•河流保护与治理•

DOI:10.12454/j.jsuese.202400490

本刊网刊

若尔盖草甸型弯曲河流侵蚀过程机制与计算模型研究

邓　漩[1],刘　超[1,2],李龙国[1],鲁　恒[1],李乃稳[1,2*]

(1.四川大学 水利水电学院,四川 成都 610065;2.四川大学 山区河流保护与治理全国重点实验室,四川 成都 610065)

摘　要:若尔盖草原作为黄河上游关键水源涵养地,其河流岸线侵蚀崩塌问题日益凸显,严重影响草原生态安全和水源涵养功能。以若尔盖草甸型弯曲河流为研究对象,调查了若尔盖草原自然环境特征及河道岸线侵蚀破坏现状,深入探讨了河岸侵蚀过程机制及其影响因素。研究全面分析了长期洪水冲刷、植被根系锚固、冻融和渗流潜蚀耦合作用下的侵蚀破坏机制,揭示了河流岸线侵蚀是由下部粉砂层及砾石夹砂层的冲刷、上部草甸层的坍塌以及渗流和冻融共同作用的结果,水流冲刷力与土体抗冲能力的相对大小决定了岸坡的稳定性。通过详细分析土层土粒结构、土层厚度、水流深度、河道弯曲度及渗流等土体参数与河道参数,构建了具有针对性的河流侵蚀计算模型,通过计算模型与实地测量相结合的方法模拟河岸坡脚侵蚀量和侵蚀速率,用BSTEM(bank stability and toe erosion model)的模拟结果验证了本文计算模型的科学性与可靠性。这种综合研究方法不仅提高了研究的深度和广度,而且为河岸侵蚀防控提供了更加全面和有效的技术支撑。

关键词:草甸型弯曲河流;侵蚀机制;计算模型;岸坡稳定性

中图分类号:TV147　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**2096-3246(2026)03-0123-11

若尔盖草原是黄河上游的主要水源涵养地,多年平均水资源总量为43.92亿m^3,分别占枯水期和丰水期流量的34.8%、30.9%[1],对黄河流域生态环境保护与可持续发展至关重要。然而,该地区的河流发源于山区,流经寒区草原时,地势由陡而缓,河流蛇形蜿蜒,岸线易受侵蚀崩塌,导致洪涝灾害频发[2]。同时,河道岸坡二元的土体结构(草甸/泥炭土根土复合体+非黏性夹砂层或卵石夹砂层)极为脆弱,抗冲刷能力差,易发生侵蚀崩塌[3]。近年来,岸线侵蚀崩塌与草地、沼泽、湿地退化、水土流失等问题互相加剧,导致草原生态环境持续恶化,水源涵养功能持续降低。截至2017年,湖泊面积萎缩38.9%,湿地退化20.2%,草地退化43.0%,水土流失较1999年上升79.0%[4]。国家和四川省及阿坝州高度重视黄河上游四川段生态环境保护,在黄河生态环境保护规划中,将水源涵养功能提升、草原生态保护与湿地恢复、河道岸线侵蚀防治与洪涝灾害治理列为重点内容[5]。通过模拟若尔盖河流崩岸过程,探究其崩岸机制,开展岸坡稳定性分析,是若尔盖河道岸线侵蚀防治工作的重要理论支撑。

河流洪涝灾害、岸线侵蚀破坏和河床演变等问题关乎社会发展、生命财产安全和生态环境保护,因此在国内外都备受关注。河流侵蚀崩岸既属于土力学中的土坡稳定性问题,又是河床演变学中的河岸冲刷后退与河道扩宽问题,涉及岩土力学、水力学、植物与生态学、环境科学等多学科,是典型的学科交叉问题[6–7]。河岸崩塌机理十分复杂,主要受河岸边界特性及土体地质结构、水流条件和河床冲淤演变特性等因素共同影响[8]。Thorne[9]总结了早期侵蚀堤岸的简单土坡稳定性分析;Osman[10]和Thorne[11]等根据堤岸发生冲刷后的几何剖面,建立了适用于河流冲刷作用下的堤岸稳定分析模型。悬臂式落崩是崩岸的主要形式,Thorne等[12]基于安全系数的稳定性分析开创性地提出了悬臂式崩岸的3种可能破坏机制:剪切、拉伸和旋转崩塌。上述研究多聚焦于均质河岸,近年来针对类似若尔盖地区二元河岸结构的

收稿日期:2024–06–26　　**修回日期:**2024–08–21　　**网络出版日期:**2024–09–24

基金项目:四川省科技计划重点项目(2023YFS0377);国家自然科学基金面上项目(52379073)

作者简介:邓　漩(2001—),女,硕士生.研究方向:河流治理与生态保护.E-mail:1337614200@qq.com

* **通信作者:**李乃稳,教授,E-mail:linaiwen@scu.edu.cn

研究也越来越多。赵渭军等[13]揭示了混合土二元结构河岸冲刷过程的3个阶段；朱海丽等[3]分析了黄河源草甸型弯曲河流的悬臂式崩岸模式，得到崩塌块的临界宽度表达式；李志威等[14]基于岸坡形态、河岸土体组成和水流条件，运用BSTEM（bank stability and toe erosion model）模拟了高原泥炭型弯曲河道粉砂层的崩岸过程，模拟结果与实际数据吻合较好；张芳枝等[15]通过三维有限元模拟分析河流岸坡稳定性，发现水位上升会加剧河流冲刷对岸坡渗流和变形的影响，尤其堤脚处最易受损。现有研究对草甸型悬臂式崩岸机制的分析尚不够深入，较少考虑各土层土粒结构及土层厚度对崩岸的影响，也缺乏对河流走向、河道弯曲度以及渗流等多重因素的综合考虑。

本文以黑河和热曲河上野外实测点为例，结合黑河工程实地调查资料，阐述若尔盖草原河流岸线侵蚀破坏现状，解析其在冻融、植被根系锚固、长期洪水冲刷和渗流潜蚀耦合作用下的侵蚀破坏规律和机制，进而构建堤岸渗流与稳定性分析和堤岸侵蚀过程计算模型，计算得出水流冲刷力、土体抗冲力、冲刷宽度、冲刷深度、安全系数等数据，再用BSTEM模型对河岸坡脚侵蚀量、侵蚀速率等进行验证，将两种模型模拟结果与实测数据进行比较，验证模型的可靠性。研究结果有助于更深入认识弯曲河道崩岸与横向侵蚀过程，为若尔盖草原河流岸线侵蚀破坏防治工程提供理论与技术支撑。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域及调查点

若尔盖草原地处川西北边界、青藏高原东部，也被称为松潘高原。区域面积辽阔，地跨四川、青海、甘肃3省，总面积约5.3×10^4 km^2，海拔高度在3 300～3 600 m。若尔盖境内的黑河向西北流入沼泽区，北入若尔盖县境，又西入玛曲县境，至曲果果芒汇入黄河[16]。热曲河是黑河右岸一级支流、黄河二级支流，发源于红原色地乡，经色地乡流入若尔盖县境内，在霍道附近汇入黑河。若尔盖草原为黄河源区的多雨区，汛期5—10月的降雨量占年降水量的89.0%，而12月至次年3月的降水量仅占年降水量的4.7%[17]。若尔盖草原属高寒地区，冬季严寒，夏季凉爽，春秋短，年均气温较低，为0.6～1.2 ℃[18]。由于地处高原，每年有8个月被积雪和冻土覆盖，每年10月土地开始冻结，至次年5月中旬完全解冻，最大冻土深度约100 cm[19]。

本文选取若尔盖县作为研究区域，选取其境内的黑河和热曲河作为研究对象，若尔盖研究区域及调查点如图1所示。在若尔盖县境内草原地区进行现场调查及勘测，根据若尔盖地区河流分布特征及流域水文情况，在黑河及热曲河上各选取3个具有代表性的典型河段（共6个）作为实测点（图1中，H1～H3、R1～R3）开展现场勘察，现场调查各点位信息见表1。

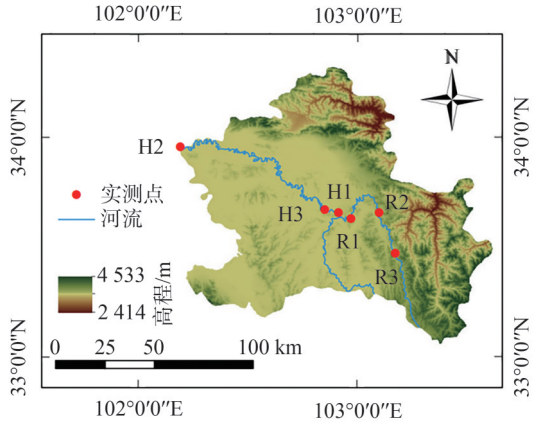


图1 若尔盖区域及调查点

Fig. 1 Zoige study area and survey sites

表1 现场调查各点位信息

Tab. 1 Information of points surveyed in the field

实测点	经度/(°)	纬度/(°)	所在位置	河流位置
H1	102.924 052	33.616 289	黑河中游	黄河支流
H2	102.129 450	33.972 173	黑河下游	黄河支流
H3	102.827 814	33.639 024	黑河中游	黄河支流
R1	102.969 710	33.567 890	热曲河下游	黑河支流
R2	103.104 735	33.586 328	热曲河中游	黑河支流
R3	103.185 940	33.444 697	热曲河上游	黑河支流

1.2 结构特征参数测量

本研究对若尔盖草甸型弯曲河流开展野外调查与取样，现场测量河流水力参数（如水面坡降、流速、河宽、水深），对河岸土体特性（如泥沙颗粒级配、中值粒径、容重和孔隙比）进行了现场取样与实验室分析。本研究工作参考了黑河若尔盖县达扎寺镇段护岸建设工程报告中的部分数据。表2列出了若尔盖河岸岸坡的结构特征及基本参数，各采样点具体的水流和土体参数见第3.2节。

1.3 数据获取与处理

本文采用的侵蚀过程模型是根据水流冲刷力与土体抗冲刷力的相对大小来确定侵蚀宽度与深度，并采用稳定计算公式分析岸坡稳定性，具体计算过程见第3.1节。实测侵蚀距离是根据实地勘察结果，采用World Imagery Wayback网站上2017—2023年（缺乏2018年）的卫星地图数据，经矢量化处理后导

表2　岸坡结构特征及参数

Tab. 2　Structural characteristics and parameters of bank slopes

土层名称	特性	密度/(kN·m^{-3})	孔隙比 e	抗剪系数		渗透性	
				内摩擦角 φ/(°)	黏聚力 C/kPa	渗透系数 K/(cm·s^{-1})	允许水力比降
草甸层	粉质黏土，含植物根系	13.5～15.5	1.20	10～12	5	4.37×10^{-4}～8.61×10^{-4}	[0.40,0.45]
粉细砂	粉细砂为主，含5%～10%黏粒	16.5～18.0	0.42	20～25	0	3.35×10^{-3}～4.62×10^{-3}	(0.10,0.12]
含泥砂砾石	砾石、砂粒为主，其中卵石含量为10%～20%	19.5～20.0	0.40	28～32	0	6.85×10^{-3}～2.32×10^{-2}	(0.12,0.15]

入 ArcGIS，按照下述方法求得各实测点的河道年偏移量。

首先，在卫星地图上确定 2017—2023 年的对应点位置。在 ArcGIS 中，使用识别工具（如 Identify 或 Select by Rectangle）获取各年份各测量点的坐标。然后，使用测量工具（如 Measure Distance 或 Measure Area）计算测量点在相邻年份间的直线距离。年偏移量定义为相邻年份测量点之间的直线距离，其中，2017—2019 年的偏移量对应两年的累计变化。所有实测点的偏移距离见表3。

表3　实际年偏移距离（2017—2023）

Tab. 3　Actual annual offset distance (2017—2023)

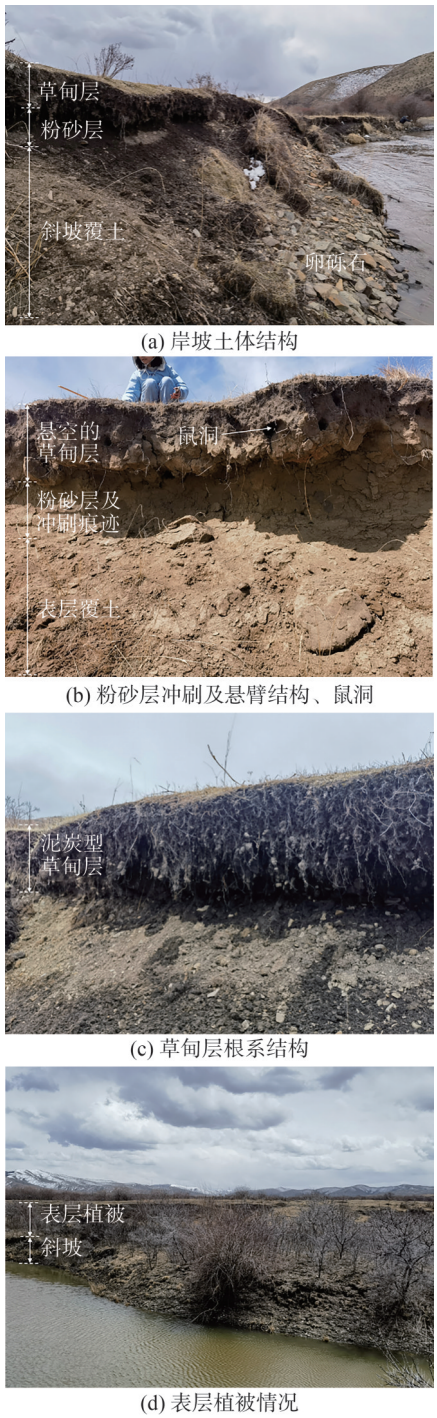
m

实测点	年份				
	2017—2019	2020	2021	2022	2023
H1	1.18	0.83	0.45	0.67	2.67
H2	2.18	0.67	0.46	0.95	0.80
H3	0.33	0.52	4.04	0.41	2.74
R1	0.64	1.54	0.43	1.12	0.49
R2	1.13	0.45	0.63	0.76	0.39
R3	5.49	0.74	1.68	3.63	0.95

2　侵蚀过程机制

2.1　侵蚀现状

若尔盖研究区域岸坡侵蚀现状如图2所示。根据实地勘测和资料查阅，若尔盖河岸岸坡土体结构可划分为3层（图2(a)）：上部为草甸层根土复合体，颜色偏黑，结构稳定；中部为浅色的粉砂层，干燥密实；下部为砾石夹砂层，延伸至河床，河床以粒径较大的卵砾石为主。部分砂砾石层被斜坡覆土遮盖，斜坡坡度较大，表层局部可见细颗粒覆土。岸坡边壁整体十分粗糙，上层土体表面有不规则的层状凸出，下层的夹砂层表面是密集的砾石。上部土层边壁存在一些草原鼠类挖掘的孔洞（图2(b)），对土体稳定性产生一定不利影响。



(a) 岸坡土体结构

(b) 粉砂层冲刷及悬臂结构、鼠洞

(c) 草甸层根系结构

(d) 表层植被情况

图2　岸坡侵蚀现状

Fig. 2　Current status of bank erosion

2.2 机制解析

水流冲刷力与岸坡土体抗冲能力和整体稳定性之间的相互作用，是岸坡侵蚀的核心机制。水流冲刷力是侵蚀的直接驱动力，水流在流动过程中会对岸坡土体产生剪切和拖拽作用，使土壤颗粒从原位剥离并随水流迁移，导致岸坡逐渐后退，进而形成沟谷、河道等地貌形态。岸坡土体的抗冲能力是抵抗水流冲刷的重要因素，抗冲能力强的土体能够抵抗更强的水流冲刷，从而减缓侵蚀速率。当岸坡的整体稳定性降低时，较小水流冲刷力也可能导致大规模的滑坡、崩塌等侵蚀现象。

由实地勘测和测量得到的土体参数可知，若尔盖为三元土体结构，中间的粉砂层颗粒较细，抗淘刷能力弱，当水流速度达到一定值时，水流冲刷力大于土体起动切应力，砂土颗粒即会被水流冲刷带走，导致河道展宽，上部根土复合体失去支承，逐渐悬空，形成悬臂结构（图 2(b)）。草甸层由于植物根系的固结缠绕以及黏土颗粒间的黏聚作用，具有较强的抗冲刷能力，不易被水流冲刷（图 2(c)）。底部的砾石夹砂层对岸坡的整体稳定性起到一定支承作用，但这一层受到汛期水流破坏时，岸坡的整体稳定性将大幅下降。

若尔盖草原热曲河段草被茂盛，灌木众多（图 2(d)），而黑河段草被相对稀疏，灌木很少，调查区域内无大型树木。草甸层厚度沿河流从中游到下游逐渐减少，下游植被生长状况较差，草甸沙化严重。现场观测表明，植物根系分布较浅，约 86% 的根系分布于 30 cm 深度以内的土层。植物根系可以增强土壤的凝聚力和内摩擦力，提高土壤的抗冲性，因此含根系的草甸层抗冲能力较强。近年来，由于若尔盖草原植被和根系的退化，土壤抗冲性减弱，更容易受到流水和风沙的侵蚀。这种侵蚀作用不仅加剧了草地的退化、沙化，还可能导致周边地区的水土流失问题。

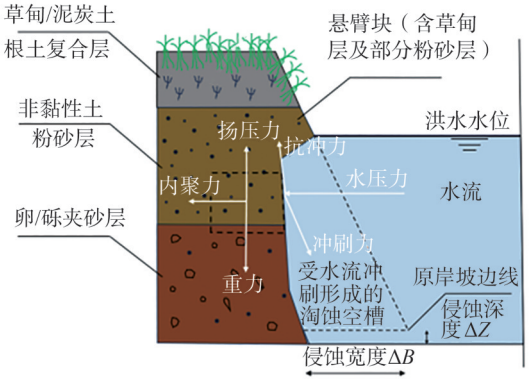
现场观测显示，若尔盖草原鼠类洞穴分布广泛，尤其下游地区最为密集，鼠类打洞后堆起的土堆结构疏松，对草地退化产生严重影响。岸坡中也遍布鼠洞，改变了地表形态和土体结构，使得土体更容易受到水流的冲刷和侵蚀，在洪水期对岸坡稳定性构成巨大威胁。此外，草原鼠类的活动还可能导致植被破坏和土壤养分流失，进一步加剧侵蚀作用。

同时，若尔盖地处高原，土体常年受到冻融作用影响。冬季低温使含水土体冻结，春夏季节温度回升后又逐渐解冻，孔隙水在冻融循环过程中产生涨缩压力，对土体结构稳定性造成不良影响，即河岸斜坡段能够抵抗河流冲刷力的有效土层更薄。新一轮冲刷破坏后，上方的草甸、粉砂落下形成新的覆土，在冻融循环交替作用下加重河流横向的侵蚀破坏。岸坡植被在冬季低温环境下生长缓慢，等到来年温度回升时，又值汛期河水冲刷岸坡，草甸层再次发生塌落，导致岸坡植被逐渐退化，形成恶性循环。

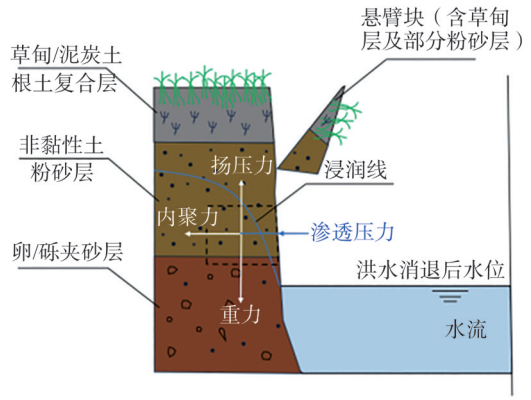
综上所述，若尔盖地区岸坡侵蚀的主要机制可归纳为：汛期水流冲刷下层粉砂层和砾石夹砂层形成淘刷凹槽导致河道展宽；非汛期地下水渗流造成土体细小颗粒流失，形成潜蚀通道，使土体内聚力减小，抗剪强度降低，同时顺坡向渗流增大了坡体下滑力[20]。随着淘刷的加剧，岸坡出现裂缝，最终导致草甸层断裂垮塌至岸脚。草甸层崩塌块内部因根系固结，不易分散，对斜坡上的砂土表层有一定的保护作用，可以减缓水流直接冲刷。直到崩塌块在水中长时间浸泡，根系腐烂、土体黏性降低，失去根土咬合作用后，才在下一次汛期时被水流冲走。总体而言，明流冲刷和渗流潜蚀二者耦合叠加造成岸线侵蚀破坏增强，使河道扩宽，冻融循环和草原生物活动加剧了这一过程。而植被根系通过改变根土复合体结构增强了岸坡抗冲力，增加了岸线稳定性[21]。同时，河岸植被可以增加河道摩阻而使河流断面横向流速梯度增加，促使主流归槽，在一定程度上降低河岸侵蚀，但可能会造成竖向冲刷增加[22]。

根据赵渭军等[13]提出的混合土二元结构河岸冲刷过程的 3 个阶段，若尔盖草甸型河岸的崩塌过程也可分为 3 个阶段，如图 3 所示。第 1 阶段，下部粉砂层及砾石夹砂层冲刷阶段。汛期时，在近岸水流冲刷力的作用下，坡脚及以上水流能接触的部位（主要为砾石夹砂层与部分粉砂层）被冲刷淘蚀，土体大量流失，直至下部形成空槽，除河流冲刷淘蚀以外，还有一定厚度的粉砂层因无根系固结作用，在重力作用下垮塌，加大了下部空槽的体积。在水流冲刷作用下，河道发生横向侵蚀。第 2 阶段是上部草甸层悬空与坍塌阶段。洪水退去后，河岸内部与外部形成水头差，在渗流作用下，上层土体部分黏粉粒被带走。在水的浸泡下，土体黏聚力等关键参数降低，容重增大，上部的草甸层及部分粉砂层在失去下部的支承后，稳定性降低，最终悬臂块发生张拉破坏并倾倒崩塌。第 3 阶段是崩塌块淤积及冲散阶段。崩塌形成的块体较大且完整的部分覆盖于河岸斜坡上，或粉碎后形成覆土散落于斜坡表面，较小或松散的部分则直接被水流冲走。以上阶段每年进行一次循环，河岸不断后退，造成水土流失、草地退化等一系列生态问题。

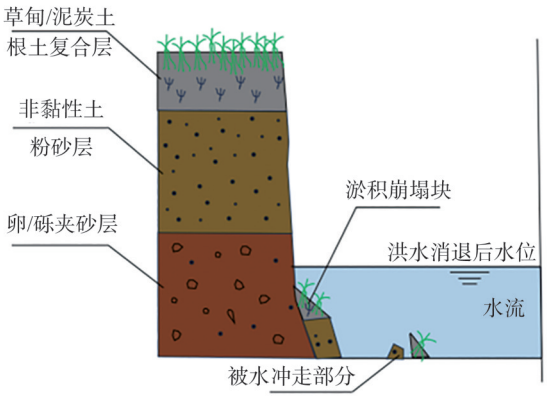
在水流冲刷和渗流潜蚀的作用下，岸坡土体侵



(a) 下部粉砂层及砾石夹砂层冲刷阶段



(b) 上部草甸层悬空与坍塌阶段

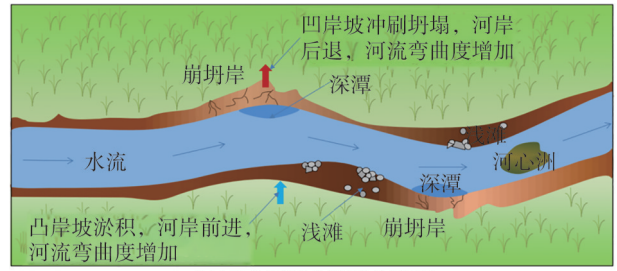


(c) 崩塌块淤积及冲散阶段

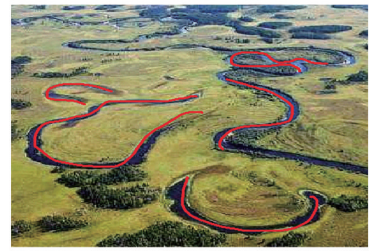
图3　若尔盖岸坡崩塌过程

Fig. 3　Collapse process of Zoige bank

蚀流失，最后失稳崩塌破坏，导致河道扩宽与河床演变[23–24]。若尔盖草甸型弯曲河流由于其独特的二元岸坡结构，在汛期凹岸易发生冲刷崩塌，使河岸后退、河流弯曲度增加；凸岸则因淤积使河岸前进，同样使河流弯曲度增加。冬季冻融作用抑制植物生长，加剧了土体的易蚀性。在上述过程的长期循环作用下，若尔盖河流逐渐演化成蛇曲形态河流并发育出众多牛轭湖，其河床演变过程如图 4 所示。



(a) 弯曲河道水流冲刷淤积



(b) 河流蛇曲形态及牛轭湖

图4　若尔盖河床演变过程

Fig. 4　Evolution process of Zoige riverbed

3　计算模型及结果讨论

3.1　计算模型构建

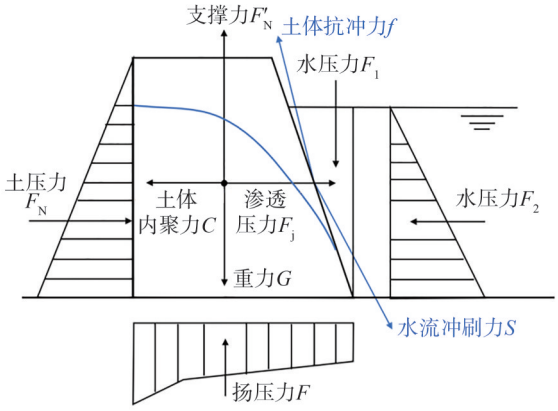
为探究岸坡土体侵蚀程度，进一步阐明崩岸机制，本文构建了一个综合的、具备可操作性的计算模型。该模型在充分考虑土体与水流相互作用的基础上，根据研究区域实际情况对相关参数及公式进行了优化，模型构建如图 5 所示。图 5 中，Δt 为汛期冲刷时间，s。图 5(a)为洪水期岸坡土体的受力分析。在竖直方向上，岸坡土体受自身重力、土体支承力和对岸坡向下的水压力，并且由于地下水的存在和土体的渗透性，土体还承受向上的扬压力；在水平方向上，右侧受向内的水压力有利于维持岸坡稳定，左侧有向外的土压力以及土体内聚力、渗透压力。这些受力的共同作用，统一归纳为水流冲刷力和土体抗冲力的相互作用，构成了土体的受力分析模型。

本文模型的理论基础主要建立在水流冲刷力和土体抗冲力的相对大小上。水流冲刷力一般用水流剪切力表示，土体抗冲力则用土体起动剪切力表示[7]。当水流冲刷力大于土体抗冲力时，土颗粒会被水流冲刷带走。一方面，水流对岸坡土体侧向的淘刷会导致岸坡横向侵蚀，使河道变宽，岸坡变陡；另一方面，水流冲刷还会带走河道中的泥沙，当冲刷带走的泥沙量大于沉积下的泥沙量时，河道会下切，发生竖向变形，进而使岸坡变陡，稳定性变差。在构建理论基本公式时，本文充分考虑了公式的适用条件、参数选择等，推导出了适用于本文模型的侵蚀和稳定性公式(图 5(b))。

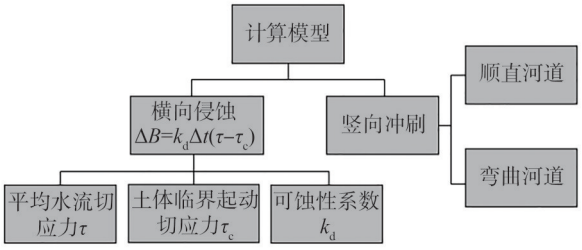
根据水力学计算原理，水流对边界的平均切应力大小可由水流比降确定[7]：

$$\tau=\gamma_w hJ \tag{1}$$

式中：γ_w为水的重度，kN·m^{-3}；h为断面平均水深，m，文中h采用汛期水深；J为比降。



(a) 力学模型



(b) 计算流程

图5 模型构建

Fig. 5 Model construction

土体起动切应力通常由经验公式或土体冲刷试验获得。Hanson等[25]通过土体冲刷试验，得到大量实测数据，推算出一个用于估算非黏性土体临界切应力的经验公式，该公式适用于若尔盖岸坡下层非黏性土的计算：

$$\begin{cases}\tau_c=0.044\times16.2\times d_{50}, d_{50}<2\text{ mm};\\ \tau_c=0.06\times16.2\times d_{50}, d_{50}\geq2\text{ mm}\end{cases} \tag{2}$$

式中：τ_c为堤岸土体的临界起动切应力，N·m^{-2}；d_{50}为泥沙颗粒中值粒径，mm。

针对横向侵蚀宽度的计算，国内外学者提出了多种计算方法。Osman等[10]提出了估算黏性物质组成河岸的横向侵蚀量计算方法。周建军等[26]根据长江三峡物理模型，假设河岸冲刷过程中冲刷面为铅直面，提出了水流侧向冲刷河岸宽度的计算公式。叶威等[27]为研究河流冲刷对水位升降下岸坡稳定性的影响，针对下荆江典型二元结构（上层为黏土、下层为沙土）河岸，提出一种基于剪切力差值的水流对岸坡冲刷距离的计算方法：

$$\Delta B=k_d\Delta t(\tau-\tau_c)^{\alpha} \tag{3}$$

式中，α为一个经验派生的指数，通常取1。

Arulanandan等[28]通过实验室水槽试验结果提出了一个适用于非黏性土的土体临界切应力和可蚀性系数的经验公式：

$$k_d=10^{-7}\tau_c^{-0.5} \tag{4}$$

非黏性土的可蚀性是一个复杂且多变的物理特性，它受到土壤颗粒大小、分布、密度、湿度以及外部环境条件（如风力、水力作用等）的共同影响，具有复杂性和区域差异性。传统经验公式虽能在一定程度上反映其可蚀性，但往往不够全面准确。为了优化预测结果，使其贴近特定的土壤类型和外部环境，本文引入一个可灵活调整的系数β来修正经验公式：

$$k_d=\beta\times10^{-7}\tau_c^{-0.5} \tag{5}$$

式中，$\beta=0.09$。

当水流挟沙能力大于泥沙补给量时，河床会发生下切，导致河道发生竖向变形。对于平顺河道，河岸冲刷深度可采取顺堤（坝）及平顺护岸冲刷计算公式[29]计算：

$$h_s=h\times\left[\left(\frac{v_1}{v_2}\right)^n-1\right] \tag{6}$$

$$v_1=v\times\frac{2\eta}{1+\eta} \tag{7}$$

$$v_2=\left(\frac{h}{d_{50}^{0.75}}\right)^{0.14}\cdot\sqrt{17.6\frac{\gamma_s-\gamma_w}{\gamma_w}d_{50}+0.000\,000\,605\frac{10+h}{d_{50}^{0.75}}} \tag{8}$$

式（6）～（8）中：h_s为局部冲刷深度，m；h为冲刷处的水深，即汛期水深，m；v_1为近岸垂线平均流速，m·s^{-1}；n为与堤防在平面上的形状有关的系数，n=1/6～1/4，本文取1/6；η为水流流速不均匀系数，根据水流流向与岸坡交角α_1查表确定，本文取1；v为行近流速，m·s^{-1}；v_2为泥沙起动流速，m·s^{-1}；γ_s为泥沙的容重，kN·m^{-3}。

针对弯曲河道，贺丽丽等[30]为分析流量和弯道角度对河道冲刷深度的影响，进行了不同流量和弯道角度的河道冲刷试验，并采用多元乘幂函数对弯道最大冲刷深度进行拟合，拟合结果表明弯道最大冲刷深度可以采用多元乘幂函数表示为如下形式：

$$h'_s=aQ^b\theta^c \tag{9}$$

式中：h'_s为河流弯道泥沙最大冲刷深度，cm；Q为流量，m^3·h^{-1}；θ为弯道角度，(°)；a、b、c为拟合参数，分别为0.102 6、0.555、0.756 5。

在河流水位上涨期间，岸坡土体内的地下水位也会上涨到相应高度。当河道中的水位降落以后，地下水位下降速度滞后于河道水位下降速度，此时渗流方向转变为由岸坡内部渗入到河道。针对非汛期岸坡安全系数的计算，Thorne[9]假定一个通过坡脚的滑动面，通过定义滑动面上的抗滑力与滑动力之比，即安全系

数F_s来判定侵蚀堤岸的稳定性，简化公式如下：

$$F_s=\frac{\gamma_s}{\gamma_s+\gamma_w}\cdot\frac{\tan\phi}{\tan\alpha_2} \tag{10}$$

式中：α_2为岸坡倾角，(°)；ϕ为土体摩擦角，(°)。

3.2　计算模型结果

本文以野外实测点为例，根据调查取样得到的河道参数与土体参数，结合上述数学模型进行计算。河道、土体参数分别如表4、5所示。

表4　河道参数

Tab. 4　River parameters

实测点	浸润线水深/m	非汛期水深/m	汛期水深/m	坡降	弯曲角度/(°)	汛期流量/($m^3\cdot s^{-1}$)	行近流速/($m\cdot s^{-1}$)
H1	3.66	0.85	1.87	0.001 30	11.48	73	
H2	4.22	1.50	3.30	0.000 85	0	73	1.46
H3	3.77	1.20	2.64	0.000 66	30.00	73	
R1	2.62	0.50	2.21	0.000 65	0	59	1.36
R2	2.59	0.50	2.22	0.000 76	0	59	1.48
R3	2.47	0.70	3.11	0.002 40	39.65	59	

表5　土体参数

Tab. 5　Soil parameters

实测点	坡脚中值粒径/mm	摩擦角/(°)	土容重/($kN\cdot m^{-3}$)	床沙中值粒径/m
H1	6.673	28	19.5	0.12
H2	22.681	28	19.5	0.12
H3	2.208	28	19.5	0.12
R1	0.609	31	20.0	0.12
R2	7.233	31	20.0	0.12
R3	12.955	31	20.0	0.12

坡脚的淘刷主要发生在洪水期，若尔盖的洪水期长达6个月（主汛期5—10月）。现场采样的砂砾石存在d_{50}过小及过大的情况，这可能会导致计算结果出现较大误差，因此H2点和R1点分别采用平均粒径10.53 mm和6.94 mm进行计算，以确保模型的准确性和可靠性。根据现场调查，H2、R1、R2点的河道形态均较为顺直，H1、H3和R3点处的河道为弯曲河道。将测得的相关参数代入模型公式中，即可得到模型公式计算结果，如表6所示。

表6　模型公式计算结果

Tab. 6　Calculation results of model formulas

实测点	水流切应力/Pa	土体切应力/Pa	横向侵蚀/m	竖向冲刷/m	安全系数
H1	23.109	6.486	0.91	0.36	0.474
H2	27.489	10.235	0.75	0.83	0.247
H3	14.856	2.146	1.21	0.75	0.351
R1	14.078	4.947	0.57	0.71	0.214
R2	16.535	7.030	0.50	0.75	0.217
R3	56.323	12.592	1.72	0.82	0.225

为了验证河岸坡脚侵蚀量、岸坡稳定性的计算结果是否可靠，本文采用国际通用的BSTEM模型进行相同的计算。BSTEM模型由美国农业部农业研究局提出，在Excel中通过设定宏命令运行，用来预测河岸稳定性及坡脚侵蚀速率。经过多次版本迭代和更新，该模型已经成为一个成熟且广泛应用的河岸稳定性分析工具。BSTEM包括河岸稳定性分析模块（BS）和河岸坡脚侵蚀模块（BTE）。首先输入河岸断面形态和河道水流参数，再输入河岸及坡脚物质组成，运行BTE模块得到汛期坡脚侵蚀速率及侵蚀量，形成新的岸坡形态，在此基础上调整水流参数，运行BS模块获得非汛期的安全系数，从而评估河岸稳定性[31]。近年来，该模型在河岸稳定性研究中得到广泛运用，例如，Kilania等[32]利用BSTEM模型计算沿河岸表面的剪应力垂直分布，并评估由HEC-RAS模拟的横截面沉积或侵蚀对河岸稳定性的影响；宗全利等[33]采用BSTEM模型对上荆江典型二元结构河岸的冲刷和崩塌过程进行了模拟。本文选用BSTEM模型作为对照模型，主要是由于该模型在河岸崩塌和侵蚀预测方面具有较高的准确性，能够为本文计算结果提供可靠的参照与验证。

实测点的岸坡断面形态参数如表7所示，将其与已知的参数代入BSTEM模型，得到的BSTEM模型计算结果如表8所示。

表7　岸坡形态参数

Tab. 7　Morphological parameters of bank slopes

实测点	草甸层厚度/m	粉砂层厚度/m	砾石夹砂层厚度/m	岸坡倾角/(°)	坡脚长度/m
H1	0.40	0.50	5.1	32	9.6
H2	0.05	1.65	3.6	16	13.0
H3	0.20	0.70	3.5	32	6.6
R1	0.20	0.45	1.3	36	1.6
R2	0.20	0.30	0.8	53	1.0
R3	0.40	0.10	2.5	39	4.0

表8　BSTEM模型计算结果

Tab. 8　Calculation results of BSTEM model

实测点	横向侵蚀/m	安全系数
H1	0.64	0.49
H2	0.53	0.32
H3	0.87	0.14
R1	0.41	0.12
R2	0.36	0.15
R3	1.22	0.13

3.3 结果对比讨论

将两个模型的计算结果与河岸实际后退距离进行对比，图 6 展示了横向侵蚀距离和安全系数的比较结果。通过对比分析可以看出，本文数值模型和 BSTEM 的计算结果与实测数据均表现出较为一致的趋势。具体来说，在横向侵蚀距离方面，两种模型计算的横向侵蚀值与实测值相差不大，且随着岸坡形态和水流条件的变化，两种模型的预测结果也呈现出相应的变化趋势。BSTEM 的计算公式与本文自建模型具有相似性，然而其更为复杂，因其还将植被因素以及渗流的影响考虑在内。本文构建的数值计算模型计算出的结果比 BSTEM 更贴合实测值，可能是在模型构建过程中结合实际情况进行了调整和优化，并引入了新的变量和因素。在安全系数方面，两种模型计算值也基本吻合，小于 1，侵蚀后的岸坡均不稳定，进一步表明了模型的可靠性。

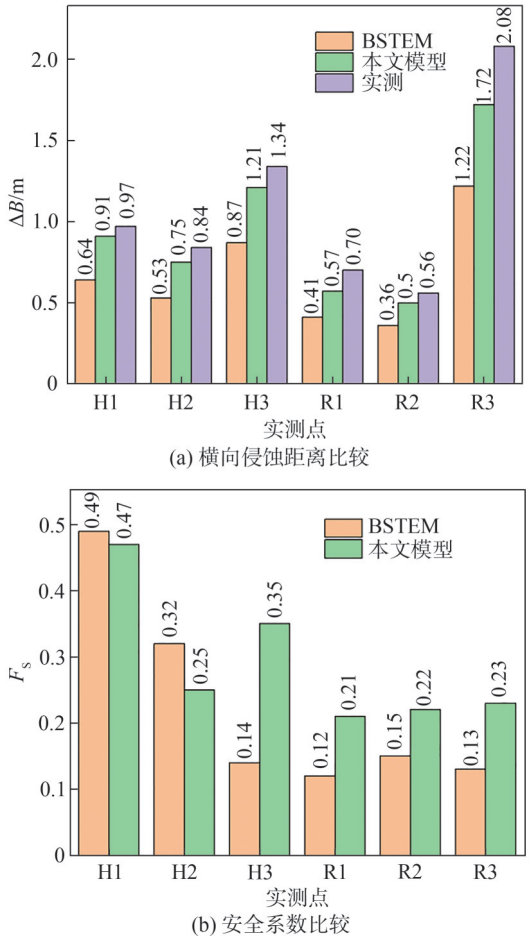


图 6 模型计算结果比较

Fig. 6 Comparison of model calculation results

鉴于存在参数优化致使自建模型结果优于 BSTEM 结果的可能性，因此对 BSTEM 进行相同的参数优化并加以比较，结果如图 7 所示。经优化后的 BSTEM 计算出的横向侵蚀距离减小，与实测值的偏差增大，趋势也发生变化；安全系数比优化前增大，且出现了较大的差异。由此可见，参数优化后的 BSTEM 模型无法达成与参数优化后的自建模型相媲美的拟合效果。这进一步说明了自建模型的优势。此外，不同岸坡位置的横向侵蚀距离和安全系数存在一定差异，这种差异受到岸坡形态、水流条件以及土层参数等多种因素的影响。例如，R3 点水深和坡降较大，导致横向侵蚀距离较大，而 H2 点虽然水流冲刷力较大，但土体中值粒径较大，导致冲刷距离反而较小。

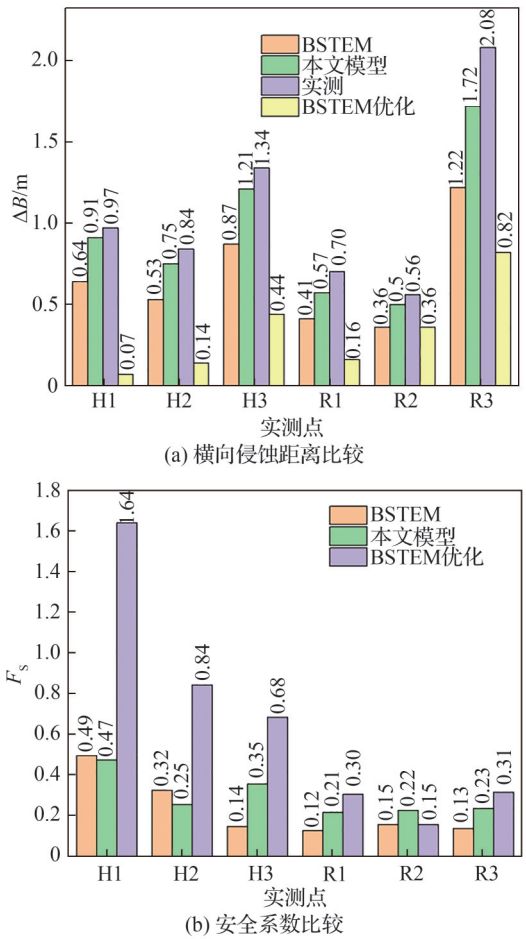


图 7 本文模型与 BSTEM 模型、BSTEM 优化模型比较

Fig. 7 Comparison of the proposed model, the BSTEM model, and the optimized BSTEM model

通过将数值模型和 BSTEM 的计算结果与实际观测数据进行对比，可以得出以下结论：本文所构建的模型能够较为准确地模拟河岸侵蚀过程，并能有效评估岸坡的稳定性；模型预测值与实测值之间表现出较为一致的趋势，但仍然存在一定的偏差，这可能是由于模型在构建过程中对一些实际因素进行了适当简化，如地形的复杂性、水流的三维特性以及土体的非线性行为等；模型参数的选择和校准也可能对预测结果产生影响，不同的模型因采用不同的参数化方法和假设条件，可能导致预测结果之间的差异；实测数据

本身也可能因测量仪器的精度、测量方法的局限性以及人为操作的不确定性等存在一定的误差。综上所述，后续的研究应进一步完善模型结构，以提高模型对复杂环境条件的模拟能力，提升其预测精度和适用性。

4　结　论

本文对若尔盖草原地区二元结构河流岸坡的侵蚀破坏机制及影响因素进行解析，在此基础上建立了耦合明流冲刷与渗流作用的河岸侵蚀过程计算模型，并利用该模型对若尔盖草原河流典型岸坡结构进行分析计算。主要结论如下：

1）若尔盖地区河流为草甸型弯曲河流，岸坡结构具有典型的二元特征，即表层为高原草甸覆盖，其下依次为无黏性砂土层、卵石（碎石）夹砂层。河岸易因悬臂式侵蚀发生崩塌，原因在于表层的草甸与土体形成的根土复合体虽抗冲刷能力强，但近岸水流不断冲刷下部砂土层，上部复合体在重力等作用下可能达到临界状态，并在渗流的作用下导致河岸裂缝和破坏。

2）基于若尔盖岸坡结构特性建立了侵蚀过程与稳定性分析模型，通过比较水流冲刷力与土体抗冲力，计算出岸坡的横向侵蚀和竖向冲刷距离，再得到其安全系数。模型计算结果与BSTEM呈现相同的趋势，吻合良好，计算结果在由卫星地图得到的实测值范围内，表明模型具有较高的可信度。

本文虽然分析了上部根土复合体的悬臂式崩塌机制，但尚未深入探讨根系与土壤的细观耦合关系及影响因素。后续可围绕土工袋护岸、植物根系锚固和生态堤防的协同作用开展研究，为岸坡侵蚀防冲工程提供系统的理论支撑。

参考文献：

[1] Tan Xiaoping.Promoting the control of soil erosion in the Yellow River Basin and creating ecological maintenance and water conservation area[J]. Soil and Water Conservation in China,2020(9):13–14.[谭小平．推进黄河流域水土流失治理 打造生态维护水源涵养区——四川黄河流域水土保持工作概述[J]. 中国水土保持,2020(9):13–14.]

[2] Cao Yong, Ye Chunjiang, Wu Hailiang, et al. Analysis on the necessity of flood control in Sichuan section of main stream of the Yellow River under the new situation[J]. Water Resources Planning and Design,2021(9):23–26.[曹勇，叶春江,吴海亮,等．新形势下黄河干流四川段防洪治理必要性分析[J]. 水利规划与设计,2021(9):23–26.]

[3] Zhu Haili,Li Zhiwei,Hu Xiasong,et al.Cantilever bank failure mechanism of meadow meandering river in the Yellow River source region[J].Journal of Hydraulic Engineering,2015,46(7):836–843.[朱海丽,李志威,胡夏嵩,等．黄河源草甸型弯曲河流的悬臂式崩岸机制[J]. 水利学报，2015,46(7):836–843.]

[4] Han Dayong,Yang Yongxing.Species composition and associated driven factors of plant community in the desertified swamp area of Zoigê plateau[J]. Acta Ecologica Sinica,2020,40(16):5602–5610.[韩大勇,杨永兴．若尔盖高原沙化沼泽区植物群落物种组成及其驱动因素[J]. 生态学报,2020,40(16):5602–5610.]

[5] 中共中央国务院．黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要[M]. 北京:人民出版社,2021.

[6] Mason J, Mohrig D. Differential bank migration and the maintenance of channel width in meandering river bends[J]. Geology,2019,47(12):1136–1140.

[7] Zhang Fangzhi,Chen Xiaoping.Research progress on stability analysis of embankment under effects of river scouring[J].Advances in Science and Technology of Water Resources,2009,29(4):84–88.[张芳枝,陈晓平．河流冲刷作用下堤岸稳定性研究进展[J]. 水利水电科技进展,2009,29(4):84–88.]

[8] Wang Qiang,Wang Lu,Wang Tao,et al.Experimental study on the critical breakup condition of a static armour layer [J].River Research and Applications,2021,37(3):484–493.

[9] Thorne C R.Processes and mechanisms of river bank erosion[M]//Hey R D,Bathurst J C, Thorne C R(eds.).Gravel-bed rivers. Chichester:Wiley,1982.

[10] Osman A M,Thorne C R.Riverbank stability analysis. Ⅰ: Theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1988,114(2): 134–150.

[11] Thorne C R,Osman A M.Riverbank stability analysis. Ⅱ: Applications[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988, 114(2):151–172.

[12] Thorne C R,Tovey N K.Stability of composite river banks[J]. Earth Surface Processes and Landforms,1981,6(5):469–484.

[13] Zhao Weijun,Fu Ningping.Mechanism of natural bank erosion process[J]. Express Water Resources & Hydropower Information,1996,17(2):29–33.[赵渭军,符宁平．自然堤岸冲蚀过程的机理[J]. 水利水电快报,1996,17(2):29–33.]

[14] Li Zhiwei,Guo Nan,Hu Xuyue,et al.Conceptually modelling of cantilever bank failure processes of peat-type meandering channel in the Zoige Plateau[J]. Hydro–Science and Engineering,2017(6):29–36.[李志威,郭楠,胡旭跃,等．若尔盖高原泥炭型弯曲河道崩岸过程模拟[J]. 水利水运工程学报,2017(6):29–36.]

[15] Zhang Fangzhi,Chen Xiaoping.Study of river scour effect on seepage flow and deformation and stability of embankments[J]. Rock and Soil Mechanics,2011,32(2):441–447.[张芳枝,陈晓平．河流冲刷对堤岸渗流和变形的影响研究[J]. 岩土力学,2011,32(2):441–447.]

[16] Li Zhiwei,Wang Zhaoyin,Li Yanfu,et al. Planform geom-

etry characteristics of typical meandering rivers in Yellow River Source[J].Journal of Sediment Research,2012,37(4):11–17.[李志威,王兆印,李艳富,等.黄河源区典型弯曲河流的几何形态特征[J].泥沙研究,2012,37(4):11–17.]

[17] Yang Yuwei,Wu Di.Research progress on land desertification in zoige county[J].Anhui Agricultural Science Bulletin,2019,25(18):98–101.[杨雨薇,吴迪.若尔盖县土地沙漠化研究进展[J].安徽农学通报,2019,25(18):98–101.]

[18] Zhao Nana,Wang Henian,Zhang Beibei,et al.Runoff variation in Zoige Wetland Basin and its response to climate change[J].Water Resources Protection,2019,35(5):40–47.[赵娜娜,王贺年,张贝贝,等.若尔盖湿地流域径流变化及其对气候变化的响应[J].水资源保护,2019,35(5):40–47.]

[19] Li Ke,Yang Yongxing,Yang Yang,et al.Characteristics and influence factors of the swamp degradation under the stress of grazing in the Zoige Plateau[J].Acta Ecologica Sinica,2011,31(20):5956–5969.[李珂,杨永兴,杨杨,等.放牧胁迫下若尔盖高原沼泽退化特征及其影响因子[J].生态学报,2011,31(20):5956–5969.]

[20] Yao Zhixiong,Zhou Jian,Wu Bo.Study on mechanism of riverbank collapse caused by subsoil erosion[J].Journal of Hydroelectric Engineering,2015,34(9):52–58.[姚志雄,周健,吴波.渗流潜蚀作用下堤岸的崩塌机理研究[J].水力发电学报,2015,34(9):52–58.]

[21] Xiong Yanmei,Xia Hanping,Li Zhian,et al.Effects and mechanisms of plant roots on slope reinforcement and soil erosion resistance:A research review[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2007,18(4):895–904.[熊燕梅,夏汉平,李志安,等.植物根系固坡抗蚀的效应与机理研究进展[J].应用生态学报,2007,18(4):895–904.]

[22] Yang Shuqing.River dynamic characteristics and pattern discriminant method influenced by riparian vegetation[D].Tianjin:Tianjin University,2019.[杨树青.岸滩植被影响下的河流动力特性及河型判别方法研究[D].天津:天津大学,2019.]

[23] Li Qiang,Wang Lu,Ma Xudong,et al.Experimental study of effects of riverbed composition on the riverbank erosion process[J].Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management,2020,173(4):199–207.

[24] Klavon K,Fox G,Guertault L,et al.Evaluating a process-based model for use in streambank stabilization:Insights on the Bank Stability and Toe Erosion Model (BSTEM)[J].Earth Surface Processes and Landforms,2017,42(1):191–213.

[25] Hanson G J,Simon A.Erodibility of cohesive streambeds in the loess area of the Midwestern USA[J].Hydrological Processes,2001,15(1):23–38.

[26] Zhou Jianjun,Lin Bingnan,Wang Lianxiang.A 2−D mathematical model for suspended sediment and its application[J].Journal of Hydraulic Engineering,1993,24(11):10−19.[周建军,林秉南,王连祥.平面二维泥沙数学模型研究及其应用[J].水利学报,1993,24(11):10–19.]

[27] Ye Wei,Zhang Guang,Hu Shaohua,et al.Evolution analysis of embankment stability under river scouring[J].Express Water Resources & Hydropower Information,2019,40(1):42–47.[叶威,章光,胡少华,等.河流冲刷作用下堤岸稳定性演化分析[J].水利水电快报,2019,40(1):42–47.]

[28] Arulanandan K,Gillogley E,Tully R.Development of a quantitative method to predict critical shear stress and rate of erosion of natural undisturbed cohesive soils:GL−80−5[R].Vicksburg:US Army Engineer Waterways Experiment Station,1980.

[29] 中华人民共和国住房和城乡建设部.堤防工程设计规范:GB 50286—2013[S].北京:中国计划出版社,2013.

[30] He Lili,Guo Xianghong,Zhao Jungang,et al.Study on the influence of river bend angle and flow on river bend scour[J].Shanxi Hydrotechnics,2021(1):10–14.[贺丽丽,郭向红,赵俊刚,等.河流弯道角度和流量对河流弯道冲刷影响研究[J].山西水利科技,2021(1):10–14.]

[31] Liu Yanfeng,Wang Li.Principles,functional modules and application of BSTEM model[J].Soil and Water Conservation in China,2010(10):24–27.[刘艳锋,王莉.BSTEM模型的原理、功能模块及其应用研究[J].中国水土保持,2010(10):24–27.]

[32] Kilania S,Chahar B R.Numerical modeling of lateral soil slide during reservoir draw-down[C]//Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2019.Pittsburgh:American Society of Civil Engineers,2019:390–398.

[33] Zong Quanli,Xia Junqiang,Deng Chunyan,et al.Modeling of the composite bank failure process using BSTEM[J].Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition),2013,45(3):69–78.[宗全利,夏军强,邓春艳,等.基于BSTEM模型的二元结构河岸崩塌过程模拟[J].四川大学学报(工程科学版),2013,45(3):69–78.]

Mechanism and Computational Modelling of the Erosion Process of Zoige Meadow-type Bending Rivers

DENG Xuan[1], *LIU Chao*[1,2], *LI Longguo*[1], *LU Heng*[1], *LI Naiwen*[1,2*]

(1.College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
2.State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract:

Objective The Zoige grassland, a vital water conservation area in the upper reaches of the Yellow River, faces increasingly severe problems of

riverbank erosion and collapse. This study is conducted to address this urgent issue, as it exerts a profoundly negative influence on the ecological equilibrium and water conservation functions of the grassland. The principal objective is to achieve a comprehensive understanding of the mechanisms and influencing factors of riverbank erosion, with the aim of providing effective solutions for the protection and sustainable management of this significant ecological region.

Methods The research focused on the Zoige meadow-type curved river. Comprehensive field investigations were diligently conducted to collect data related to the natural environmental characteristics of the Zoige grassland and the prevailing conditions of riverbank erosion and damage. Advanced analytical techniques were systematically employed to examine soil grain structure, soil thickness, water flow depth, curvature, and seepage. A rigorous analysis of these parameters enabled the development of a targeted computational model. Prolonged monitoring and data collection were performed to assess the effects of flood scouring, vegetation root anchorage, freezing and thawing, and seepage-induced submerged erosion on the riverbanks. The BSTEM (Bank Stability and Toe Erosion Model) was utilized to simulate the erosion amount and erosion rate at the riverbank slope foot, and the results were validated through a combination of detailed field measurements and comprehensive model simulations.

Results and Discussions The study disclosed that riverbank erosion in the Zoige grassland was a complex process arising from multiple interwoven factors. The scouring of the lower silt layer and gravel sand layer, in conjunction with the collapse of the upper meadow layer, together with the influences of seepage and freezing and thawing processes, collectively contributed to the erosion phenomenon. The relative magnitudes of the water scouring force and the soil resistance to scouring were identified as critical determinants of bank slope stability. The simulation results of the BSTEM exhibited a certain degree of correspondence with the field observations and provided valuable insights into the erosion processes. However, some disparities were also noted, which emphasized the necessity for further refinement and calibration of the model. The calculation results of both models were compared to the actual retreat distance of the riverbank, and it was observed that both the numerical model and the BSTEM displayed relatively consistent trends with the measured data. Specifically, with respect to the lateral erosion distance, the lateral erosion values calculated by the models were not significantly different from the measured values. In addition, as the bank slope morphology and flow conditions changed, the prediction results of the models also showed corresponding variations. The calculation formula of the BSTEM shared similarities with the self-built model but was more complex because it incorporated the influences of vegetation factors and seepage. The results calculated by the numerical calculation model constructed in this study were more consistent with the measured values than those of the BSTEM, possibly due to adjustments and optimizations made during the model construction process based on actual conditions, along with the introduction of new variables and factors. In terms of the safety factor, the values calculated by the models were essentially consistent with the measured values, which were less than 1, indicating that the eroded bank slopes were unstable and further validating the reliability of the models. Given the possibility that parameter optimization can lead to superior results for the self-built model compared to the BSTEM, the same parameter optimization was applied to the BSTEM for comparison. After optimization, the lateral erosion distance predicted by the BSTEM decreased, the deviation from the measured values increased, and the overall trend also changed. The safety factor also decreased, and significant differences emerged. These results indicated that the parameter-optimized BSTEM failed to achieve results comparable to those of the parameter-optimized self-built model, which more effectively demonstrated the advantages and accuracy of the self-built model. In addition, there were specific differences in the lateral erosion distance and safety factor at different bank slope positions. These differences were primarily influenced by factors such as bank slope morphology, flow conditions, and soil layer parameters. For example, at point R3, the significant water depth and slope drop resulted in a considerable lateral erosion distance, whereas at point H2, although the water scouring force was substantial, the large median particle size of the soil resulted in a relatively small scouring distance.

Conclusions This comprehensive research made substantial progress in understanding riverbank erosion mechanisms in the Zoige grassland. The constructed computational model, validated through a combination of theoretical simulations and field measurements, demonstrated its scientific validity and reliability. The findings not only contributed to theoretical knowledge in geomorphology and hydrology but also held practical implications for developing effective prevention and control strategies for riverbank erosion. The research emphasized the importance of considering multiple factors and their interactions to understand and manage complex ecological processes. It provides a solid foundation for future studies and conservation efforts aimed at maintaining the ecological integrity and functionality of the Zoige grassland and similar ecosystems.

Key words: meadow bend rivers; erosion mechanisms; computational modeling; bank stability

（编辑　周　璇）

引用格式: Deng Xuan,Liu Chao,Li Longguo,et al.Mechanism and computational modelling of the erosion process of zoige meadow-type bending rivers[J].Advanced Engineering Sciences,2026,58(3):123–133.[邓漩,刘超,李龙国,等.若尔盖草甸型弯曲河流侵蚀过程机制与计算模型研究[J].工程科学与技术,2026,58(3):123–133.]