

ICS 编号
CCS 编号

团体标准

T/CHES XXX—20XX

山区小流域沟道人工阶梯-深潭系统 技术导则

Specification for geo-hazard mitigation using step-pool system in
channels of small watersheds in mountain areas

（征求意见稿）

20XX-XX-XX 发布

20XX-XX-XX 实施

中国水利学会 发布

目 次

前 言 III

引 言 IV

1 范围 5

2 规范性引用文件 5

3 术语和定义 5

4 总体要求 6

5 阶梯-深潭系统设计 6

 5.1 一般规定 6

 5.2 阶梯位置设计 6

 5.3 冲刷形态设计 7

 5.4 稳定性设计 7

 5.5 能量调控设计 7

 5.6 平均流速设计 8

6 阶梯-深潭系统施工 8

 6.1 一般规定 8

 6.2 单个阶梯-深潭结构 8

 6.3 多级阶梯-深潭系统 9

 6.4 施工迹地修复 9

7 监测维护 9

 7.1 监测 9

 7.2 维护 10

附录 A 11

附录 B 12

附录 C 13

附录 D 15

附录 E 16

前 言

为了指导山区小流域沟道人工阶梯-深潭系统的应用，根据中国水利学会团体标准制修订计划安排，本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件为7章和5个附录，主要内容包括范围，规范性引用文件，术语和定义，总体要求，阶梯-深潭系统设计、阶梯-深潭系统施工、监测维护。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件由中国水利学会归口。执行过程中如有意见或建议，请寄送至中国水利学会（地址：北京市西城区白广路二条16号，邮编100053），以便今后修订时参考。

本文件主编单位：清华大学。

本文件参编单位：中国科学院地理科学与资源研究所、中国科学院地质与地球物理研究所、中国科学院成都山地灾害与环境研究所、北京林业大学。

本文件主要起草人：徐梦珍，王兆印，傅旭东，黄科翰，张晨笛，祁生文，柳金峰，陈剑刚，崔一飞，王道杰，吕立群，余国安，介玉新，王学良，薛雷，李丽慧，陈星宇，刘方翠，张家豪。

引 言

阶梯-深潭系统作为山区常见的河流地貌单元，可有效增加河床阻力，消耗水流能量，从而稳定河床、控制下切，抑制边坡和沟道重力侵蚀，减少泥石流物源及运动量。以人工阶梯-深潭系统为代表的模仿自然的措施常用于河流修复中，能够起到防治山地灾害、有效提升和保持河流生态功能及廊道连通性的作用。

本标准制订了山区小流域沟道人工阶梯-深潭系统的技术导则，目的是引导人工阶梯-深潭系统在防灾减灾中的应用，指导阶梯-深潭结构的设计、建造和维护，保障阶梯-深潭系统的稳定性和防灾减灾效果，促进山区小流域沟道治理与生态修复。

山区小流域沟道人工阶梯-深潭系统技术导则

1 范围

本标准规定了人工阶梯-深潭系统在山区小流域沟道水沙灾害治理中的设计、施工、监测维护技术要求。

本标准适用于沟道平均比降大于 3%且小于 15%的石质山区小流域。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 50201-2014 防洪标准

SL/T 800-2020 河湖生态系统保护与修复工程技术导则

SL 623-2013 水利水电工程施工导流设计规范

NB/T 10077-2018 堆石混凝土筑坝技术导则

T/CAGHP 021-2018 泥石流防治工程设计规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 阶梯-深潭结构 Step-pool structure

阶梯-深潭结构是大比降山区河流普遍发育的河床结构，阶梯为河道中大石块互锁形成的占据全部河宽的堆积体，深潭因水流对阶梯下游的局部冲刷形成。人工阶梯-深潭结构通过模仿天然阶梯-深潭结构建造而成。

3.2 阶梯-深潭系统 Step-pool system

阶梯-深潭系统由河道中连续的阶梯-深潭结构组成，阶梯和深潭交替出现，纵剖面呈现周期性的起伏变化。

3.3 平滩河宽 Bankfull width

平滩河宽是指水位与河漫滩相平时水面宽，在没有河漫滩的沟道中，通常是主河槽宽度。

3.4 拥堵系数 Jamming ratio

拥堵系数是平滩河宽与大于当地 95%颗粒粒径的石块的粒径 (D_{95}) 的比值。

3.5 关键石块 Keystone

在低于设计洪水的水流条件下不会发生移动的大型石块 (粒径 D_{KS})，其它石块与其叠瓦状互锁，聚集在关键石块周围形成阶梯。

3.6 冲刷深度 Scour depth

冲刷深度是阶梯顶部到深潭底部的垂直高差。

4 总体要求

4.1 应充分考虑阶梯-深潭系统设计和施工的目的和需求。

4.2 应综合考虑施工便利性、工程经济性和维护持久性的要求。

4.3 应选取易发生山洪、泥石流或小规模崩滑的沟道进行治理。

4.4 设计方案应具有较好的针对性，适配目标沟道的特点。

4.5 建造人工阶梯-深潭系统应该包括设计、施工、监测维护等内容。

5 阶梯-深潭系统设计

5.1 一般规定

5.1.1 应根据附录 A 表 A 收集参数，对阶梯位置、冲刷形态、稳定性、能量调控以及平均流速进行设计，其中，冲刷形态计算和能量调控设计需要反复迭代完成。

5.1.2 阶梯-深潭系统的设计洪水流量主要根据当地的防洪标准、综合经济技术指标确定，原则上不宜超过 50 年一遇洪峰流量，防洪标准可参照《防洪标准》(GB 50201-2014) 的有关规定。

5.1.3 针对山洪沟道，结合当地生产生活区划和土地利用情况，宜治理上游高能量流通段和重点保护河段，以减少山洪灾害的破坏作用。

5.1.4 针对泥石流沟道，考虑到人类活动集中在沟口沉积段，宜治理沟道物源段和流通段，以抑制泥石流的启动和输运。

5.1.5 阶梯-深潭结构的布置示意图 B。

5.2 阶梯位置设计

5.2.1 应选择控制性断面作为人工阶梯的优选布设位置。

5.2.2 应选择拥堵系数 J_r 小于等于 5 且河道宽度束窄的位置作为控制性断面，拥堵系数的计

算公式参见附录 C 式 (1-1)。

5.2.3 应根据河道坡降 S 和平均平滩河宽 $(W_S)_a$ ，确定人工阶梯的平均间距 $(L_S)_a$ ，计算公式参见附录 C 式 (1-2)。

5.2.4 如果相邻控制性断面的距离 L （沿水流方向）大于平均平滩河宽 $(W_S)_a$ ，宜根据计算的人工阶梯平均间距 $(L_S)_a$ 对控制性断面之间的河段进行内插，以确定相邻各级阶梯的位置。

5.2.5 各级阶梯的位置确定后，则计算相邻人工阶梯的间距 L_S 。

5.2.6 阶梯位置设计图参见附录 D 图 D.1。

5.3 冲刷形态设计

5.3.1 应计算人工阶梯的地形落差 a ，计算公式参见附录 C 式 (2-1)、(2-2)，人工地形落差宜控制在 0.5-1.5 m 范围内。

5.3.2 应确定阶梯-深潭结构的冲刷形态，以评估结构的稳定性和指导人工阶梯-深潭系统施工，主要包括以下内容：

- a) 计算各级阶梯在设计洪水流量下的冲刷深度 H_S ，计算公式参见附录 C 式(3-1)、(3-2)；
- b) 计算深潭的冲刷坑长度 L_{scour} ，计算公式参见附录 C 式 (3-3)。

5.3.3 如果 5.2.4 中计算得到的阶梯平均间距超过了深潭的冲刷坑长度和相邻关键石块平均粒径 ($L_S > L_{scour} + \overline{D_{KS}}$)，下一级阶梯上游将发育平台结构。

5.3.4 冲刷形态示意图参见附录 D 图 D.2。

5.4 稳定性设计

5.4.1 应计算阶梯-深潭结构破坏的临界冲刷深度 H_{Scri} ，作为结构单元稳定性要求的量化指标，计算公式参见附录 C 式 (4)。

5.4.2 如果 5.3.2 中计算得到的各级阶梯的冲刷深度超过了临界冲刷深度 ($H_S > H_{Scri}$)，宜缩小阶梯间距，以提高阶梯-深潭系统的整体稳定性。

5.5 能量调控设计

5.5.1 能量调控设计的目的是评估阶梯-深潭系统调控水流能量的作用，以实现阶梯-深潭系统逐级消能和稳定河床。

5.5.2 应基于设计洪水流量经逐级迭代计算各级阶梯消耗水流能量的指标，包括各级阶梯处的消能率 n 、水流比能 h_s ，计算公式参见附录 C 式 (5-1)、(5-2)、(5-3)、(5-4)。

5.5.3 能量调控设计示意图参见附录 D 图 D.2

5.5.4 各级阶梯的消能率 n 宜高于 50%，对于消能率低于 50%的阶梯，可增大关键石块粒径或适当增加阶梯宽度。

5.5.5 宜根据水流比能 h_s 是否集中，判识河宽较窄且稳定性受威胁的阶梯结构，增加该级阶梯关键石块粒径或阶梯宽度，并根据 5.5.2 重新计算水流能量指标，直至水流比能沿程均匀分布、无能量集中的情况。

5.6 平均流速设计

5.6.1 应计算设计阶梯-深潭河段的水流阻力，计算公式参见附录 C 式 (6-1)。

5.6.2 应根据设计洪水流量估计河段平均流速 U ，计算公式参见附录 C 式 (6-2)、(6-3)。

5.6.3 河段平均流速 U 一般不宜超过 3 m/s，如果平均流速超过 3 m/s，宜对阶梯-深潭结构进行局部增强，如增加阶梯石块的粒径。

6 阶梯-深潭系统施工

6.1 一般规定

6.1.1 阶梯-深潭系统宜在非汛期施工。

6.1.2 单个阶梯-深潭结构施工应在天然石块转移至阶梯设计位置后进行。

6.1.3 多级阶梯-深潭系统应从上游至下游，逐级建造阶梯-深潭结构，形成消能系统。

6.1.4 施工过程中应尽量因势利导、减少占地，减少对原地貌的破坏。

6.2 单个阶梯-深潭结构

6.2.1 单个阶梯-深潭结构的阶梯布置应垂直于水流方向，阶梯横断面的宽度按 5.2 节确定。

6.2.2 沟道水流较大时，宜进行导流施工，参照《水利水电工程施工导流设计规范》(SL 623-2013)的有关规定执行，降低水流对施工的影响。

6.2.3 应将最大的石块布置在阶梯中部作为关键石块，将石块从底部到关键石块呈叠瓦状互锁排列，各级人工阶梯需满足 5.3 中设计地形落差的要求，叠瓦状阶梯示意图参照附录 E 图 E.1。

6.2.4 宜采用大石块铺设岸石并嵌入岸坡，以提高结构整体的稳定性，保护岸坡、防止坡脚冲刷，岸石布置参见附录 E 图 E.2。

6.2.5 应调整水流跃过阶梯的方向，避免冲刷边坡坡脚，尤其是两岸边坡不稳定时，应将水流设置在沟道中间，水流方向调整示意图参见附录 E 图 E.2。

6.2.6 阶梯下游可开挖形成深潭，深潭的深度和长度分别为冲刷深度 H_s 和冲刷坑长度 L_{scour} ，

按 5.3 节确定，开挖出来的泥沙可转移至阶梯上游或沟道两侧。

6.3 多级阶梯-深潭系统

6.3.1 多级阶梯-深潭系统的阶梯间距按 5.2 节确定。

6.3.2 布置多级阶梯-深潭系统时，依靠人工或机械设备将天然石块逐级铺设，并进行局部调整，确保结构稳定。

6.3.3 应对最下游阶梯加强保护，可增加关键石块粒径或浇筑混凝土增强阶梯石块间的粘结，以防止溯源侵蚀造成阶梯-深潭系统自下游向上游发生逐级破坏，混凝土浇筑技术要求应符合《堆石混凝土筑坝技术导则》（NB/T 10077-2018）的有关规定。

6.3.4 施工结束后，应对逐级结构的参数进行测量，并按照 5.4，5.5 和 5.6 节步骤对人工阶梯-深潭系统进行复核和检验。

6.3.5 对强度不满足设计要求的阶梯-深潭结构，可通过浇筑混凝土加强阶梯石块间的粘结。

6.4 施工迹地修复

6.4.1 施工迹地修复在人工阶梯-深潭系统施工后进行，以促进沟道稳定和生态修复。

6.4.2 宜采用植被恢复的方式进行修复，在沟床阶地区域和松散边坡配置植被措施，参见附录 E 图 E.3。

6.4.3 宜根据施工环境条件，兼顾生态和景观需求，选取寿命长、耐粗放管理的植被进行生态修复，修复技术要求应符合《河湖生态系统保护与修复工程技术导则》（SL/T 800-2020）的有关规定。

7 监测维护

7.1 监测

7.1.1 监测的目的是监控人工阶梯-深潭系统稳定性和对山洪、泥石流灾害的减灾效果。

7.1.2 应根据沟道环境条件确定适宜的监测方式和监测频率，参照《泥石流防治工程设计规范》（T/CAGHP 021-2018）的 9.3.4 条。

7.1.3 可采用人工巡查为主，包括使用无人机巡查和设备开展现场测量，对宏观变形和现场发生的各种情况进行定期的观测、记录。

7.1.4 应基于巡查工作，完成以下监测评估内容：

- a) 测量不同时期的河床结构发育程度，对比结构稳定性和消能功效；
- b) 测量沟道在每次汛期前后的地形，对比不同时期的河床冲淤情况；

c) 测量沟床泥沙颗粒级配，重点测量阶梯的上游段和深潭中的泥沙粒径。

7.1.5 若沟道灾害频发且易损性高，宜根据需要布置具有科研性质的专项监测措施，布设在线监测设备，如雨量计、流速仪、水位计、视频、地声监测仪、次声监测仪等，用于监测记录气象水文条件、泥石流运动要素等内容，具体可参照《泥石流防治工程设计规范》（T/CAGHP 021-2018）的 9.4 条。

7.1.6 应根据需要，定期对阶梯-深潭系统减灾效果进行评估。

7.2 维护

7.2.1 维护的目的是确保人工阶梯-深潭系统能够持续发挥消能减灾功效。

7.2.2 应根据沟道环境条件确定维护成本、维护时间等。

7.2.3 维护过程应减少对沟道地貌和生态环境的破坏。

7.2.4 应重点维护以下要素：

a) 发生局部破坏的阶梯结构，包括关键石块移动、侧向淘刷、局部掩埋等情况，可进行局部调整或混凝土浇筑；

b) 因强输沙事件而被掩埋的深潭，可人工清淤；

c) 因水流和泥沙冲刷受损的植被，可进行局部修复或重新栽种。

7.2.5 维护时间一般为汛期结束后或下一个汛期到来前。

附录 A

(规范性)

阶梯-深潭设计参数表

表 A 阶梯-深潭设计参数表

水文数据		河段平均特征粒径 (m)					目标河段		目标河段上游		地形地貌	
Q_{50} (m ³ /s)	Q_f (m ³ /s)	D_{95}	D_{90}	D_{84}	D_{50}	D_{16}	S	$(W_s)_a$ (m)	S_{up}	W_{up} (m)	DEM	DOM

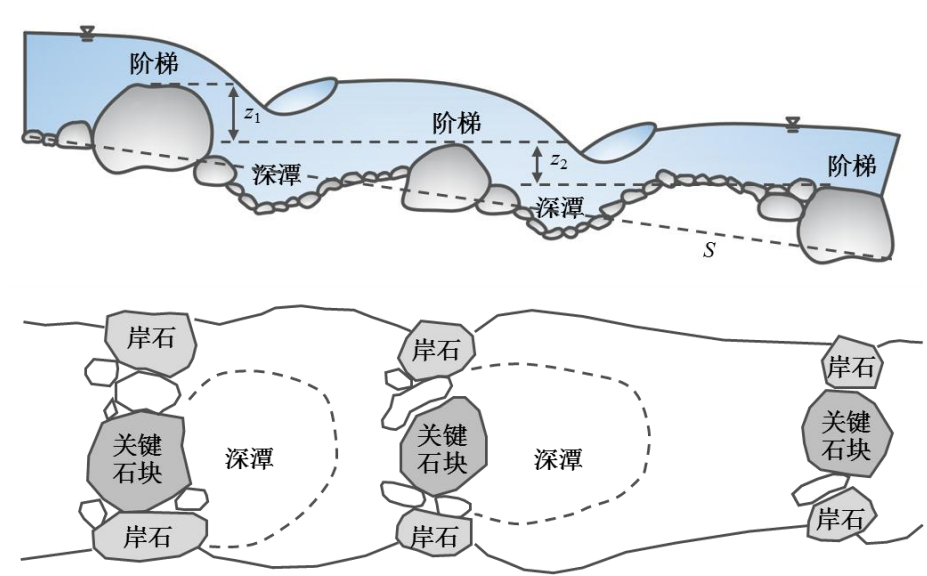
注： Q_{50} 为当地沟道 50 年一遇洪水流量， Q_f 为设计洪水流量； D_{95} 、 D_{90} 、 D_{84} 、 D_{50} 、 D_{16} 为河段平均的特征粒径，分别为大于当地 95%、90%、84%、50%和 16%颗粒的粒径大小； S 为河道坡降； $(W_s)_a$ 为平均平滩河宽； S_{up} 为目标河段上游的河道比降。如果目标河段的坡度和宽度与上游差别较大，则需要提供上游的比降和平均河宽 W_{up} ，是为了计算阶梯-深潭系统进口处流速。地形地貌数据为包括目标河段在内的 DEM（数字高程）和 DOM（正射影像）数据，为计算沿程的河道宽度、床面粒径等信息。

附录 B

(资料性)

阶梯-深潭结构示意图

图 B 阶梯-深潭结构示意图



附录 C

(规范性)

阶梯-深潭系统设计方法计算公式

$$Jr = W_S/D_{95} \quad (1-1)$$

$$(L_S)_a = 1.85(W_S)_a \times S^{0.33} \quad (1-2)$$

式中： Jr 表示拥堵系数； W_S 表示断面平滩河宽； D_{95} 为大于当地 95%颗粒的粒径大小，将作为修建阶梯的原材料； $(L_S)_a$ 为人工阶梯的平均间距； S 为河道坡降； $(W_S)_a$ 为平均平滩河宽。

$$a = 6.17(S - S_{eq})L_S \quad (2-1)$$

$$S_{eq} = 0.95(g^{0.2}D_{90t}^{0.6}q^{-0.4})^{1.90} \left(1 - e^{-0.25\frac{L_S}{h_s}}\right) \quad (2-2)$$

式中： a 为人工阶梯的地形落差，参见附录 D 图 D.2； S_{eq} 为达到冲淤平衡状态的河床坡降； L_S 为人工阶梯的间距； g 为重力加速度； D_{90t} 为梯面局部大于当地 90%颗粒的粒径大小，设计时可选取下一级阶梯上游局部床面颗粒计算； q 为阶梯所在位置的单宽水流流量； h_s 为阶梯处的水流比能，计算参见式 5-4。

$$\frac{H_S}{h_s} = 3.0\left(\frac{a}{h_s}\right)^{0.60} SI^{-0.19} \left(1 - e^{-0.25\frac{L_S}{h_s}}\right) \quad (3-1)$$

$$SI = 0.5 \left(\frac{D_{84}}{D_{50}} + \frac{D_{50}}{D_{16}}\right) \quad (3-2)$$

$$\frac{L_{scour}}{a} = 6.17\left(\frac{h_s}{a}\right)^{0.8} \quad (3-3)$$

式中： SI 为泥沙分选系数，反映泥沙级配的不均匀程度。

$$\frac{H_{Scri}}{h_{c50}} = 1.24 \frac{z}{h_{c50}} + 0.94 \quad (4-1)$$

$$h_{c50} = \sqrt[3]{Q_{50}^2/W_S^2 g} \quad (4-2)$$

式中： h_{c50} 为当地 50 年一遇洪水流量 Q_{50} 对应的临界水深； z 为相邻两级阶梯顶部高程差，参见附录 A 图 B。

$$(h_c)_i = \sqrt[3]{Q_f^2/(W_S)_i^2 g} \quad (5-1)$$

$$(n)_i = 0.23 \left(\frac{(h_c)_i}{(H_s)_i} \right)^{-0.52} \quad (5-2)$$

$$(h_l)_i = n_i \times (H_s + h_s)_i \quad (5-3)$$

$$(h_s)_i = \sum_1^{i-1} z_i + \sum_1^{i-1} h_s - \sum_1^{i-1} h_l \quad (5-4)$$

式中： h_{ci} 为第*i*级人工阶梯临界水深； $(n)_i$ 为第*i*级阶梯消能率 n ； $(h_l)_i$ 为第*i*级水流阶梯能量损失； $(h_s)_i$ 为第*i*级阶梯上的水流比能（动能与水深之和）； Q_f 为设计洪水流量； W_s 为阶梯宽度，其与式（1）的平滩河宽相等； z_i 为第*i*级阶梯落差（阶梯定点与第*(i+1)*级阶梯定点高差）。

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = 1.88 \left(\frac{R}{D_{84r}} \right) \quad (6-1)$$

$$\frac{U}{\sqrt{gRS}} = \sqrt{\frac{8}{f}} \quad (6-2)$$

$$Q_f = Ud(W_s)_a \quad (6-3)$$

式中： f 为达西-魏斯巴赫阻力系数； R 为河段平均的水力半径，可用平均水深 d 和平均平滩河宽 $(W_s)_a$ 简化为矩形断面计算； D_{84r} 为含人工阶梯-深潭结构后的设计河段大于当地 84% 颗粒的粒径大小； S_e 为水流能坡，可根据第一级和最后一级阶梯-深潭结构的落差和水流比能计算； U 为河段平均流速。

需要说明的是，在确定冲刷形态步骤中计算冲刷深度 H_s 和冲刷坑长度 L_{scour} 时也采用了水流比能 h_s ，在能量调控设计步骤中计算水流比能 h_s 时又采用了冲刷深度 H_s ，两个步骤形成互相迭代计算过程，具体地，先通过山区河流水流阻力计算公式（参见式（6-1）、（6-2））得到设计洪水条件下人工阶梯-深潭入口（即最上游阶梯）的水流比能 $(h_s)_1$ ，并基于该最上游阶梯的水流比能 $(h_s)_1$ 计算得到的相应的冲刷深度 H_1 ，然后计算得到第一级阶梯-深潭的消能率 η_1 ，以及水流能量损失 $(h_l)_1$ ，通过迭代计算得到第二级以及后续各级阶梯处的水流比能 h_s 。

附录 D

(资料性)

阶梯-深潭系统设计示意图

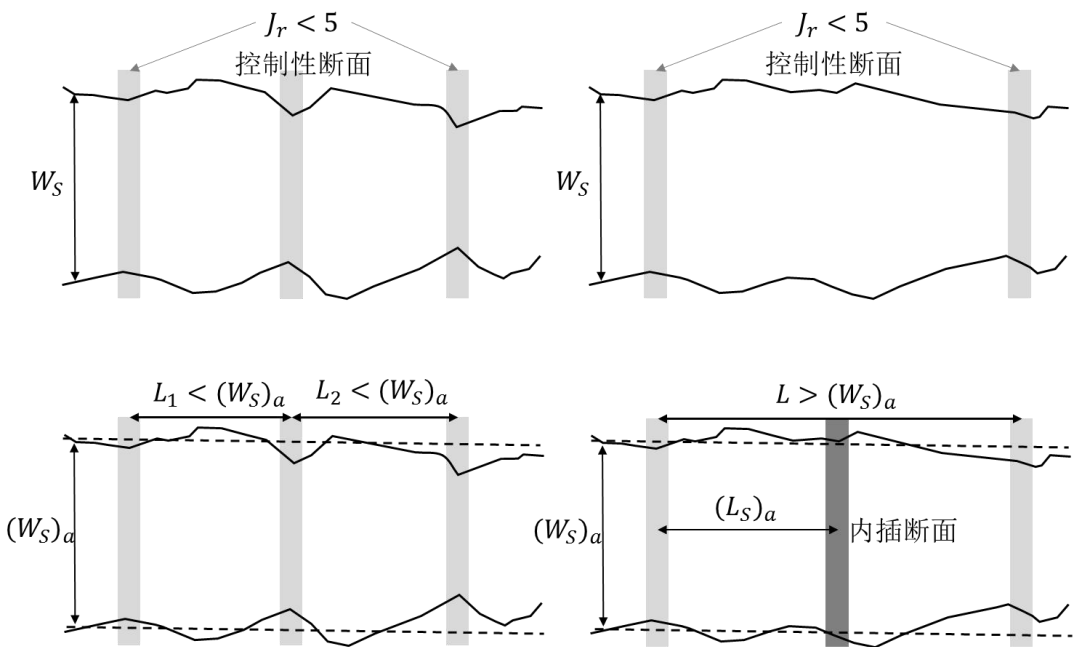


图 D.1 阶梯位置设计示意图

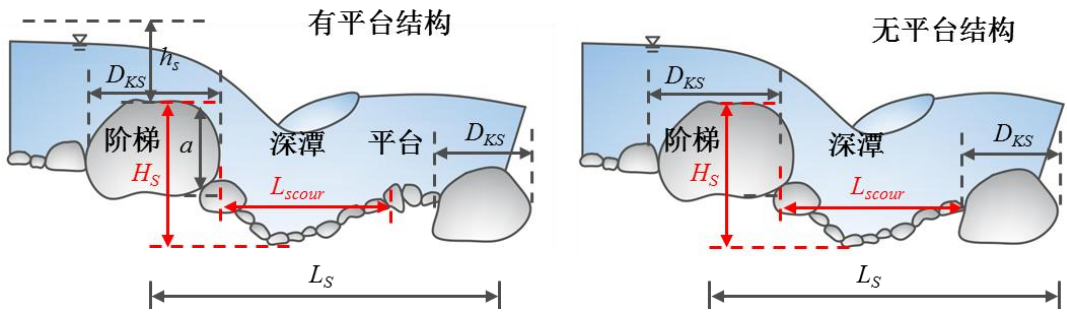


图 D.2 冲刷形态设计示意图

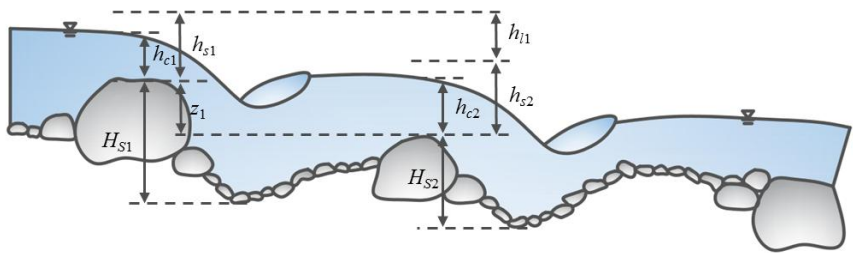


图 D.3 能量调控设计示意图

附录 E

(资料性)

阶梯-深潭系统建造示意图

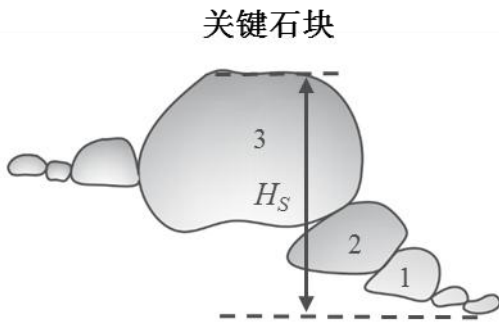


图 E.1 叠瓦状阶梯建造示意图

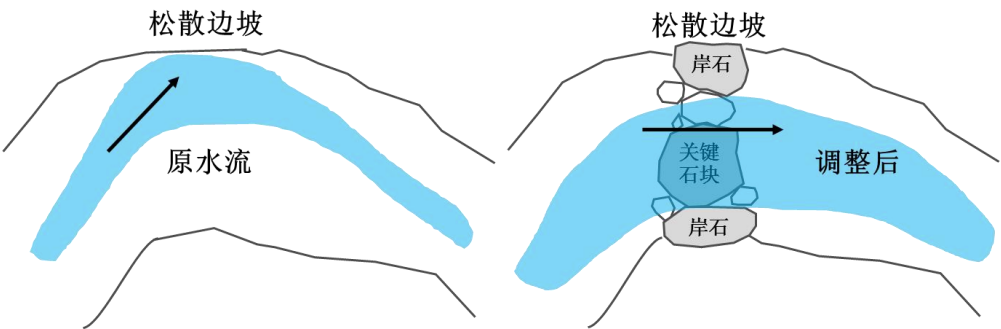


图 E.2 岸石及水流方向调整示意图

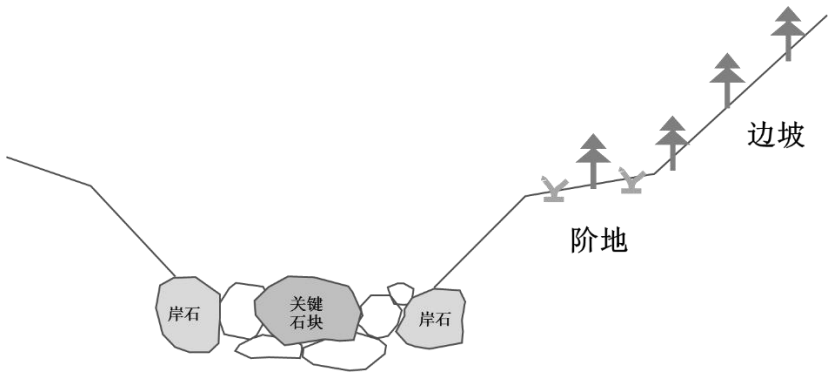


图 E.3 植被恢复示意图