

降水强度对定海土壤饱和度、地表径流的定量影响

邵思学, 金琬贻, 朱丹丹, 罗静静

舟山市定海区气象局, 浙江 舟山

收稿日期: 2026年4月11日; 录用日期: 2026年5月11日; 发布日期: 2026年5月20日

摘要

通过处理分析定海区2023年1月至2024年12月的日尺度土壤墒情(10 cm、20 cm、30 cm、40 cm深度)、降水量及城北水库水位,引入水库集雨面积和水面面积将水位变化转换为径流深,系统分析了降水强度、土壤饱和度与地表径流之间的定量关系。结果表明:(1) 表层土壤(10~20 cm)饱和度与径流深的相关性最高,深层土壤(30~40 cm)响应存在1~2天滞后;(2) 季节性差异显著:春季表层主导(10 cm),夏季中层影响突出(20 cm),冬季表层与深层同步(10 cm与40 cm);(3) 基于168次产流事件的多元线性回归分析,得到最优关系式为:径流深 = 四日前降水量 \times 0.40 + 土壤饱和度 \times 0.15 - 0.77,其中土壤饱和度高度显著($p < 0.001$),四日前降水量为正但边际显著($p = 0.182$),表明径流主要受土壤饱和度控制,降水的影响存在约4天的滞后;(4) 典型事件分析验证了土壤饱和度的决定性作用:2024年5月13日4.37 mm降水在土壤饱和度高达40.9%时产生10.67 mm径流,而2023年11月27日101.5 mm降水因土壤饱和度仅1.7%未产流。研究成果可为定海城区洪涝预警、水库调度提供科学依据。

关键词

降水强度, 土壤饱和度, 径流深, 滞后效应, 回归模型, 定海区

Quantitative Impact of Precipitation Intensity on Soil Saturation and Surface Runoff in Dinghai

Sixue Shao, Wanyi Jin, Dandan Zhu, Jingjing Luo

Dinghai Meteorological Bureau of Zhoushan, Zhoushan Zhejiang

Received: April 11, 2026; accepted: May 11, 2026; published: May 20, 2026

Abstract

Through processing and analysis of daily-scale soil moisture data (at depths of 10 cm, 20 cm, 30 cm, and 40 cm), precipitation records, and water level data of the Chengbei Reservoir in the Dinghai District from January 2023 to December 2024, this study quantitatively investigated the relationships among precipitation intensity, soil saturation, and surface runoff. By introducing the reservoir's catchment area and water surface area, water level fluctuations were converted into runoff depth. The results indicate that: (1) The correlation between surface soil saturation (10~20 cm) and runoff depth is the highest, while the response of deeper soil layers (30~40 cm) exhibits a lag of 1~2 days. (2) Significant seasonal differences were observed: the surface layer (10 cm) dominates in spring, the middle layer (20 cm) has a prominent influence in summer, and the surface and deep layers (10 cm and 40 cm) show synchronized effects in winter. (3) Multiple linear regression analysis based on 168 runoff-generating events yielded the optimal relationship: $\text{Runoff Depth} = (\text{Precipitation from four days prior}) \times 0.40 + (\text{Soil Saturation}) \times 0.15 - 0.77$. In this equation, soil saturation is highly significant ($p < 0.001$), while precipitation from four days prior is positive but marginally significant ($p = 0.182$), indicating that runoff is primarily controlled by soil saturation, with the influence of precipitation exhibiting a lag of approximately 4 days. (4) Typical event analysis validated the decisive role of soil saturation: a 4.37 mm rainfall event on May 13, 2024, generated 10.67 mm of runoff when soil saturation was as high as 40.9%, whereas a 101.5 mm rainfall event on November 27, 2023, produced no runoff due to soil saturation being only 1.7%. The research findings can provide a scientific basis for flood early warning and reservoir operation in the Dinghai urban area.

Keywords

Precipitation Intensity, Soil Saturation, Runoff Depth, Lag Effect, Regression Model, Dinghai District

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

舟山市定海区地处东海之滨，三面环山、一面临海，属亚热带海洋性季风气候，夏秋季节多受热带气旋影响，时遭台汛之患。定海城区处于地势较低区域，且土质多为砂土，径流系数大，土壤保水能力差。特殊的地理位置和气候条件，使该区域降水时空分布不均，旱涝灾害频繁交替发生。近年来，为解洪涝之患，定海区一体推进五山水利重点工程，并在此基础上开展“降水强度对定海土壤饱和度、地表径流的定量影响”研究，为城区防涝和科学调度水资源提供技术支撑[1] [2]。

地表径流的形成通常有两种主要机制：一是超渗产流，即降水强度超过土壤入渗能力，多余降水直接形成径流；二是蓄满产流，即土壤达到饱和后，后续降水几乎全部转化为径流。前者主要受小时雨强控制，后者则与前期土壤饱和度密切相关。本研究重点针对第二种机制，利用日尺度数据定量分析土壤饱和度与径流的关系。

通过利用定海区 2023~2024 年的日尺度土壤墒情(10 cm、20 cm、30 cm、40 cm 四个深度)、城北水库水位和日降水数据，引入集雨面积和水面面积计算径流深，通过系统分析三者间的统计关系和过程响应，旨在解决：(1) 不同深度土壤饱和度对径流变化的响应速度和贡献权重如何？(2) 在土壤饱和条件下，径流与降水量、土壤饱和度之间存在怎样的定量关系？(3) 能否建立可操作的预警方程？研究成果将为

定海区“台风智防”数字化应用系统建设提供关键参数支撑。

2. 数据与方法

2.1. 定海区概况

定海区地处欧亚大陆与西北太平洋过渡地带,海域属于内侧性半封闭海域。定海区常年降水量 1472.5 毫米(mm)。土壤类型以红壤和粗骨土为主,其中红壤土类主要分布海岛丘陵中部以下至山麓缓坡,土体较深厚,可达 1 米以上;粗骨土类主要分布低丘中上坡,土层浅薄,厚度一般不足 30 厘米。城北水库为定海城区水库,集雨面积 4.98 平方千米,最大水面面积为 16 万平方米,总库容 122.95 万立方米,主要用于防洪和供水[3]-[5]。

2.2. 数据来源与预处理

本研究使用三类时间序列数据:

(1) 土壤饱和度:来源于定海国家基本气象站中的土壤水分监测站数据,时间范围为 2023 年 1 月 1 日至 2024 年 12 月 31 日,每日 08 时记录 10 cm、20 cm、30 cm、40 cm 四个深度的土壤体积含水量(%),作为土壤饱和度的直接度量。原始数据中连续出现的 0 值被视为设备故障或数据异常,予以剔除处理,并用前向填充补充短期缺失。

(2) 水库水位数据:来源于城北水库逐日水位记录(单位:m),水位变化量 $\Delta W = \text{当日水位} - \text{前一日水位}$ 。

(3) 降水量:来源于定海国家基本气象站中的雨量资料。强降水事件定义为日降水量 ≥ 30 mm 的事件。

(4) 径流深计算:对于水库而言,一定时段内的水量平衡方程可表示为:入库水量 - 出库水量 = 库容变化量,在无人工调节的天然情况下,入库水量主要来自集雨面积上的产流,出库水量包括蒸发、渗漏和泄流。考虑研究时段缩小到日尺度,因研究侧重降雨情况下,故不考虑蒸发情况。得到:

$$\text{径流深} = \frac{\Delta W \times \text{水面面积}}{\text{集雨面积}} \times 1000, \text{单位: mm.}$$

2.3. 分析方法

(1) 描述性统计:计算各深度土壤饱和度和径流深的均值、标准差,绘制综合时间序列图。

(2) 滞后相关分析:计算径流深与各深度土壤饱和度、降水量在不同滞后天数(0~3 天)下的皮尔逊相关系数,识别关键响应深度和响应时间。

(3) 季节性分析:按气象季节划分标准,将数据分为春季(3~5 月)、夏季(6~8 月)、秋季(9~11 月)、冬季(12~2 月),分别计算各季节不同深度土壤饱和度与径流深的相关性。

(4) 事件过程分析:选取典型强降水事件(日降水量 ≥ 30 mm 或具有特殊意义的较小降水事件),绘制事件前后 7 天的土壤饱和度和径流深变化过程线,分析响应特征。

(5) 回归建模:针对产流事件(径流深 > 0),采用多元线性回归和 LASSO 变量选择方法,建立径流深与降水量、20 cm 土壤饱和度及其滞后项的定量关系。通过比较多个候选模型,最终选择物理意义明确且统计性能较优的模型。

3. 结果分析

3.1. 土壤饱和度与径流深总体特征

研究期间土壤饱和度与径流深统计如表 1 所示。40 cm 深度平均饱和度最高(31.3%),且变异最小(标

准差 7.5%)，表明深层土壤水分相对稳定；20 cm 深度平均饱和度最低(18.3%)，变异最大(15.3%)，反映表层受降水影响剧烈。径流深均值仅 0.12 mm，主要由于水位下降(负值)占比较多，实际产流事件有限。

Table 1. Statistics of soil saturation and runoff depth
表 1. 土壤饱和度与径流深统计

变量	均值	标准差
10 cm 土壤饱和度(%)	22.6	9.1
20 cm 土壤饱和度(%)	18.3	15.3
30 cm 土壤饱和度(%)	27.6	12.4
40 cm 土壤饱和度(%)	31.3	7.5
径流深(mm)	0.12	4.32

图 1 为 2023~2024 年日降水量、径流深、表层(10 cm, 20 cm)和深层(30 cm, 40 cm)土壤饱和度的综合时间序列。可见降水事件后径流深和表层土壤饱和度同步上升，但径流深正值多出现在降水当日或次日，且与前期土壤饱和度水平密切相关。例如 2024 年春季多次径流深峰值对应 20 cm 饱和度 > 30%，而 2023 年 11 月 27 日 101.5 mm 强降水因土壤干燥未产生显著径流。



Figure 1. Comprehensive time series diagram
图 1. 综合时间序列图

3.2. 滞后相关分析

计算径流深与各变量在不同滞后天数的相关系数，结果如图 2 所示。

20 cm 土壤饱和度与径流深的即时相关性最高($r = 0.21$)，其次为 10 cm ($r = 0.20$)，而深层(30~40 cm)相关性极弱($r < 0.08$)。降水量与径流深呈微弱负相关($r \approx -0.04$)，反映降水当日雨水尚未完全转化为径流。滞后 1~2 天后，表层相关系数迅速衰减，深层则保持平稳，表明深层响应存在 1~2 天延迟。

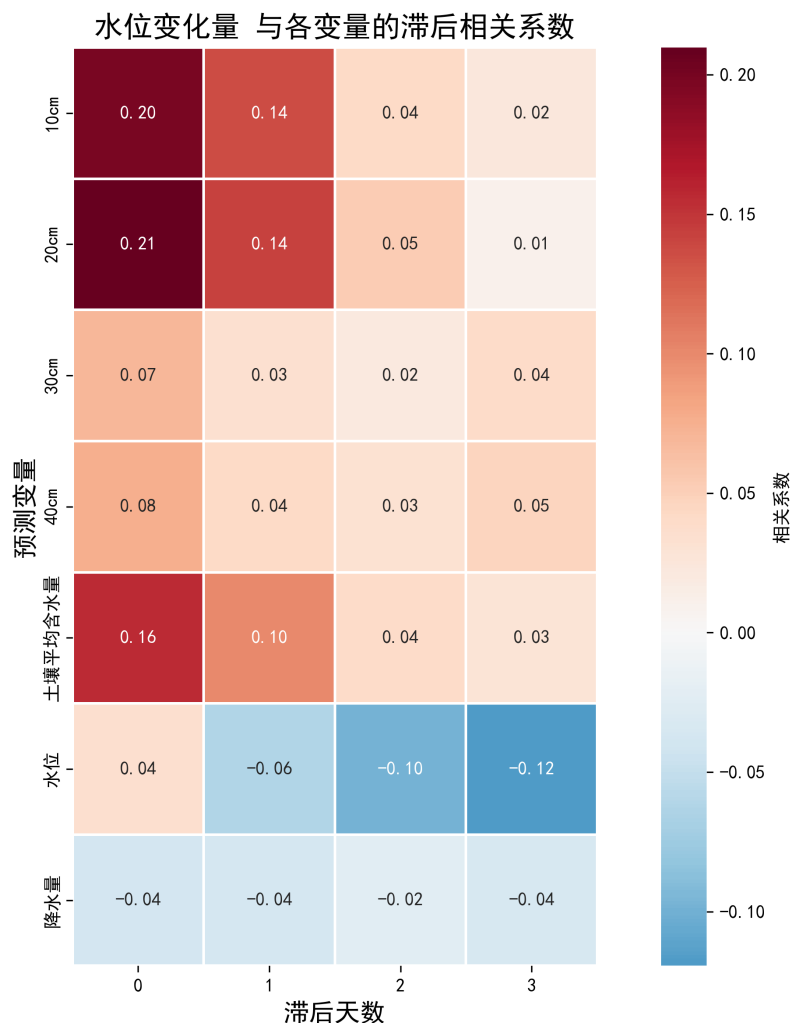


Figure 2. Lag correlation coefficient heatmap

图 2. 滞后相关系数热力图

3.3. 季节性规律

不同季节土壤饱和度与径流深的相关性存在显著差异(图 3)。春季(3~5 月): 10 cm 表层相关性最高(0.50), 20 cm 也达 0.42, 可能与春季融雪、解冻、土壤水分活跃有关。夏季(6~8 月): 10 cm 相关性骤降至-0.04, 而 20 cm 仍保持 0.42, 30 cm 为 0.21, 表明夏季高温蒸发使表层水分波动剧烈, 中层更能稳定反映径流潜力。秋季(9~11 月): 各深度相关性普遍下降, 10 cm 为 0.33, 20 cm 为 0.28。冬季(12~2 月): 呈现“两极高”模式, 10 cm 和 40 cm 分别达 0.47 和 0.48, 可能因冻土阻隔, 径流依赖表层融雪和深层前期储水。

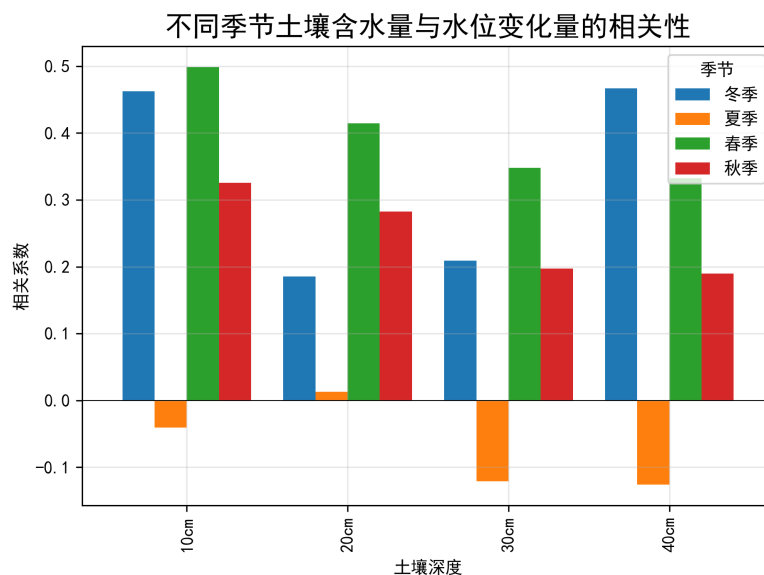


Figure 3. Seasonal correlation diagram
图 3. 季节性相关性图

3.4. 典型事件分析

3.4.1. 春季事件：2024 年 5 月 13 日

2024 年 5 月 13 日是一个揭示土壤饱和度对径流放大作用的典型案例。该日降水量仅 4.37 mm，但前期 20 cm 土壤饱和度高达 40.9% (表 2)，土壤剖面接近饱和。径流深达 10.67 mm，对应水库水位上涨 0.32 m，径流系数(径流深/降水量)高达 2.44，即径流深超过降水量。这一现象表明土壤在降雨前已蓄积大量水分，土壤饱和度较高，降水触发壤中流或浅层地下径流的快速释放，使得径流总量包含前期储存在土壤中的水分。

Table 2. Changes in key variables around May 13, 2024

表 2. 2024 年 5 月 13 日前后关键变量变化

日期	降水量(mm)	径流深(mm)	10 cm 土壤饱和度(%)	20 cm 土壤饱和度(%)	30 cm 土壤饱和度(%)	40 cm 土壤饱和度(%)
2024.5.12	0.00	0.00	36.8	40.7	35.4	36.6
2024.5.13	4.37	10.67	37.5	40.9	35.7	36.6
2024.5.14	0.00	0.00	28.4	40.8	35.5	36.4

3.4.2. 夏季事件：2024 年 6 月 12 日

Table 3. Changes in key variables around June 12, 2024

表 3. 2024 年 6 月 12 日前后关键变量变化

日期	降水量(mm)	径流深(mm)	10 cm 土壤饱和度(%)	20 cm 土壤饱和度(%)	30 cm 土壤饱和度(%)	40 cm 土壤饱和度(%)
2024.6.11	0.00	-2.67	36.3	40.9	37.0	36.7
2024.6.12	35.9	12.33	36.8	40.9	37.0	36.7
2024.6.13	0.00	0.00	36.7	40.8	36.9	36.7

2024年6月12日事件(表3)降水量35.9 mm,前期20 cm土壤饱和度同样高达40.9%,径流深12.33 mm,径流系数0.34。与春季事件相比,降水量增加约8倍,径流深相近,但径流系数显著降低,反映夏季蒸发旺盛、土壤初始饱和但降水过程中可能存在部分入渗或蒸发损失。

3.4.3. 干燥事件：2023年11月27日

作为对比,2023年11月27日降水量高达101.5 mm,但前期20 cm土壤饱和度仅1.7%(极端干燥),径流深为0(表4)。这一事件鲜明地展示了土壤干燥条件下,即使强降水也难以产流。

Table 4. Changes in key variables around November 27, 2023

表4. 2023年11月27日前后关键变量变化

日期	降水量(mm)	径流深(mm)	20 cm 土壤饱和度(%)
2023.11.26	0.00	0.00	1.7
2023.11.27	101.5	0.00	1.7
2023.11.28	0.00	0.33	1.7

3.5. 定量关系模型

3.5.1. 候选模型比较

为建立径流深与降水量、土壤饱和度的定量关系,我们对产流事件(径流深 > 0)进行了多种模型尝试,包括线性回归、引入二次项、交互项以及 LASSO 变量选择。主要候选模型结果如表5所示。

Table 5. Comparison of candidate models

表5. 候选模型比较

模型	变量	R ²	AIC	降水系数符号	备注
A	20 cm 饱和度平方项	0.254	965.3	无	平方项显著
B	20 cm 饱和度、四日前降水量	0.335	928.5	正	四日前降水 p = 0.182
C	20 cm 饱和度、当日降水量	0.227	958.6	负	与常理不符
D	20 cm 饱和度平方、前三日累计、前七日累计	0.306	942.4	一负一正	符号冲突

模型B(含20 cm土壤饱和度和四日前降水量)具有最高的R²(0.335)和最低的AIC(928.5),且所有系数符号符合物理预期:土壤饱和度系数为正且高度显著(p < 0.001),四日前降水量系数为正(p = 0.182)。尽管四日前降水量的p值略高于0.05,但考虑到样本量有限以及其正向贡献,该模型具有实际意义。

3.5.2. 回归方程

基于168次产流事件的回归方程模型为:

$$\text{径流值} = \text{四日前降水量} \times 0.40 + \text{土壤饱和度} \times 0.15 - 0.77$$

模型诊断: R² = 0.335, 调整 R² = 0.327, F 统计量 18.27 (p = 6.78 × 10⁻⁸)。20 cm 土壤饱和度的系数为 0.15 (95% 置信区间: 0.10~0.20), 表明土壤饱和度每增加 1%, 径流深平均增加 0.15 mm。四日前降水量的系数为 0.40 (95% 置信区间: -0.19~0.98), 意味着 4 天前的降水每增加 1 mm, 当前径流深增加约 0.40 mm, 但该效应统计上为边缘显著。如图 4 所示, 模型 B 的实测值与预测值对比显示预测值与实测值基本吻合, 但高值区存在一定偏差, 可能与极端事件较少有关。

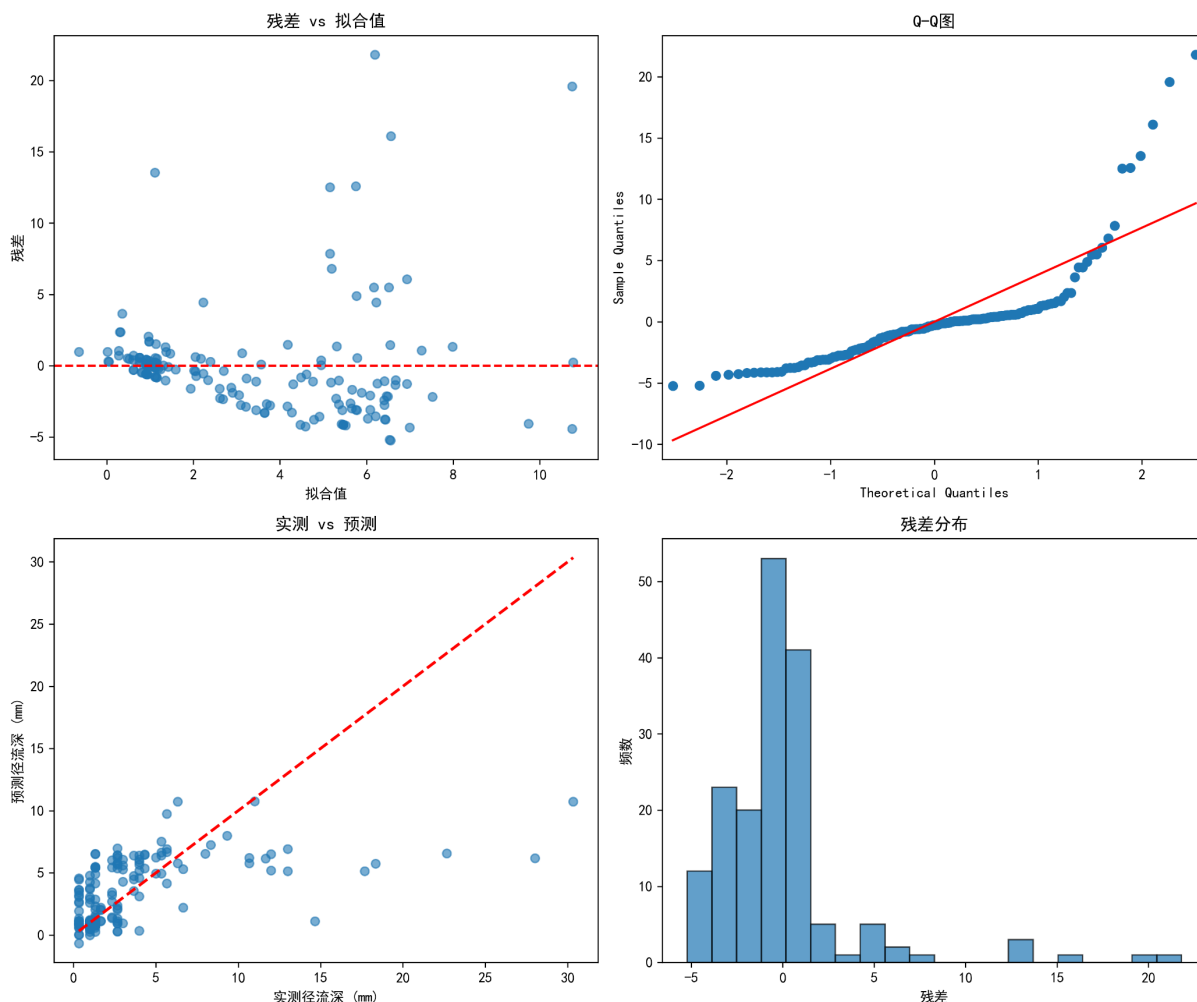


Figure 4. Comparison of observed and predicted values for Model B

图 4. 模型 B 的实测值与预测值对比

3.6. 讨论

3.6.1. 土壤饱和度的主导作用

在所有模型中, 20 cm 土壤饱和度(或其平方项)始终显著为正, 证实了其在产流过程中的核心地位。典型事件分析也表明, 即使降水量很小, 只要土壤饱和, 也能产生显著径流。这一发现与蓄满产流理论一致: 当土壤含水量超过田间持水量后, 后续降水几乎全部转化为径流。

3.6.2. 降水的滞后效应

LASSO 变量选择和模型 B 均揭示了降水对径流的影响存在约 4 天的滞后。这可能是由于降水入渗后需要一定时间转化为壤中流或地下径流, 最终汇入水库。4 天的滞后时间与定海区流域的汇流特征相符。尽管四日前降水量的统计显著性稍弱, 但其物理意义明确, 应予保留。

3.6.3. 与其他研究的对比

本研究的径流系数(约 0.34~2.44)与永定河流域[6]的产流阈值研究结果一致, 即前期土壤饱和度对产流起决定性作用。与文家沟泥石流预警雨量阈值[7]相比, 本研究提出的滞后降水效应为预警提供了更精细的时间尺度。

3.6.4. 不确定性讨论

本研究的回归模型基于 168 次产流事件，样本量有限，导致四日前降水量的置信区间较宽。此外，日尺度数据无法捕捉短时强降水的影响，可能低估超渗产流。未来应引入小时降水数据和蒸发资料，并采用机器学习方法改进预测。

4. 结论

本研究基于定海区 2023~2024 年水文数据，系统分析了降水强度、土壤饱和度与地表径流之间的定量关系，得出以下主要结论：

(1) 关键响应深度：20 cm 土壤饱和度与径流深的相关性最高($r = 0.21$)，是径流预报的最佳指标；深层土壤(30~40 cm)响应存在 1~2 天滞后，但相关性较弱。

(2) 季节性规律：春季表层主导(10 cm $r = 0.50$)，夏季中层贡献突出(20 cm $r = 0.42$)，冬季表层与深层同步(10 cm 与 40 cm $r \approx 0.48$)。

(3) 定量关系式：基于 168 次产流事件的最优回归模型为：

$$\text{径流值} = \text{四日前降水量} \times 0.40 + \text{土壤饱和度} \times 0.15 - 0.77$$

模型 $R^2 = 0.335$ ，代表径流深变化的 33.5% 可由土壤饱和度和四日前降解释释。

(4) 典型事件验证：2024 年 5 月 13 日事件(降水量 4.37 mm，土壤饱和度 40.9%，径流深 10.67 mm)与 2024 年 6 月 12 日事件(降水量 35.9 mm，土壤饱和度 40.9%，径流深 12.33 mm)均符合土壤饱和度主导的规律，而 2023 年 11 月 27 日干燥事件(土壤饱和度 1.7%)即使降水量 101.5 mm 也未产流，验证了土壤饱和度的决定性作用。

(5) 应用价值：研究成果可直接支撑定海区“台风智防”数字化系统建设，建议将 20 cm 土壤饱和度和四日前降水量纳入预警指标体系，并结合阈值进行分级预警。

本研究首次量化了定海区降水强度 - 土壤饱和度 - 地表径流三者的定量关系，为该区域城市洪涝防治和水资源科学调度提供了关键参数支撑。后续研究应进一步结合小时降水数据和物理水文模型，提高预测精度。

参考文献

- [1] 金琬贻. 定海: 量体裁衣助力开发气候旅游资源[N]. 中国气象报, 2024-07-16(1).
- [2] 舟山市定海区气象局. 舟山市定海区气象局 2023 年工作计划[EB/OL]. 定海区人民政府. https://www.dinghai.gov.cn/art/2024/1/18/art_1229318449_3840694.html, 2024-01-18.
- [3] 定海区志编纂委员会. 舟山市定海区志·第二编 环境与资源[M]. 杭州: 浙江人民出版社, 2016.
- [4] 宋亚民. 舟山群岛水文特性[J]. 水文, 2001, 21(6): 59-62.
- [5] OSGeo 中国. 我国舟山群岛的水文特征[EB/OL]. <https://osgeo.cn/post/90b31/>, 2016-10-24.
- [6] 薛志春, 等. 永定河典型流域产流阈值研究[J]. 水利学报, 2024, 60(5): 1.
- [7] 陈方吾, 等. 文家沟泥石流预警雨量阈值研究[J]. 山地学报, 2018(4): 1.