流划分为地表径流(SR)、地下 0~50 cm 径流(SSR50)与地下 50~100 cm 径流(SSR100)。

2 研究数据与方法

2.1 水文气象数据

于 2024 年 7—10 月在南大洼流域开展综合水文信息监测,通过多种设备系统对降雨、土壤水、地下水及分层径流等要素进行精确记录。滁州水文实验基地水文气象观测场位于流域西北方向约 350 m 处,场内配备 3 个精度为 0.1 mm 的翻斗式雨量计,每分钟自动记录一次降水量,以 3 个雨量计的平均值代表南大洼流域降雨信息。流域内部布设 1 根多层土壤剖面水分速测仪,每 10 min 监测 1 次 5、10、20、30、40、50、60、75、100 cm 深度的土壤体积含水量;同时,选取 7 个地下水井(即地下水位监测点,见图 1)布设压力式水位计,每 10 min 监测 1 次地下水位。为了研究不同降雨事件下的分层径流产流特性,流域内布设了分层径流监测系统,如图 2 所示。利用深 1 m 的分层集水槽分别收集 SR、SSR50 及 SSR100 径流,集水槽主槽长 61 m,辅槽长 7.7 m,

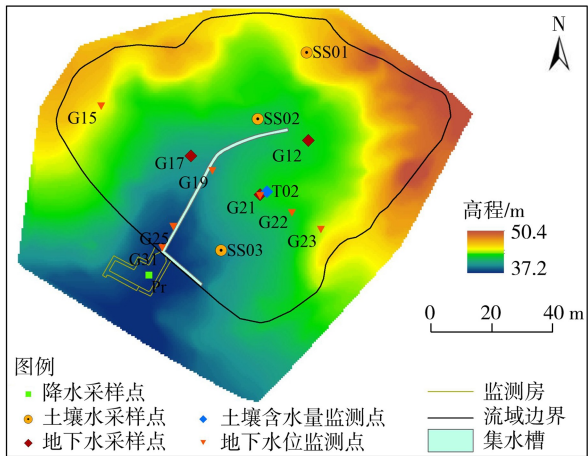


图 1 研究区地形与采样点分布

Fig. 1 Topography and sampling points distribution in study area

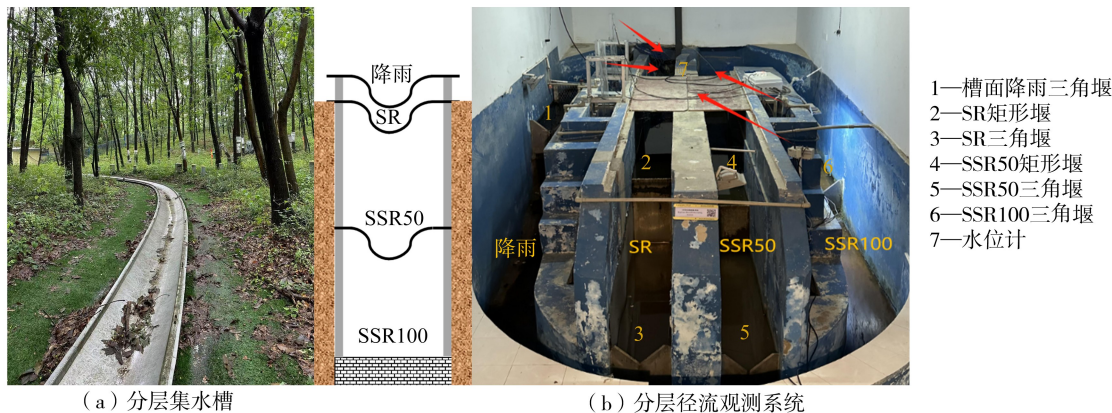


图2 分层集水槽及分层径流观测系统

Fig. 2 Layered water collection trough and layered runoff observation system

槽面宽 40 cm。分层集水槽并没有破坏流域内地表、地下径流的天然流线^[30],只是在水流汇入集水沟时分不同深度将其拦截汇入集水槽。在流域出口处将分层集水槽各层水流引到分层径流观测装置内,通过三角堰和矩形堰记录实时水位以监测径流过程(监测精度为 10 s),进而通过堰流公式推算流量。

2.2 样品采集与测试

对场次降雨事件下的降雨、土壤水、地下水及分层径流开展高频采样,研究区各采样点分布如图 1 所示。降雨通过观测房顶的集水装置收集,采样间隔为 30~60 min,降雨强度较大时加采样品;土壤水通过各采样点埋设的 3 层陶土头(15、40、60 cm)真空汲取,每天采集 1 或 2 次;地下水通过抽水泵连接井内硬质软管抽提,每天采集 1 或 2 次;分层径流通过旋片式真空泵连接分层集水槽出口段抽提,采样间隔为 30~60 min,并在实时水位线出现特征点(峰点和谷点)时加采样品,提高样品的代表性。

所有水样采样前均用待取水样润洗采样瓶 2 或 3 次,采样后现场采用便携式水质检测笔测定 pH 值、电导率(EC)、总溶解固体(TDS)、盐度等基础参数,同时使用 0.22 μm PES 玻璃纤维滤膜过滤 10 mL 水样到离心管中,密封避光保存用于氢氧同位素及阴离子测试,剩余水样分装后冷藏保存备用。阴离子(F^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^-)通过离子色谱仪(ICS-2000)测试; D 、 ^{18}O 稳定同位素通过超高精度液态水同位素分析仪(Picarro L2130-i)测试, D 、 ^{18}O 测定精度分别为 0.5‰和 0.1‰。对于自然水体中微量存在的 D 、 ^{18}O 同位素,通常采用相对标准值表征,即与 V-SMOW 标准样品的同位素丰度比进行对比计算。

2.3 研究方法

采用端元混合模型^[31]定量分析各水源对分层径流的贡献,其基本原理是基于水量平衡方程和示踪剂质量浓度平衡方程,分解径流中不同水源贡献的比例。示踪剂(如 D 、 ^{18}O 、EC、 Cl^- 等)选择要求各

端元差异显著,且示踪剂本身较稳定。端元混合模型避免了传统划分径流方法的任意性和主观性,可基于物理机制划分流量过程线,高精度地识别场次降雨中不同时段的地径流水源组分,以揭示研究区产流机理。考虑到样品代表性的影响,当降雨贡献比大于 1 时按 1 处理^[19]。

3 降雨模式分类与典型降雨事件

不同降雨场次中,由于下垫面条件(初始土壤含水量等)和气象条件(降水量、降雨连续性、降雨强度等)的不同,分层径流展现为多种产流特征,径流过程对下垫面-气象条件响应明显。为更好地探索分层径流混合产流机理,基于雨前下垫面状态和气象条件进行降雨模式分类,以揭示分层径流形成过程对流域下垫面-气象条件的响应规律,并对研究区 2020—2024 年历史洪水场次的径流系数与雨前土壤含水量进行统计分析(图 3)。

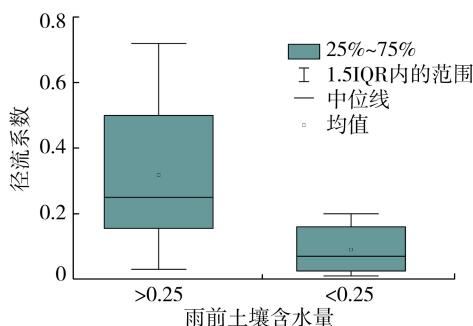


图3 不同土壤含水量下的径流响应

Fig. 3 Runoff response under different soil moisture contents

当雨前土壤含水量处于 0.25 临界值时,其径流响应呈现显著的差异特征,故以 0.25 为阈值将下垫面状态分为干旱、湿润两种;同时依据场次降水量、降雨连续性、降雨强度将降雨分为短时强降雨、连续型降雨、多段式降雨 3 种,由此可划分 6 种降雨模式,见表 1。

表 1 降雨模式分类

Table 1 Classification of precipitation patterns

下垫面条件状态	分类	气象条件	降雨模式
干旱	短时强降雨	最大降雨强度大于 20 mm/h、累计雨量小于 50 mm	干旱-短时强降雨
	连续型降雨		干旱-连续型降雨
湿润	多段式降雨	降雨过程分多段进行、总历时大于 36 h	干旱-多段式降雨
			湿润-短时强降雨
			湿润-连续型降雨
			湿润-多段式降雨

基于 2024 年 7—10 月对研究区的监测,共监测到 17 场降雨,对其中具备明显产汇流过程的 3 场降雨事件开展密集采样。3 场降雨事件基本信息如表 2 所示。R1 场次发生前 1 周研究区发生了总雨量超过 100 mm 的暴雨事件,下垫面较湿润,降雨过程分多段进行,总历时较长,为典型的湿润-多段式降雨;R2 场次与 R1 场次相隔不足 48 h,下垫面湿润,最大降雨强度达 23.73 mm/h,为典型的湿润-短时强降雨;R3 场次前两个月研究区无大雨,雨前土壤平均含水量处于较低水平,分布较为集中,为典型的干旱-连续型降雨。3 场降雨事件分别对应 3 种降雨模式,雨前下垫面条件和气象条件各异,分层径流响应过程区别显著。

4 结果与分析

4.1 土壤水与地下水响应过程

采用土壤水分剖面速测仪监测多层土壤体积含水量,根据降雨过程中土壤体积含水量的变化,反映不同深度土壤水对不同降雨事件的响应,进而揭示土壤水分的垂直迁移和储存机制。图 4(a)为研究

区 2024 年 7 月 9 日 14:00 至 14 日 20:00(包含 R1、R2 降雨事件)土壤体积含水量的变化过程。可以看出:①R1 场次发生前土壤处于相对湿润状态,降雨发生后浅层(5、10、20 cm)土壤体积含水量迅速增加,中层(30、40 cm)随降雨进行逐步增加,深层(50、60、75、100 cm)有微弱上升但整体相对平稳,说明该层土壤水较为充分。R1 场次结束后,浅层尤其是 5 cm 深土壤体积含水量逐渐降低,表明浅层土壤受蒸发作用影响显著。②R2 场次发生时浅层土壤体积含水量上升,其他层无明显反应。值得注意的是,60 cm 深土壤体积含水量始终呈上升趋势,雨后短时间内仍保持缓慢上升状态,且 75、100 cm 深土壤体积含水量整体十分稳定,说明该深度以下的土壤层具有较低的渗透性,阻碍了水分的进一步下渗。随着水分在重力作用下逐渐渗透至深层,60 cm 处的土壤水分缓慢积累。

图 4(b)为研究区 2024 年 9 月 16 日 0:00 至 25 日 0:00 土壤体积含水量的变化过程,可见 R3 场次发生前土壤处于较干旱状态,只有 100 cm 深土壤体积含水量达到 0.2 以上。可以看出:①9 月 16 日

表 2 典型降雨事件基本信息

Table 2 Basic information of typical rainfall events

场次	降雨模式	起止时间	雨前土壤平均含水量	降雨历时/h	降水量/mm	平均降雨强度/(mm/h)	最大降雨强度/(mm/h)
R1	湿润-多段式降雨	07-09T16:08—07-12T13:08	0.39	69.00	106.60	1.55	7.07
R2	湿润-短时强降雨	07-14T07:33—07-14T15:00	0.43	7.45	30.17	4.05	23.73
R3	干旱-连续型降雨	09-16T12:12—09-17T13:22	0.14	25.17	103.15	4.10	15.35

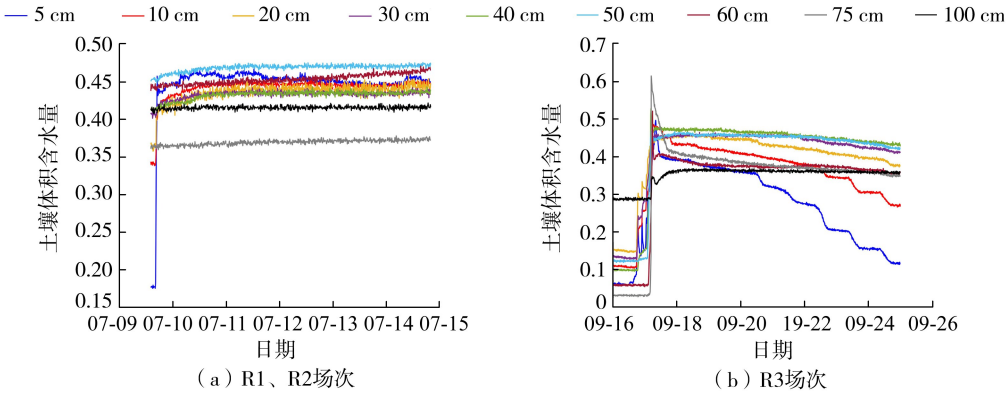


图 4 典型降雨事件下不同深度土壤体积含水量的时程响应

Fig. 4 Temporal response of soil volumetric water content at different depths under typical rainfall events

发生两场小雨,浅层(5、10、20 cm)土壤体积含水量迅速增加后减小,中层(30、40 cm)缓慢增加,深层(50、60、75、100 cm)基本无波动,说明该部分降雨落地后迅速发生渗透,主要补充浅中层土壤水;②主要降雨过程集中在9月17日,该部分降水量大且连续,降雨后深层土壤水得到充分补充,水分在垂向上不断移动,75 cm深土壤体积含水量最高达0.61,随后缓慢降低,可判断该段降雨发育了一定的深层优先流补充深层土壤水,且在75 cm深处形成相对不透水层。雨后随着土壤中活动水的排出,各层土壤含水量逐渐降低,在渗透作用下100 cm深土壤体积含水量先缓慢增加后保持稳定。

南大洼流域坐落在整合岩层上,且四周用混凝土密封,不存在地下水深循环裂隙补给^[30],流域地下水主要由降雨控制。图5(a)(b)分别为研究区2024年7月9日14:00至15日20:00、9月16日0:00至25日0:00的地下水位响应图。

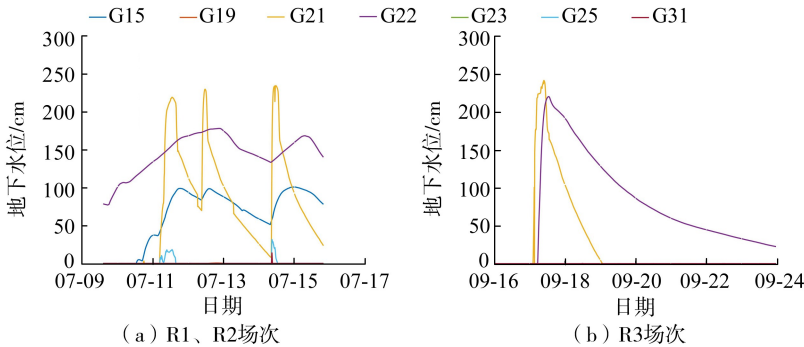


图5 典型降雨事件下地下水位的时间响应

Fig. 5 Temporal response of groundwater level under typical rainfall events

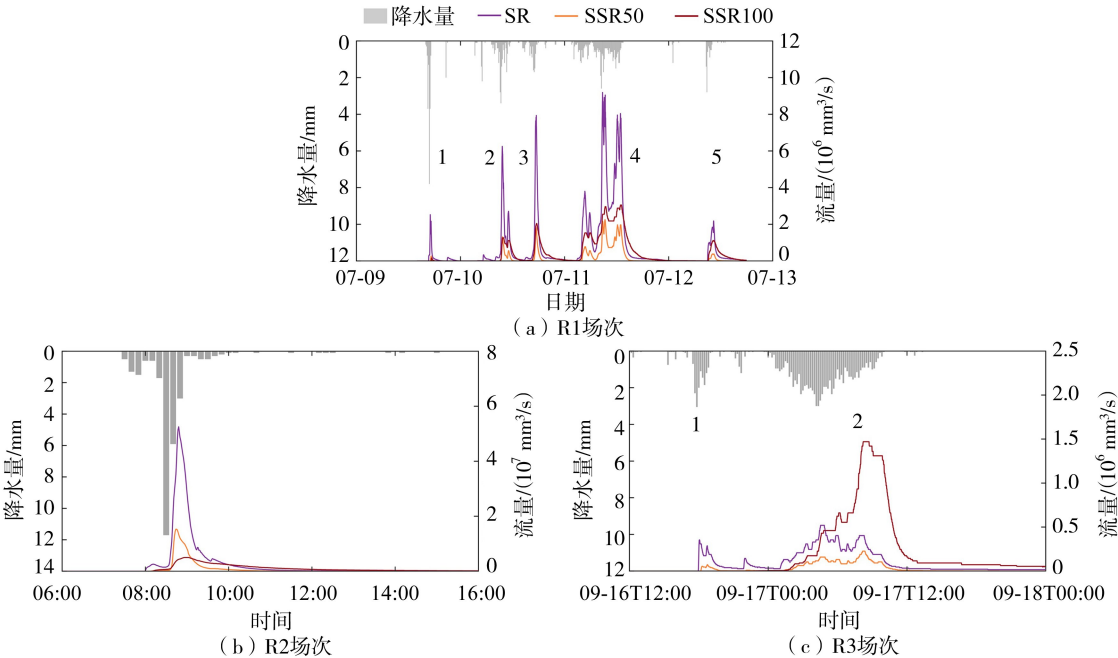


图6 典型降雨事件下降雨-分层径流过程

Fig. 6 Rainfall-layered runoff process under typical rainfall events

流多为地表的超渗产流。第2和第3时段降雨强度分布不均,3层径流均有明显产流,地表径流陡涨陡落,流量过程线较为对称,流域主要为混合产流模式。第4时段为连续降雨,土壤水分得到充分补充,3层径流均有稳定的径流过程,径流量从大到小为SR、SSR100、SSR50,地下水流发育,多发蓄满产流。第5时段与前期降雨相隔近20h,即使降水量较小,但各层径流响应明显,且具有较长的拖尾现象,这与流域仍处于蓄满状态有关。

R1场次下,SR产流最多且流量变幅最大,径流量达 196.18 m^3 ,SSR100次之,径流量为 116.48 m^3 ,SSR50产流最少,径流量为 41.49 m^3 ,可见该降雨事件下流域侧向流发育较弱,产流以地表径流和深层径流为主,流域多为超渗和蓄满混合产流模式。SR流量过程线多为瘦高型,汇流速度快,洪峰对降雨强度峰值的响应滞时为 $20\sim 40\text{ min}$;SSR50流量过程线多为瘦小型,洪峰对降雨强度峰值的响应滞时为 $30\sim 60\text{ min}$,退水速度快;SSR100流量过程线多为矮胖型,前期对降雨响应较慢,经连续降雨后对降雨响应较快,洪峰对降雨强度峰值的响应滞时为 $40\sim 70\text{ min}$ 。3种径流的退水速度从小到大为SSR100、SSR50、SR,其中SSR50与SR相近,这不仅与汇流路径长短有关,同时也反映了该流域垂向流发育, $0\sim 50\text{ cm}$ 壤中流在汇入集水槽前不断发生下渗补充深层土壤水。

R2场次降水量主要集中在1h内(图6(b)),最大10min降水量达 11.7 mm 。R2场次与R1场次降雨相隔不到48h,流域基本处于蓄满状态,因此各层径流均有明显产流,且洪峰流量显著大于R1场次。由图6(b)可知,SR和SSR50几乎同时达到洪峰,相对于降雨强度峰值的滞时为 17 min ,而SSR100径流过程相对平缓,洪峰对降雨强度峰值滞时为 30 min ,可见高强度降雨下3层径流对降雨的响应均较快。R2场次下SR径流量(89.15 m^3)大于SSR100(33.8 m^3)大于SSR50(23.65 m^3),其中SSR50响应明显,汇流速度较快,且前期产流量大于SSR100,这是由于该场次降雨强度高,地表多发生超渗产流,水分聚集在土壤表层,以地表径流和近地表横向径流的方式快速移动汇入集水槽,由此可以推断该部分径流主要由降雨组成。当降雨强度减小后,SSR50迅速减小,而SSR100平缓下降。

R3场次雨前不同深度土壤含水量均处于较低水平(图4(b)),降雨主要为2024年9月16日17:20—19:20和9月17日0:00—10:00两段,其中第2时段降水量为 82.05 mm ,占总雨量的 $4/5$ 。由图6(c)可知,第1段降雨过程主要产生SR,同时伴

有少量SSR50、SSR100无产流,该部分径流多为地表超渗产流。在第2个降雨时段中,SSR100产流显著大于另两者,该时段流域主要为蓄满产流,其中SR、SSR50洪峰相对降雨强度峰值滞时约 26 min ,而SSR100流量随降雨进行逐渐增大,直至9月17日8:13达到峰值,此时相对降雨强度峰值滞时已有4h,可见干旱状态下深层径流与降雨的相关性较差。结合深层土壤体含水量变化趋势(图4(b)),R3场次流域内降雨不断下渗,稳定地补充深层土壤水,因此SSR100径流量缓慢增大,洪峰处于降雨过程尾端。相比另两场降雨,R3场次形成径流最少,整体SSR100(25.75 m^3)大于SR(12.04 m^3)大于SSR50(3.78 m^3),这与流域下垫面处于干旱状态密切相关。

4.3 分层径流水源组分识别

南大洼流域人类活动干扰较小,流域内分层径流水源只包含降雨、土壤水、地下水3种,无其他水源输入。构建端元混合模型进行径流划分时,各端元要保证具有显著的水化学或同位素差异。为更合理地划分径流来源,选取 ^{18}O 同位素和电导率、总溶解固体、氯离子(Cl^-)作为环境示踪剂,通过各水源及分层径流 ^{18}O -EC、 ^{18}O -TDS、 ^{18}O - Cl^- 相关关系构建端元混合分析图,识别研究区分层径流的主要水源。

由图7可见,在3场次降雨中,端元混合分析图均能够有效识别降雨和3层径流,但土壤水和地下水在图中分布较为重合,反映出二者的水化学、同位素差异较小,这与研究区地下水陡涨陡落有关(图5)。地下水与深层土壤水形成高度混合,存在一定的重合部分,故二者不适合作为两个独立端元进行划分。

选取降雨作为事件水(流域新输入降雨)、土壤水和地下水作为事件前水(降雨前储存在土壤中的水分),将事件水和事件前水作为研究区径流划分的主要端元,将不同降雨事件下的分层径流过程进行二水源划分,精准识别不同下垫面-气象条件下事件水和事件前水对分层径流贡献比的动态变化。

4.4 分层径流水源划分

端元混合模型的基本假设之一是示踪剂具备保守性^[32]。氢氧同位素作为水分子的一部分,是天然示踪剂。南大洼流域面积较小、地形坡度较大,导致径流响应极为迅速(图6)。虽然氢氧同位素在蒸发分馏作用下的波动会对结果造成一定的影响,但在快速产汇流条件下,径流水体暴露于大气环境的时间极为有限,且降雨期间蒸发作用较弱,因此可认为示踪剂保守性假设在本文条件下是合理的。此外,由于氢氧同位素线性相关性较强,且 ^{18}O 的测试精

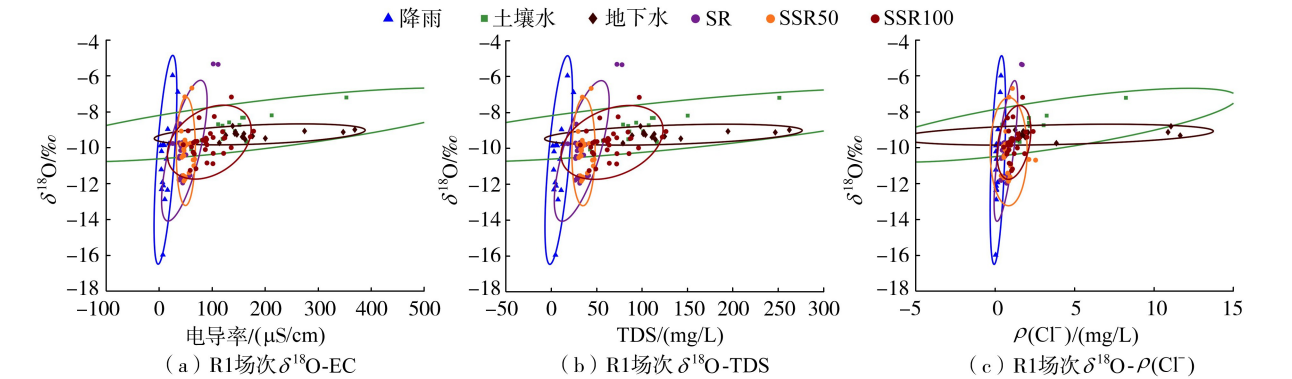


图 7 研究区各水体端元混合分析

Fig. 7 End-member mixing analysis diagram of various water bodies in the study area

度更高(^2H 、 ^{18}O 测定精度分别为 0.5‰和 0.1‰),故选用 ^{18}O 作为示踪剂。典型降雨事件各时段事件水和事件前水对分层径流的贡献比及对应径流量如表 3 所示,可知各场次分层径流的水分来源具有显著区别,同一场次不同时段径流水分来源也变化显著。

图 8 为 R1 场次的分层径流划分结果。R1 场次下事件水对 SR、SSR50、SSR100 总径流的贡献比分别为 62.93%、60.52%、46.11%,事件前水的贡献比分别为 37.07%、39.48%、53.89%,整体沿深度增加方向事件水的贡献比逐渐降低,事件前水贡献比例逐渐升高,且 SR 与 SSR50 水分来源相似。

第 1 时段降雨中,事件水对 SR、SSR50、SSR100 的贡献比例分别为 100.00%、51.80%、11.35%,各层径流中事件水贡献比例差异明显;该阶段降雨雨量小但强度高,流域多发地表产流,且浅层土壤含水量较低,因此地表径流均由事件水组成,而事件水对深层径流影响较小。第 2 时段降雨中,事件水对 SR、SSR50、SSR100 的贡献比分别为 55.40%、62.91%、59.73%,经一段降雨后事件水对深层径流的影响明显增加,且 SSR100 产流明显增多。第 3

时段降雨中事件水对径流的贡献比较高,分别达 90.78%、95.58%、73.14%,且该阶段 3 层径流的流量过程线均较陡峭,说明该段径流响应迅速,可能发育了一定的优先流。第 4 时段为降雨较为集中阶段,整体降雨强度不高,事件水对 SR、SSR50、SSR100 的贡献比分别为 57.07%、54.40%、39.25%,事件前水对深层径流的贡献比明显增大,其中 SR 和 SSR50 洪峰中事件水的贡献比与事件前水相近,而 SSR100 洪峰主要由事件前水组成。第 5 时段降雨中,事件水对 SR、SSR50、SSR100 的贡献比分别为 78.71%、78.33%、54.75%,SSR100 产流比例较多,SSR50 产流较少且与 SR 水分来源相似,说明该段产流主要集中于地表产流和深层产流。

此外,在降雨集中且强度较高时(如第 3 时段和第 4 时段前部),SSR50 与 SR 的径流来源十分接近,事件水贡献比例较大,而在雨量少或退水时(如第 4 时段后部),SSR50 的事件前水占比较高。这是因为雨量较大时,土壤表层积聚大量水分快速移动,故 SR 和 SSR50 径流组分相似;而雨量的较小时,降雨落区多发生下渗,且中层土壤侧向通道有限,故 SSR50 事件前水影响更多。SSR100 洪峰中事件前

表 3 典型降雨事件的事件水、事件前水各时段贡献比及径流量

Table 3 Contribution proportion and runoff volume of event water and pre-event water at different periods under typical rainfall events

场次	时段	SR				SSR50				SSR100			
		事件水		事件前水		事件水		事件前水		事件水		事件前水	
		占比/%	径流量/ m ³	占比/%	径流量/ m ³	占比/%	径流量/ m ³	占比/%	径流量/ m ³	占比/%	径流量/ m ³	占比/%	径流量/ m ³
R1	1	100.00	3.65	0.00	0.00	51.80	0.14	48.20	0.13	11.35	0.02	88.65	0.16
	2	55.40	11.96	44.60	9.63	62.91	2.57	37.09	1.51	59.73	6.03	40.27	4.07
	3	90.78	20.52	9.22	2.08	95.58	4.18	4.42	0.19	73.14	9.57	26.86	3.51
	4	57.07	75.95	42.93	57.13	54.40	16.88	45.60	14.15	39.25	31.71	60.75	49.08
	5	78.71	9.15	21.29	2.48	78.33	1.35	21.67	0.37	54.75	5.92	45.25	4.89
	全段	62.93	123.46	37.07	72.72	60.52	25.11	39.48	16.38	46.11	53.71	53.89	62.77
R2	全段	75.82	67.59	24.18	21.56	75.45	17.84	24.55	5.81	47.64	16.10	52.36	17.70
R3	1	97.26	1.36	2.74	0.04	61.20	0.14	38.80	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00
	2	70.50	7.20	29.50	3.01	55.10	1.94	44.90	1.58	42.44	10.93	57.56	14.82
	全段	74.51	8.97	25.49	3.07	56.14	2.12	43.86	1.66	42.44	10.93	57.56	14.82

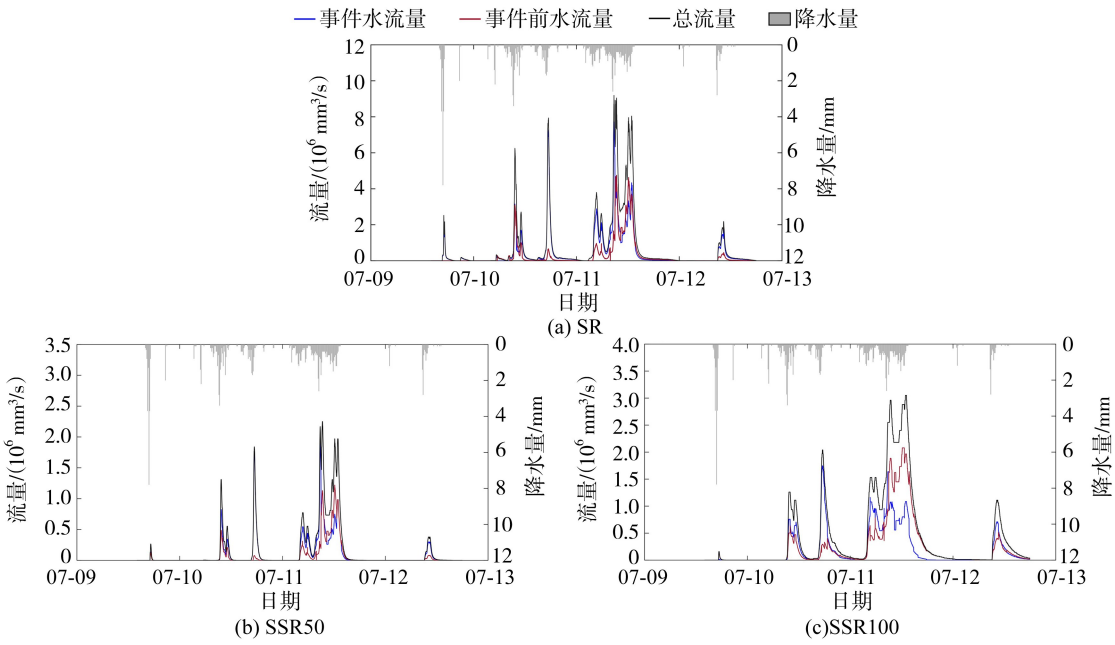


图 8 基于二端元混合模型的 R1 场次分层径流划分

Fig. 8 Runoff component division of R1 event based on two-end-member mixing analysis model

水的占比显著高于 SR 和 SSR50,且在第 4 时段降雨后期事件前水为 SSR100 的主要成分,退水阶段事件前水基本为径流唯一来源。

图 9、图 10 分别为 R2、R3 场次的分层径流划分结果。R2 场次降雨分布集中,且流域土壤含水量处于较高水平,因此径流响应明显,能够充分反映研究区对短时强降雨的响应过程。R2 场次下事件水对 SR、SSR50、SSR100 的贡献比分别为 75.82%、75.45%、47.64%,事件前水的贡献比分别为 24.18%、24.55%、52.36%,整体仍表现为沿深度增

加方向事件水贡献比减少、事件前水贡献比升高的特点。SR、SSR50 中事件水贡献比显著大于事件前水,这是由于该场次降雨雨强较大,最大 10 min 降水量达 11.7 mm,降雨强度远大于土壤下渗率,多发地表超渗产流,事件水积聚在地表或近地表横向移动,快速汇入分层集水槽,故事件水为 SR、SSR50 的主要组成部分。相对而言,SSR100 中包含更多的事件前水组分,但在洪峰阶段事件水为径流主要来源,说明在高强度降雨下流域垂向优先流较发育,降雨能够快速补充深层土壤水发生产流;当降雨变小或

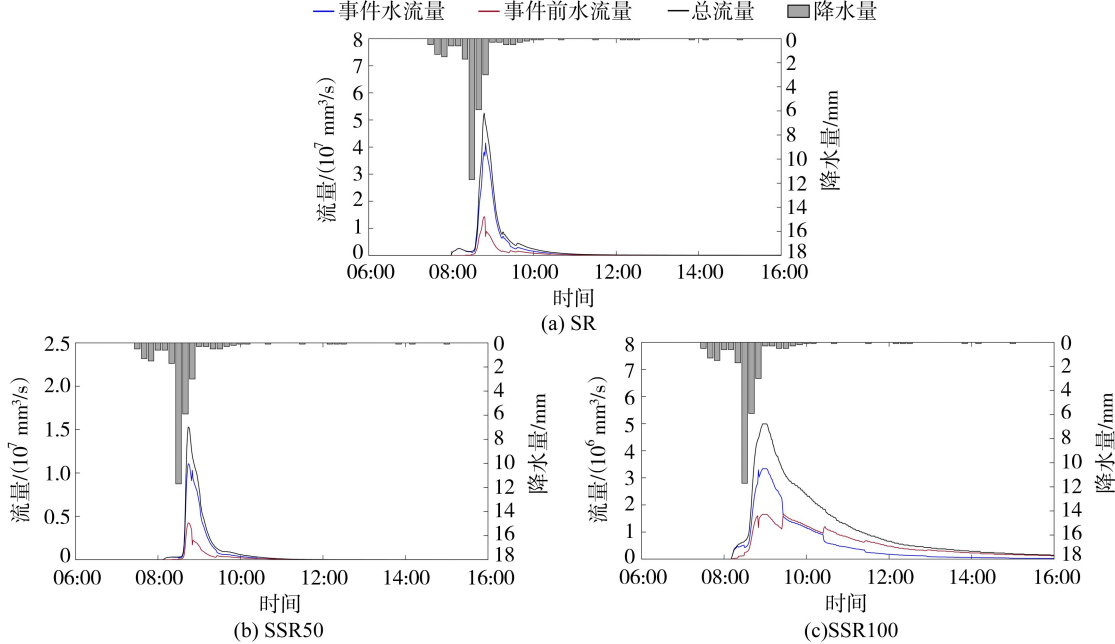


图 9 基于二端元混合模型的 R2 场次分层径流划分

Fig. 9 Runoff component division of R2 event based on two-end-member mixing analysis model

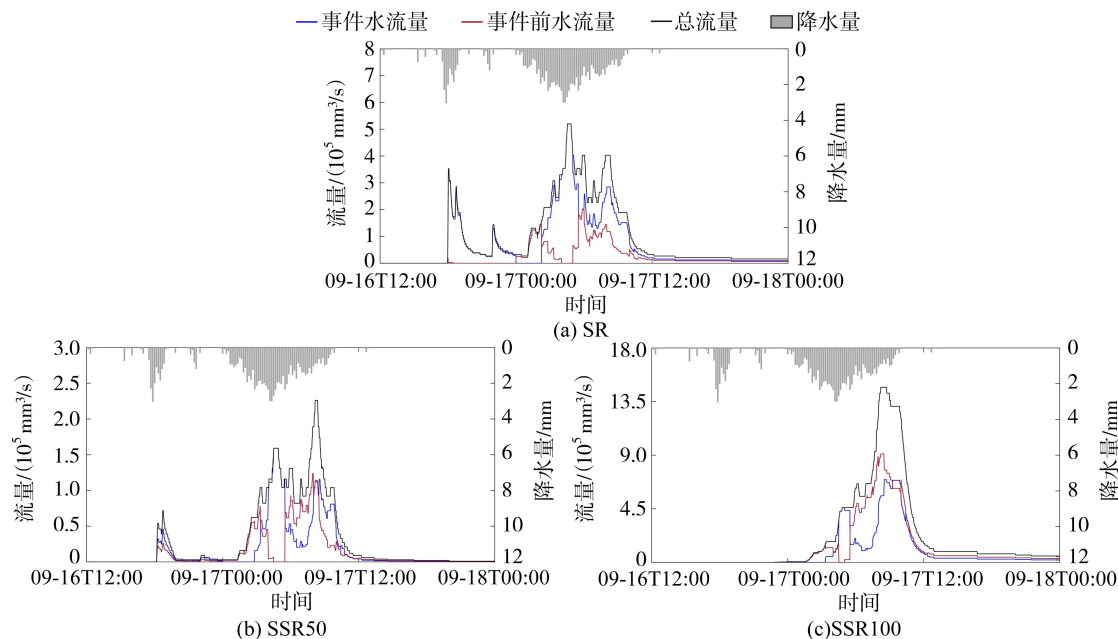


图 10 基于二端元混合模型的 R3 场次分层径流划分

Fig. 10 Runoff component division of R3 event based on two-end-member mixing analysis model

停止时,事件前水贡献比逐渐增加。

R3 场次降水量大且分布集中,但雨前土壤含水量处于较低水平,因此产流相对较小,径流划分结果能够很好地揭示研究区在干旱状态下对大暴雨过程的响应。

R3 场次下事件水对 SR、SSR50、SSR100 的贡献比分别为 74.51%、56.14%、42.44%,事件前水的贡献比分别为 25.49%、43.86%、57.56%,整体仍表现为沿深度增加方向事件水贡献比减少、事件前水贡献比升高的特点。该场次下事件水和事件前水对径流贡献比的动态变化显著,在第 1 时段降雨中地表径流基本由事件水组成,此时主要发生超渗产流。在降雨强度峰值发生后(9 月 17 日 4:20),SR、SSR50 响应迅速,洪峰相对降雨强度峰值滞时较短,SSR100 也有一定响应,该阶段径流主要由事件水组成。结合图 4,在降雨强度峰值阶段,深层土壤体积含水量急剧增长,例如,75 cm 深土壤体积含水量在 4:20—4:30 内由 0.14 升高到 0.61,这是该场次监测到的最大土壤体积含水量,可见在该阶段暴雨中优先流尤为发育,降雨迅速下渗补充到土壤深层。此外,不同于 R1、R2 场次,该场次中 SSR50、SSR100 最大流量均出现在降雨过程后段,这是由于研究区前段处于干旱状态,而经连续降雨下渗过程,土壤水得到充分补充,而后达到蓄满条件发生蓄满产流,因此 SSR50、SSR100 流量最大值出现在降雨过程后段,流量过程线对称性较差,径流中事件前水贡献比较高。

5 结 论

a. 分层径流产流特征受下垫面状态和气象条件影响显著。① 湿润-多段式降雨(R1 场次)形成混合产流模式,呈现地表超渗产流(SR 占 55.4%,产流量为 196.18 m³)与深层蓄满产流共存(SSR100 占 32.9%,产流量为 116.48 m³)特征,SSR50 产流最少(占比 11.7%,产流量 41.49 m³);② 湿润-短时强降雨(R2 场次)引发径流快速响应,以超渗产流为主导,产流量从大到小排序为 SR(89.15 m³)、SSR100(33.8 m³)、SSR50(23.65 m³),受控于高强度降雨特征,SSR50 在产流初期表现出较 SSR100 更强的径流响应;③ 干旱-连续型降雨(R3 场次)径流响应较弱,以深层蓄满产流为主导(SSR100 占 61.9%,产流量为 75 m³),SSR100 洪峰滞后降雨强度峰值 4 h,而 SR(12.04 m³)、SSR50(3.78 m³)受前期土壤水分亏缺制约,产流量显著降低。

b. 基于二端元混合模型对分层径流进行水源解析,将其划分为事件水(降雨)和事件前水(土壤水和地下水),结果表明:① 分层径流水分来源具有显著的垂向分异特征,整体表现为沿深度增加方向,事件水贡献比降低、事件前水贡献比升高。② 湿润条件下,SR 与 SSR50 的水分来源具有同源性,且事件水贡献率显著高于事件前水(如 R1 场次为 60%、40%,R2 场次为 75%、25%);干旱条件下,SSR50 和 SSR100 的水分来源具有趋同性,事件水与事件前水占比相当;值得注意的是,SSR50 作为分层的过渡层,其水分来源呈现“主导-均衡”的动态转换特征,

反映了下垫面条件对径流组分的关键调控作用。

参考文献：

[1] Todini E. Erratum to: flood forecasting and decision making in the new millennium. Where are we? [J]. Water Resources Management,2017,31(13):4371-4372.

[2] 王雪梅,翟晓燕,郭良. 山区小流域洪水分布式模拟与危险性评估[J]. 水文,2023,43(4):45-52. (Wang Xuemei,Zhai Xiaoyan,Guo Liang. Distributed simulation and hazard assessment of flash floods in small mountainous catchment[J]. Journal of China Hydrology,2023,43(4):45-52. (in Chinese))

[3] 李红霞,王瑞敏,黄琦,等. 中小河流洪水预报研究进展[J]. 水文,2020,40(3):16-23. (Li Hongxia, Wang Ruimin,Huang Qi,et al. Advances on flood forecasting of small-medium rivers [J]. Journal of China Hydrology,2020,40(3):16-23. (in Chinese))

[4] 赵玲玲,张鑫辉,刘昌明,等. 华南中小流域设计暴雨洪水同频率检验与重现水平推算[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):157-163. (Zhao Lingling, Zhang Xinhui,Liu Changming,et al. Same frequency test and recurrence level estimation of design storm flood in a small and medium-sized basin of South China[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(2):157-163. (in Chinese))

[5] 李玉荣,朱丹,甘晓雪,等. 汉江上游典型流域产流机制辨析[J]. 人民长江,2023,54(增刊1):50-53. (Li Yurong,Zhu Dan,Gan Xiaoxue,et al. Analysis of runoff mechanism in typical watersheds of the upper reaches of the Han River[J]. Yangtze River,2023,54(Sup1):50-53. (in Chinese))

[6] 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. (in Chinese))

[7] 徐磊磊,刘敬林,金昌杰,等. 水文过程的基流分割方法研究进展[J]. 应用生态学报,2011,22(11):3073-3080. (Xu Leilei,Liu Jinglin,Jin Changjie,et al. Baseflow separation methods in hydrological process research: a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2011,22(11):3073-3080. (in Chinese))

[8] 顾慰祖. 同位素水文学[M]. 北京:科学出版社,2011:199.

[9] 瞿思敏,包为民,Jeffrey J,等. 同位素示踪剂在流域水文模拟中的应用[J]. 水科学进展,2008,19(4):587-596. (Qu Simin,Bao Weimin,Jeffrey J,et al. Isotope tracer in watershed hydrological modeling[J]. Advances in Water

Science,2008,19(4):587-596. (in Chinese))

[10] 詹沪成,赵娜,陈建生. 雾水和降水的氢氧稳定同位素差异及其影响因素[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(4):10-17. (Zhan Lucheng, Zhao Na, Chen Jiansheng. Hydrogen and oxygen stable isotope difference between fog water and precipitation and influencing factors [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(4):10-17. (in Chinese))

[11] Klaus J,Mcdonnell J J. Hydrograph separation using stable isotopes:review and evaluation[J]. Journal of Hydrology,2013,505:47-64.

[12] 孙从建,周思捷,陈亚宁,等. 中亚高山区云下与地表降水氢氧稳定同位素时空分布特征及其水汽来源分析[J]. 水资源保护,2022,38(5):111-121. (Sun Congjian,Zhou Sijie, Chen Yaning, et al. Spatiotemporal distribution and water vapor sources of stable isotopes of hydrogen and oxygen in below-cloud and surface precipitation in alpine region in Central Asia[J]. Water Resources Protection,2022,38(5):111-121. (in Chinese))

[13] 郑玉慧,李小慧,白曜宇,等. 香格里拉地区温泉水化学特征及成因分析[J]. 水资源保护,2024,40(5):158-164. (Zheng Yuhui, Li Xiaohui, Bai Yaoyu, et al. Hydrochemical characteristics and genesis analysis of hot springs in Shangrila Region [J]. Water Resources Protection,2024,40(5):158-164. (in Chinese))

[14] Qu Simin,Zhou Minmin, Shi Peng, et al. Differences in oxygen-18 and deuterium content of throughfall and rainfall during different flood events in a small headwater watershed[J]. Isotopes Environ Health Stud,2014,50(1):52-61.

[15] Dudley B D, Yang J, Shankar U, et al. A method for predicting hydrogen and oxygen isotope distributions across a region's river network using reach-scale environmental attributes [J]. Hydrology and Earth System Sciences,2022,26(19):4933-4951.

[16] 王轶凡,瞿思敏,李代华,等. 小流域降雨径流氢氧同位素特征分析及其对径流分割的指示意义[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(4):365-371. (Wang Yifan, Qu Simin, Li Daihua, et al. Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in rainfall-runoff in small watershed and their implications for runoff separation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2017,45(4):365-371. (in Chinese))

[17] 陈刚,王文凤,马芬艳,等. 大兴安岭外源水补给的水量平衡与同位素证据[J]. 水资源保护,2021,37(4):75-81. (Chen Gang, Wang Wenfeng, Ma Fenyan, et al. Water balance and isotopic evidence of external water supply in Daxing' an Mountains [J]. Water Resources Protection,2021,37(4):75-81. (in Chinese))

[18] 杨丽娜,贾德彬,高瑞忠,等. 闪电河流域“三水”氢氧

- 同位素特征及水体转换分析[J]. 环境科学, 2023, 44 (7): 3855-3863. (Yang Lina, Jia Debin, Gao Ruizhong, et al. Hydrogen and oxygen isotopic characteristics and influencing factors of "three waters" in Shandian River Basin[J]. Environmental Science, 2023, 44 (7): 3855-3863. (in Chinese))
- [19] 马天文, 徐国策, 赵超志, 等. 基于氢氧稳定同位素示踪的秦岭森林小流域径流水源解析[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44 (3): 545-557. (Ma Tianwen, Xu Guoce, Zhao Chaozhi, et al. Water source analysis of runoff in Qinling forest small watershed, China based on H-O stable isotope tracing [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44 (3): 545-557. (in Chinese))
- [20] Qu Simin, Wang Yifan, Zhou Minmin, et al. Temporal (18)O and deuterium variations in hydrologic components of a small watershed during a typhoon event[J]. Isotopes Environ Health Stud, 2017, 53 (2): 172-183.
- [21] 卢小慧, 王梦瑶, 龚绪龙, 等. 基于氢氧同位素的平原湖荡地表水与地下水转化研究[J]. 水利学报, 2024, 55 (4): 416-427. (Lu Xiaohui, Wang Mengyao, Gong Xulong, et al. Hydrogen and oxygen isotope based transformation studies of surface water and groundwater in plains lakes and swamps [J]. Shuili Xuebao, 2024, 55 (4): 416-427. (in Chinese))
- [22] 许秀丽, 李云良, 高博, 等. 黄河中游汾河入黄口湿地水源组成与地表地下水转化关系[J]. 湖泊科学, 2022, 34 (1): 247-261. (Xu Xiuli, Li Yunliang, Gao Bo, et al. Composition of water sources and transformation relationship between surface water and groundwater in the Fenhe River estuarine wetland of the middle Yellow River [J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34 (1): 247-261. (in Chinese))
- [23] 左玉珠, 潘成忠, 马勇星, 等. 基于氢氧同位素示踪的黄土区不同植被类型小流域降雨-径流分割[J]. 应用生态学报, 2024, 35 (2): 399-406. (Zuo Yuzhu, Pan Chengzhong, Ma Yongxing, et al. Rainfall-runoff partitioning in small watersheds of different vegetation types in the loess area based on hydrogen and oxygen isotope tracing [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35 (2): 399-406. (in Chinese))
- [24] Liu Haowen, Zhang Jianyun, Liao Aimin, et al. Estimation of variability in soil water content in a forested critical-zone experimental catchment in Eastern China[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2022, 248: 104022.
- [25] 张志才, 陈喜, 程勤波, 等. 流域示踪水文模型研究综述[J]. 水文, 2020, 40 (6): 1-9. (Zhang Zhicai, Chen Xi, Cheng Qinbo, et al. Catchment-scale tracer-aided hydrological modelling: a review [J]. Journal of China Hydrology, 2020, 40 (6): 1-9. (in Chinese))
- [26] 廖爱民, 李薛刚, 刘九夫, 等. 花山流域河水同位素年内变化及采样方案优化[J]. 水科学进展, 2023, 34 (6): 887-900. (Liao Aimin, Li Xuegang, Liu Jiufu, et al. Annual variation in hydrogen and oxygen isotopes of river water in the Huashan Watershed and sampling scheme optimization [J]. Advances in Water Science, 2023, 34 (6): 887-900. (in Chinese))
- [27] 刘俊杰, 高峰, 刘翠善, 等. 基于集对分析的清流河流域蓝绿水分类分析[J]. 水资源保护, 2024, 40 (5): 95-103. (Liu Junjie, Gao Feng, Liu Cuishan, et al. Classification analysis of blue and green water based on set pair analysis in the Qingliu River Basin [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (5): 95-103. (in Chinese))
- [28] Zhang Haixia, Levina D F, He Bin, et al. Interspecific variation in tree- and stand-scale stemflow funneling ratios in a subtropical deciduous forest in Eastern China[J]. Journal of Hydrology, 2020, 590: 125455.
- [29] Zhang Haixia, Wu Huawu, Li Jing, et al. Spatial-temporal variability of throughfall in a subtropical deciduous forest from the hilly regions of Eastern China [J]. Journal of Mountain Science, 2019, 16 (8): 1788-1801.
- [30] 顾慰祖, 尚曼廷, 翟劭焱, 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 Shaoyi, et al. Rainfall-runoff paradox from a natural experimental catchment [J]. Advances in Water Science, 2010, 21 (4): 471-478. (in Chinese))
- [31] Burns D A, McDonnell J J, Hooper R P, et al. Quantifying contributions to storm runoff through end-member mixing analysis and hydrologic measurements at the Panola Mountain Research Watershed (Georgia, USA) [J]. Hydrological Processes, 2001, 15 (10): 1903-1924.
- [32] Genereux D. Quantifying uncertainty in tracer-based hydrograph separation [J]. Water Resources Research, 1998, 34 (4): 915-919.

(收稿日期: 2025-03-11 编辑: 胡新宇)

