

极端降水事件下地表径流与污染物迁移规律的耦合模拟分析

赵鹏飞

新疆维吾尔自治区水利水电科学研究院 新疆 乌鲁木齐 830002

摘要: 在全球气候变化背景下,我国西北干旱区极端降水事件呈现“频率低但强度高、局地性强、突发性显著”的新特征。新疆作为典型干旱区,城市化进程中地表硬化与生态脆弱性叠加,使得短时强降雨极易引发山洪、内涝及非点源污染复合风险。本文以新疆乌鲁木齐市城郊过渡带为研究区,构建基于SWMM(Storm Water Management Model)与改进污染物迁移模块的耦合模拟框架,重点考虑干旱区特有的低前期土壤含水量、高蒸发率、稀疏植被覆盖及人为污染物累积特征。选取2年、10年、20年和50年重现期短历时暴雨情景,模拟地表径流形成过程及典型污染物(悬浮物SS、化学需氧量COD、总氮TN)的冲刷迁移规律。结果表明:(1)干旱区极端降水产流效率极高,50年一遇暴雨下径流系数可达0.68,远高于湿润区同等强度降雨;(2)污染物初期冲刷效应显著,前期干旱期越长(>15天),冲刷负荷越高,SS初期30分钟负荷占比达65%~78%;(3)由于地表裸露率高、植被拦截弱,颗粒态污染物迁移速率快,SS浓度峰值与径流峰值基本同步,滞后时间<10分钟;(4)耦合模型有效揭示了“低累积-高冲刷”矛盾现象:尽管年均污染物累积量低于湿润城市,但单位降雨冲刷效率高出2~3倍;(5)情景模拟显示,布设透水铺装与植草沟可削减峰值径流35%~52%,同步降低SS与TN负荷40%以上。本研究为干旱区城市应对极端降水引发的水安全与生态风险提供科学依据,对“一带一路”沿线干旱城市韧性建设具有参考价值。

关键词: 极端降水; 干旱区; 地表径流; 非点源污染; 耦合模拟; SWMM

引言

传统认知中,干旱区降水稀少、蒸发强烈,水文过程以“入渗主导、产流微弱”为特征。然而,近年来观测数据表明,受西风带异常与中亚水汽输送增强影响,新疆等西北干旱区极端降水事件显著增多。据新疆气象局统计,2000~2023年,乌鲁木齐、伊犁、哈密等地 $\geq 20\text{mm/h}$ 的短时强降雨频次年均增长8.3%,2022年乌鲁木齐“7·25”特大暴雨单小时雨量达42.1mm,打破历史极值,造成严重城市内涝与交通瘫痪。

干旱区城市具有独特水文-生态-人为耦合特征:(1)年均降水量 $< 300\text{mm}$,但暴雨强度大、历时短;(2)土壤前期含水量极低,下渗能力看似强,但遇高强度降雨时表层迅速饱和甚至形成结皮,反而加剧超渗产流;(3)地表植被稀疏,裸土与硬化地表占比高,抗冲刷能力弱;(4)冬季漫长,春季融雪与沙尘沉降导致地表污染物(如粉尘、融雪剂残留、机动车尾气颗粒)累积显著^[1]。这些因素共同导致干旱区在极端降水下表现出“低频高损、小雨无事、大雨成灾”的水文响应模式。

现有城市水文模型多基于湿润或半湿润地区开发,对干旱区低累积-高冲刷机制、强蒸发-弱下渗动态、沙尘型污染物迁移等过程刻画不足。因此,亟需构建适用

于干旱区的径流-污染耦合模拟体系,揭示极端降水下“水-沙-污”协同演变规律。

本文以新疆乌鲁木齐市典型城郊区域为对象,改进SWMM模型参数化方案,引入干旱区特有过程模块,系统模拟不同强度极端降水事件下地表径流与污染物(SS、COD、TN)的时空动态,评估绿色基础设施适应性效能,为干旱区城市水系统韧性提升提供技术支撑。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区域概况

研究区位于乌鲁木齐市米东区南部,面积约6.8km²,属典型城郊过渡带。该区域北靠博格达山前冲洪积扇,南接主城区,地势北高南低,平均坡度2.5%。气候为中温带大陆性干旱气候,年均降水量约290mm,年蒸发量 $> 2000\text{mm}$,无霜期150~180天。土地利用以工业仓储(35%)、城乡结合部住宅(30%)、裸地与荒草地(20%)、道路(10%)及少量防护林(5%)为主。不透水面积率(IAR)为58%,低于南方城市,但裸露地表比例高,易受风蚀水蚀。区域内排水系统不完善,部分区域依赖自然沟道排洪,合流制管网老化严重。春季沙尘频发,冬季使用融雪剂,地表污染物以粉尘、盐分、有机碎屑及交通源污染物为主。

1.2 数据收集与处理

气象数据：收集乌鲁木齐国家基准气候站2010–2024年逐小时降水数据，识别出5场典型短历时强降水事件^[2]。基于《新疆暴雨强度公式》设计2年、10年、20年、50年重现期暴雨，历时60分钟，采用芝加哥雨型。

下垫面数据：利用Sentinel-2遥感影像（10m分辨率）与实地勘测，提取土地利用、植被覆盖度（NDVI）、地表粗糙度、洼蓄量（干旱区取值0.5–1.5mm）、Manning' sn值（裸地取0.02，硬化地表取0.013）。

土壤与水文参数：通过现场入渗试验（双环法）测定不同地类饱和导水率（Ks），裸地Ks = 8mm/h，硬化地表Ks ≈ 0。

污染物数据：2022–2023年汛期采集6场降雨径流样品（采样点位于3个主要排洪沟出口），测定SS、COD、TN浓度。干期地表污染物累积量通过沉降皿与刮取法估算。

2 模型构建与方法

2.1 干旱区耦合模型框架

在SWMM5.2基础上，针对干旱区特性进行以下改进：

2.1.1 动态产流模块：

引入“初始损失-超渗产流”混合机制。考虑前期干旱导致土壤裂缝闭合滞后，设定初始下渗能力随前期无雨天数指数衰减：

$$f_0(t) = f_{\max} e^{-\lambda t_d}$$

其中， f_0 为初始下渗率， t_d 为前期干旱天数， λ 为衰减系数（率定为 $0.12d^{-1}$ ）。

2.1.2 污染物累积模块：

区分自然沉降（沙尘）与人为源（交通、工业）。累积函数考虑风速与干旱天数：

$$B(t_d) = a + b \cdot t_d + c \cdot \sum_{i=1}^n W_i$$

其中， W_i 为第*i*日平均风速，反映沙尘沉降贡献。

2.1.3 冲刷模块改进：

采用幂函数冲刷模型，但冲刷系数 C_1 与地表类型强相关。裸地冲刷系数为硬化地表的1.8倍，反映其易蚀性。

2.1.4 污染物组分设定：

SS：主要为沙尘颗粒（粒径10–100 μ m），占比高；

COD：40%为溶解态（融雪剂残留、有机碎屑），60%吸附于SS；

TN：以硝酸盐为主（来自融雪剂与大气沉降），80%为溶解态。

2.1.5 蒸发与干期损失：

在干期模拟中加入日蒸发损失，减少可冲刷污染物量，更符合干旱区实际。

2.2 模型率定与验证

利用2022年8月一场20年一遇暴雨（实测峰值流量 $8.7m^3/s$ ，SS峰值浓度 $420mg/L$ ）进行率定。采用SCE-UA优化算法自动率定关键参数。验证采用2023年6月10年一遇暴雨事件。率定后模型对径流NSE = 0.85，SS浓度NSE = 0.81，TN浓度NSE = 0.78，满足应用要求。

3 结果与分析

3.1 干旱区极端降水的产流特征

模拟显示，干旱区产流对降雨强度极为敏感（表1）。50年一遇暴雨（60分钟雨量 $68.3mm$ ）下，径流系数达0.68，而2年一遇（ $32.1mm$ ）仅为0.31。值得注意的是，即使2年暴雨，因前期土壤干燥，初期30分钟内即产生显著径流，洪峰形成时间仅25分钟，远快于湿润区。

表1：干旱区不同重现期暴雨产流特征

重现期（年）	总雨量（mm）	峰值流量（ m^3/s ）	径流系数	洪峰时间（min）
2	32.1	3.2	0.31	32
10	45.6	5.8	0.48	28
20	56.2	7.9	0.61	26
50	68.3	10.5	0.68	24

裸地与道路区域成为主要产流源，合计贡献率超80%，凸显干旱区“局部高产流”特征。

3.2 污染物迁移规律

3.2.1 初期冲刷效应显著

所有情景均呈现强初期冲刷。50年暴雨下，前30分钟冲刷的SS占总负荷78%，TN占65%。前期干旱30天后的暴雨，SS初期负荷是干旱7天后的2.6倍，表明干旱累积效应突出。

3.2.2 污染物响应迅速

与湿润区不同，SS浓度峰值与径流峰值高度同步（滞后 < 10分钟），因裸露地表无植被缓冲，冲刷-输移过程几乎瞬时完成。TN因以溶解态为主，峰值略滞后（10–15分钟），但仍快于湿润区。

3.2.3 单位冲刷效率高

尽管年均污染物累积量仅为南方城市的40%–60%，但单位降雨冲刷效率（ $kg/mm \cdot ha$ ）高出2–3倍。例如，50年暴雨下，SS冲刷效率达 $18.7kg/mm \cdot ha$ ，而南方城市同类事件约为 $7.2kg/mm \cdot ha$ 。

3.3 “低累积-高冲刷”机制解析

干旱区污染物迁移呈现“低基数、高效率”特征，其机制包括：（1）地表裸露：缺乏植被与枯落物层，雨水直接冲击地表颗粒；（2）颗粒松散：沙尘颗粒间粘结力弱，易被水流剥离；（3）高流速：坡度较大+低洼蓄，地

表流速快, 输移能力强; (4) 污染物亲水性弱: 沙尘颗粒疏水, 不易被前期小雨清除, 累积至强降雨时集中释放^[3]。

4 适应性绿色基础设施情景模拟

设计三种情景评估LID措施在干旱区的适用性:

情景A: 现状(无LID)

情景B: 在道路与工业区布设透水铺装(覆盖20%不透水区)

情景C: 在B基础上, 沿排洪沟布设植草沟(长度3.2km)

模拟50年暴雨, 结果见表2:

表2: LID情景调控效果对比

情景	峰值流量 (m ³ /s)	削减率 (%)	SS负荷 (kg)	削减率 (%)	TN负荷 (kg)	削减率 (%)
A	10.5	—	3,850	—	128	—
B	7.6	27.6	2,620	32.0	95	25.8
C	5.1	51.4	2,100	45.5	72	43.8

植草沟在干旱区表现出优异性能: 不仅滞蓄径流, 其耐旱植被(如怪柳、骆驼刺)根系固土能力强, 对SS截留率达60%以上。透水铺装春季融雪期还可减少融雪剂径流污染。

5 讨论

5.1 干旱区水文-污染过程特殊性

本研究深入揭示了干旱区在极端降水情境下独特的水文响应与污染物迁移规律。干旱区极端降水带来的水文响应呈现出“快、强、集中”的显著特征, 这意味着降水迅速引发径流, 且径流强度高、集中于短时间内。与之对应, 污染物迁移也展现出“高冲刷效率、弱滞后性、强初期效应”的特点, 即污染物能快速被径流冲刷, 几乎无滞后, 且初期冲刷的污染物量占比极高。反观湿润区, 其水文响应“慢响应、强滞后、中等初期冲刷”, 与干旱区形成强烈反差^[4]。这一鲜明对比充分表明, 在进行相关研究与模型构建时, 模型参数必须依据干旱区的独特特性进行区域化调整, 否则难以准确模拟和预测干旱区的水文-污染过程。

5.2 融雪剂与沙尘的复合污染风险

在新疆城市, 冬季为应对积雪, 大量使用氯盐类融雪剂。而春季, 沙尘沉降现象频繁, 沙尘中携带重金属与硝酸盐等污染物。当遭遇暴雨时, 融雪剂残留与沙尘携带的污染物在暴雨冲刷下协同作用, 极有可能对受纳水体造成盐度与氮污染的双重冲击。尽管本研究尚未对重金属污染进行量化分析, 但总氮(TN)的检测结果已明确提示了这种复合污染风险的存在, 需引起高度重视。

5.3 管理建议

针对干旱区面临的水文-污染问题, 提出以下管理建议。其一, 建立“干旱区暴雨预警-响应”机制, 依据前期干旱天数及天气预报信息, 提前预判冲刷风险, 以便及时采取应对措施。其二, 优先在裸地与工业区实施硬化替代措施, 如铺设砾石覆盖、建设防风林带等, 减少地表

径流对污染物的冲刷。其三, 推广耐旱型低影响开发(LID)设施, 选用本地耐旱植物, 既适应干旱环境, 又能降低后期维护成本。其四, 加强排洪沟生态化改造, 使其兼具行洪与净化功能, 有效减轻污染物对水体的影响。

6 结论

本文针对新疆干旱区极端降水事件, 构建了考虑区域特殊性的地表径流-污染物迁移耦合模型, 得出以下结论: 干旱区极端降水产流效率高, 50年一遇暴雨径流系数达0.68, 洪峰形成快(<30分钟), 裸地与道路是主要产流源。污染物迁移呈现“低累积-高冲刷”特征, 单位降雨冲刷效率为湿润区的2-3倍, 初期30分钟冲刷负荷占比65%-78%。由于地表裸露、植被稀疏, SS浓度峰值与径流峰值基本同步(滞后<10分钟), 区别于湿润区的明显滞后现象。融雪剂残留与沙尘沉降构成干旱区特有污染源, TN以溶解态为主, 需关注盐分与氮素复合污染风险。透水铺装与植草沟等绿色基础设施在干旱区具有良好的适应性, 可削减峰值径流51%, 同步降低SS与TN负荷45%以上。本研究突破了传统城市水文模型对湿润区的依赖, 为干旱区城市应对极端气候风险、优化水环境管理提供了理论工具与实践路径, 对中亚、中东等类似干旱城市具有借鉴意义。

参考文献

- [1]熊立华,尹家波,郭生练.极端水文事件对气候变化的热力学响应研究进展与评价[J].武汉大学学报(工学版),2023,56(12):1432-1444.
- [2]李明珺.柘皋河流域极端降雨事件下非点源污染特征模型模拟研究[D].安徽建筑大学,2025.
- [3]唐正逸.喀斯特流域地表径流对未来气候和景观变化的响应[D].贵州师范大学,2025.
- [4]黄桂锋,孙赫,姚檀栋.雅鲁藏布江流域奴下水文站极端降水与极端径流的关系研究[J].冰川冻土,2024,46(04):1099-1112.