

《黄土高原风水复合侵蚀区水土保持措施精准配置技术指南》

编制说明

《黄土高原风水复合侵蚀区水土保持措施精准配置技术指南》标准编制组

二〇二六年十月

目 录

一、工作简况	1
（一）任务来源	1
（二）协作单位	2
（三）主要工作过程	2
（四）起草组成员及其所做的主要工作	4
二、标准编制原则和确定标准主要内容的论据	5
（一）标准编制原则	5
（二）标准主要内容	5
（三）标准修订项目对比	7
三、主要试验（或验证）的分析、技术经济论证，预期的经济效果	8
（一）主要试验分析	8
（二）技术论证	8
（三）预期效益分析	25
四、标准涉及的相关知识产权说明	25
五、采用国际标准的程度与水平的简要说明	25
六、重大意见分歧的处理经过和依据	26
七、其他应予说明的事项	28

一、工作简况

（一）任务来源

黄河流域生态保护和高质量发展是国家重大战略，多沙粗沙区是黄河中游水土流失和泥沙来源的重点区域，受干旱半干旱气候、强风活动与集中降雨共同影响，风蚀、水蚀及其复合侵蚀问题突出。现有治理措施在区域适配性、配置精度和综合效益方面仍有提升空间。亟需制定科学、统一、可操作的技术规程，为黄土高原风水复合侵蚀区水土保持措施的科学分区、精准配置、规范实施及治理成效评价提供技术支撑。

为此，经中国林学会批准立项，由北京林业大学牵头，联合水利部水土保持监测中心、内蒙古自治区林业科学研究院、内蒙古农业大学等单位共同组成编制组。本标准编制工作依托国家重点研发计划项目“黄河中游多沙粗沙区风水复合侵蚀协同治理技术与示范”（项目编号：**2022YFF1300800**）所属课题“风水复合侵蚀产沙模拟与治理措施优化配置技术”（课题编号：**2022YFF1300804**）开展。围绕黄河中游多沙粗沙区风水复合侵蚀过程、侵蚀产沙模拟、侵蚀分区识别、治理措施优化配置及治理成效评价等开展了系统研究，为本标准中风水复合侵蚀分区、水土保持措施精准配置以及治理效果监测与评价等技术内容提供了较为扎实的理论基础、数据支撑和技术储备。编制组在系统整合上述项目形成的长期定位观测数据、区域调查成果及技术试验示范经验的基础上，经广泛调研和深入研讨，形成本标准草案。

制定本标准旨在规范黄土高原风水复合侵蚀区水土保持措施精准配置技术，明确不同侵蚀类型下的措施选择、组合配置与效果评价要求，提升治理措施的针对性、协同性和适用性，为区域水土流失综合治理、生态保护修复及治理效益提升提供技术支撑。

（二）协作单位

北京林业大学、水利部水土保持监测中心、黄河流域水土保持生态环境监测中心、内蒙古自治区林业科学研究院、内蒙古农业大学、北京水保生态工程咨询有限公司、黄河水土保持西峰治理监督局（黄河水利委员会西峰水土保持科学试验站）。

（三）主要工作过程

起草单位组织专家成立编写组，制定实施方案，开展标准编制工作。主要工作过程如下：

1.前期准备阶段

2022 年 9 月—2026 年 4 月，依托相关国家重点研发计划项目，系统开展风水复合侵蚀特征、治理分区、措施配置及治理成效评价等研究，为标准编制提供技术和数据基础。

2.立项阶段

2026 年 5 月，编制组向中国林学会提交立项申请书，经审查批准立项，正式列入中国林学会 **2026 年**团体标准制修订计划。

3.起草阶段

2026 年 5 月—7 月，编制组在前期研究成果基础上，开展资料整

理、标准比对和技术论证，完成标准框架设计、主要技术内容起草及征求意见稿编制。

4.征求意见阶段

2026年**7**月，中国林学会向相关高校、科研院所等广泛征求意见，收到来自北京林业大学、中国林业科学研究院、南京林业大学、宁夏农林科学院、西北农林科技大学等单位提出的**54**条修改意见。

5.修改阶段

2026年**8**月—**9**月，编制组对反馈意见进行汇总、分类和整理，并于**2026**年**8**月**10**日组织专题讨论，逐条研究处理，对存在分歧的关键技术问题进行研讨论证，会后针对讨论会内容开展修改，形成标准送审稿。

6.审查阶段

2026年**9**月**11**日，中国林学会在北京组织召开了标准审定会。来自中国林业科学研究院、北京林业大学、北京师范大学、水利部水利水电规划设计总院、中国水利水电科学研究院等单位的**7**位专家组成审查委员会。审查委员会听取了编制组关于标准编制背景、主要技术内容、征求意见处理情况的汇报，对标准送审稿进行了逐章逐条审查和质询。经充分讨论，审查委员会认为该标准送审材料齐全，技术指标科学合理，具有可操作性，一致同意通过审查，并提出如下主要修改意见：

(1) 将标准名称修改为《黄土高原风水复合侵蚀区水土保持措施精准配置技术指南》。

(2) 删除术语中的水土保持措施、配置单元；删除治理区域与划分中的土壤侵蚀特征、方向；删除第八章治理效益监测与评估。

(3) 整合第六章与第七章相关内容。

7.报批阶段

2026年9月下旬，编制组根据审查委员会意见对标准送审稿进行了逐条修改，形成了标准报批稿，并同步完善了编制说明、征求意见汇总处理表及审查会议纪要等配套材料，提交中国林学会审核批准。

(四) 起草组成员及其所做的主要工作

成员	职务/职称	单位	主要工作
牛健植	教授	北京林业大学	大纲撰写、工作统筹与综合协调
余新晓	教授	北京林业大学	
赵永军	副厅/高级工程师	水利部水土保持监测中心	负责章节内容编制、资料整理与文本起草
樊登星	副教授	北京林业大学	
李斌斌	处长	水利部水土保持监测中心	
丛佩娟	处长	水利部水土保持监测中心	
高云飞	主任/正高	黄河流域水土保持生态环境监测中心	提供专业性指导，参与标准主要技术内容审查与关键问题论证；协调标准文本修改完善，重点把关标准的科学性、规范性、适用性和可操作性。
贾国栋	教授	北京林业大学	
秦富仓	院长/教授	内蒙古自治区林业科学研究院	
岳永杰	院长/教授	内蒙古农业大学	
豆海冬	博士研究生	北京林业大学	
杨涛	博士研究生	北京林业大学	
王阳阳	博士研究生	北京林业大学	
王欲坤	博士研究生	北京林业大学	
张文星	主任/工程师	水利部水土保持监测中心	
常晟伟	高级工程师	北京水保生态工程咨询有限公司	
姬俊虎	高级工程师	水利部水土保持监测中心	
殷宝库	副主任/正高	黄河流域水土保持生态环境监测中心	
洪光宇	副研究员	内蒙古自治区林业科学研究院	
周正立	教授	塔里木大学	
吕瑞恒	副教授	塔里木大学	

张建国	科长/高级工程师	黄河流域水土保持生态环境监测中心	
朱鹏飞	工程师	北京水保生态工程咨询有限公司	
吴处处	工程师	水利部水土保持监测中心	
袁鹏超	工程师	黄河水土保持西峰治理监督局(黄河水利委员会西峰水土保持科学试验站)	
赵鹏武	高级实验师	内蒙古农业大学	
王宁	研究员	内蒙古农业大学	

二、标准编制原则和确定标准主要内容的论据

(一) 标准编制原则

1.科学性原则。以黄土高原风蚀、水蚀及风水复合侵蚀发生规律和治理需求为基础，结合实地调查、监测数据、试验研究和模型分析结果，科学确定治理分区、侵蚀类型判定、措施配置等技术内容。

2.协调性原则。与现行水土保持、生态治理及林草工程相关国家标准、行业标准和团体标准相衔接，已有成熟技术原则上直接引用或协调采用，避免技术要求之间出现矛盾和重复。

3.适用性原则。充分考虑黄土高原不同区域在气候、地形、土壤、植被和侵蚀特征等方面的差异，针对不同侵蚀类型、强度及立地条件提出相应治理措施和配置要求，提高标准的区域适用性。

4.可操作性原则。技术指标和参数优先采用现行标准、成熟研究成果及实测验证结果，明确治理措施适用条件、配置方法，使标准内容能够用于实际工程设计和治理实施。

(二) 标准主要内容

本文件共设置 **6** 个部分及 **2** 个附录，主要包括范围、规范性引用

文件、术语和定义、基本规定、治理区域与划分、治理措施精准配置等内容。标准编制过程中需要重点说明的技术内容及其确定依据如下。

1.治理区域与划分

主要包括区域范围、治理分区和治理体系，具体分区范围、行政区划、分区特征及防治重点见附录 A。区域范围依据黄土高原自然地理条件、风水复合侵蚀分布特征及相关研究成果确定。治理分区以风蚀能量贡献率 and 水土流失特征为主要依据，以 **45%** 与 **55%** 为界，将风水复合侵蚀区划分为风蚀主导型、风水均衡型和水蚀主导型，各类型区的空间范围及涉及行政单元见附录 A。

治理体系以治理分区为基础、以地块为载体，统筹工程、生物和农业措施。风蚀主导型以防风固沙、增加地表覆盖和降低近地表风速为重点，并兼顾坡面径流调控；水蚀主导型以坡面减流减蚀、沟头防护、沟坡稳定和沟道消能拦沙为重点；风水均衡型兼顾防风固沙与水沙调控，重点控制风、水作用下泥沙的连续迁移过程。

2.治理措施精准配置

主要包括工程措施、生物措施和农业技术措施。依据风水复合侵蚀类型、侵蚀强度、地貌部位、土地利用及立地条件，综合确定措施类型、配置位置、组合方式和主要技术参数。相关技术要求主要依据 **GB 51018**、**GB/T 16453.1**、**GB/T 16453.2**、**GB/T 16453.3**、**GB/T 16453.5**、**SL/T 804**、**LY/T 2986**、**LY/T 2996** 等现行标准，并结合典型区域实地调查、风洞与模拟降雨试验、治理工程调查及项目研究成果综合确定。其中，工程措施包括沙障固沙、化学固沙、梯田、淤地

坝、谷坊及柔性坝等；生物措施包括封育管理、水土保持造林、水土保持种草及结皮措施；农业技术措施包括等高耕作、覆盖耕作、留茬、少耕免耕、间作轮作套作及土壤改良等。

措施配置遵循“分区确定治理方向、地块确定措施类型、立地条件确定技术参数”的原则。风蚀主导型区域以降低近地表风速、稳定地表和控制风沙输移为重点，优先配置沙障、固沙、林草恢复及保护性耕作措施；水蚀主导型区域以削减坡面径流、控制沟蚀发展和拦蓄泥沙为重点，合理配置梯田、沟头防护、谷坊、淤地坝及水土保持林草措施；风水均衡型区域兼顾风沙防护与径流泥沙调控，优先采用具有防风、固土、减流和拦沙等综合效益的组合措施。不同治理分区及配置单元的措施类型、适用条件和主要配置参数详见附录 B，以实现治理措施由区域分区向具体地块的精准落实。

（三）标准修订项目对比

已有标准编号	标准内容	新旧标准对比
GB 51018-2014 水土保持工程设计规范	主要规定水土保持工程总体设计及各类工程措施的设计要求。	沿用成熟工程技术要求，在此基础上结合风水复合侵蚀类型、强度及立地条件，进一步明确水土保持措施的分区配置和组合应用要求。
GB/T 16453.1-2008 水土保持综合治理技术规范 坡耕地治理技术	主要针对坡耕地水土流失治理。	参考坡面治理措施及有关技术参数，并根据风水复合侵蚀特征补充不同侵蚀类型和立地条件下的措施选择与精准配置要求。
GB/T 16453.2-2008 水土保持综合治理技术规范 荒地治理技术	主要规定荒地水土保持治理措施及技术要求。	沿用适用的林草及工程治理技术，并结合区域侵蚀动力、植被和地形条件，对措施适宜性及组合配置进行细化。

GB/T 16453.3-2008 水土保持综合治理技术规范 沟壑治理技术	主要针对沟壑区沟头、沟坡和沟道治理。	参考沟壑治理措施及主要参数,并结合沟蚀发育特征和水沙输移过程,对沟头防护、沟坡治理及沟道拦蓄措施的配置条件进行完善。
GB/T 16453.5-2008 水土保持综合治理技术规范 风沙治理技术	主要规定风沙区防风固沙治理技术。	沿用成熟的风沙治理措施,并结合风水复合侵蚀特征,增加物理、生物、农业技术和化学固沙措施的分类配置及组合应用要求。
LY/T 2986-2018 沙障技术规程、 LY/T 2996-2026 沙障施工技术规程、 SL/T 804-2020 淤地坝技术规范		相关术语、技术参数、措施设置及施工要求原则上沿用或参考现行标准规定;重点从风水复合侵蚀治理需求出发,对不同措施的适用条件、配置位置和组合方式进行集成与衔接,不重复规定已有成熟技术内容。

三、主要试验（或验证）的分析、技术经济论证，预期的经济效果

（一）主要试验分析

围绕《黄土高原风水复合侵蚀区水土保持措施精准配置技术指南》团体标准中治理分区与治理措施精准配置及配置参数等关键技术内容，依托国家重点研发计划项目研究成果，开展典型区域实地调查、样地监测、无人机遥感、风蚀与水蚀室内试验及模型模拟验证，对不同立地条件下工程、林草、耕作及组合措施的适用性和减蚀减沙效果进行分析，并结合已有研究成果和现行标准，对关键技术参数、配置要求及评价方法进行综合论证。

（二）技术论证

1.基于侵蚀能量的治理区划

（1）研究内容

针对风蚀和水蚀在动力机制、评价指标及量纲方面存在差异,传统风蚀模数与水蚀模数难以直接叠加比较的问题,以黄河中游多沙粗沙区为研究对象,分别计算风蚀能量和水蚀能量,并通过统一量纲处理构建风水复合侵蚀能量指标。

重点分析风蚀能量、水蚀能量和总侵蚀能量的年际变化、空间分异及相对贡献关系,验证以侵蚀能量相对贡献划分风蚀主导型、水蚀主导型和风水均衡型的合理性,为标准中复合侵蚀治理分区及后续措施配置提供技术依据。

(2) 研究方法

①风蚀能量可通过大气动能来表征,按附录 A 相关公式计算有效风蚀能量,试验研究中以 10 m 高度风速为基础,取 7 m/s 作为风蚀能量计算的临界风速,低于临界值的风速不计入有效风蚀能量。因此,采用单位质量能量来表征风蚀能量强度,计算公式如下:

$$E_w = \frac{1}{2} v^2 \dots\dots\dots (1)$$

$$EE_w = \frac{\sum (E_w - E_{w0}) m}{M} \dots\dots\dots (2)$$

式中: E_w —单位质量空气的动能, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$; v —10m 高度的风速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; m —不同风速下运动的空气质量, kg ; M —累计时间内运动的总空气质量, kg ; E_{w0} 表示阈值风速的动能, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

②水蚀能量强度采用单位质量降水动能来表征,计算公式如下:

$$E_R = \begin{cases} 11.9 + 8.73 \log_{10} I, & I \leq 76 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} \\ 28.3, & I > 76 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} \end{cases} \dots\dots (3)$$

$$EE_R = \frac{\sum E_R P}{Q} \dots\dots\dots (4)$$

式中： E_R —水蚀能量， $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\text{mm}^{-1}$ 或 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ； I —降雨强度， $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ； P —降雨深度， mm ； Q —累计降雨深度， mm ； EE_R —单位质量水蚀能量， $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

注：连续 6 h 降雨大于 10mm 的定为侵蚀性降雨。

③分别获得 1990-2020 年逐年及多年平均风蚀、水蚀能量数据后，采用 Mann-Kendall 趋势检验和 Sen 斜率分析其变化趋势，并开展空间分布分析。

④在统一量纲基础上计算总侵蚀能量，风蚀能量贡献率按式（5）计算：

$$P_E = \frac{EE_R}{EE_R + EE_w} \times 100\% \dots\dots\dots (5)$$

式中： P_E ——风蚀能量贡献率。

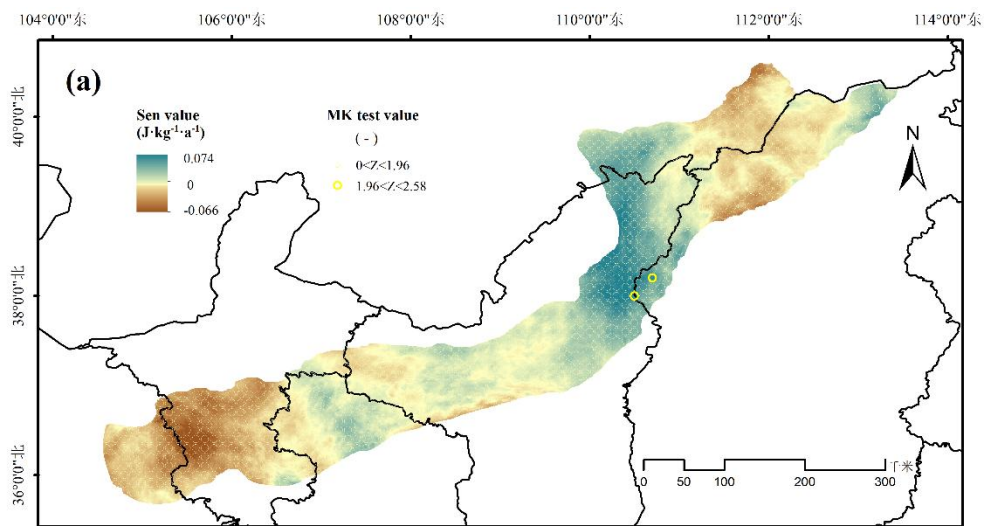
（3）研究结果

①风蚀能量空间分布及变化

1990—2020 年黄土高原风水复合侵蚀区单位质量风蚀能量年际变化总体呈波动下降趋势。研究期间风蚀能量在不同年份间变化幅度较大，其中 2000 年和 2010 年前后出现相对高值，2010 年以后总体呈下降态势，表明研究区近年单位质量风蚀能量整体有所减弱。MK-Sen 趋势分析表明，研究区 Sen 斜率介于约 $-0.066 \sim 0.074 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ ，风蚀能量增加区主要分布于研究区中部至北部过渡地带；

减少区则主要分布于西南部及东北部，表现出较连续的下降特征。**MK** 检验结果显示，多数区域虽然存在一定的增加或减少趋势，但其长期变化尚未达到显著水平。

从多年平均空间分布来看，**1990—2020** 年黄土高原风水复合侵蚀区单位质量风蚀能量约为 **6.92 ~ 17.00 J·kg⁻¹·a⁻¹**，空间异质性较为明显。高值区主要分布于研究区中西部、中央过渡带及北部偏西区域，形成一定的连续高值带；低值区则主要分布于西南部边缘以及东北部东侧区域。结合图 **1a** 和图 **1b** 可以看出，多年平均风蚀能量的高低与其变化趋势并非完全一致，部分高能量区仍表现出增加趋势，而部分低值区则呈下降或相对稳定状态，表明研究区风蚀能量的空间格局在 **1990—2020** 年间发生了一定调整。总体而言，中部至北部部分区域既具有较高的多年平均风蚀能量，又表现出持续增加趋势。



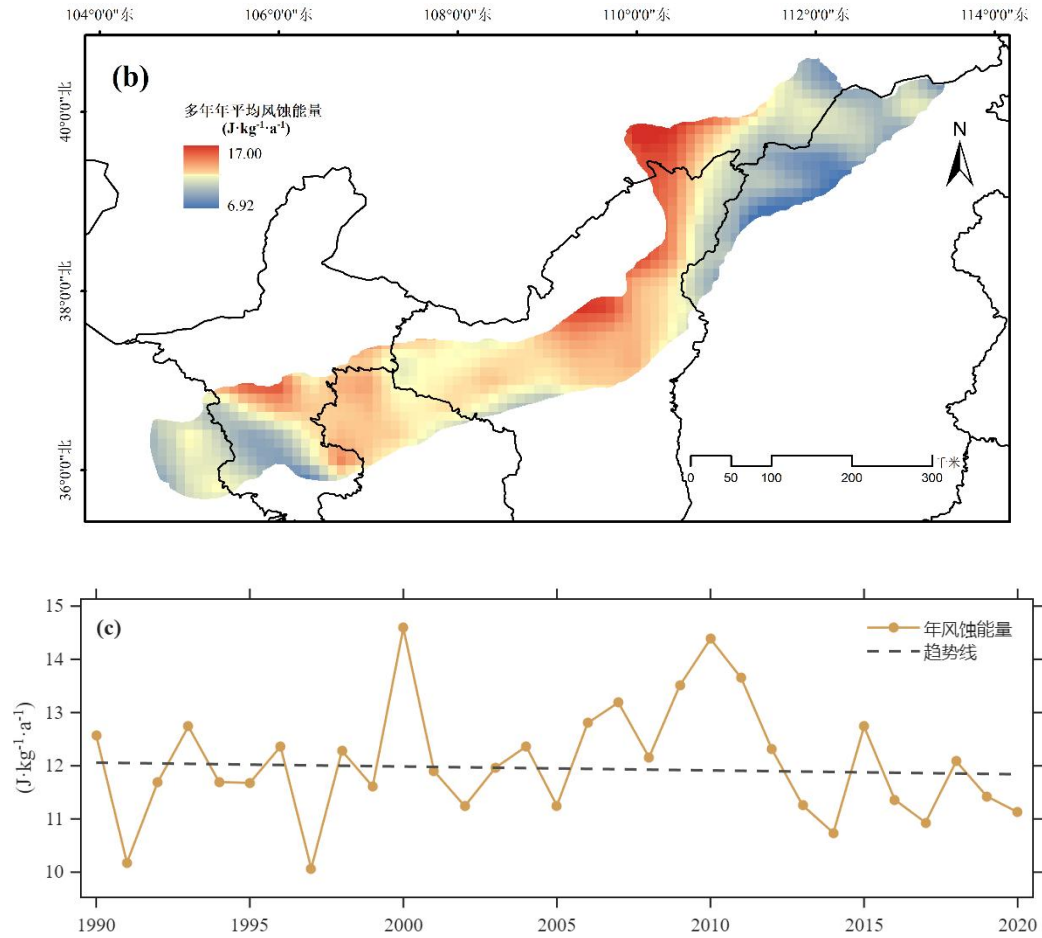


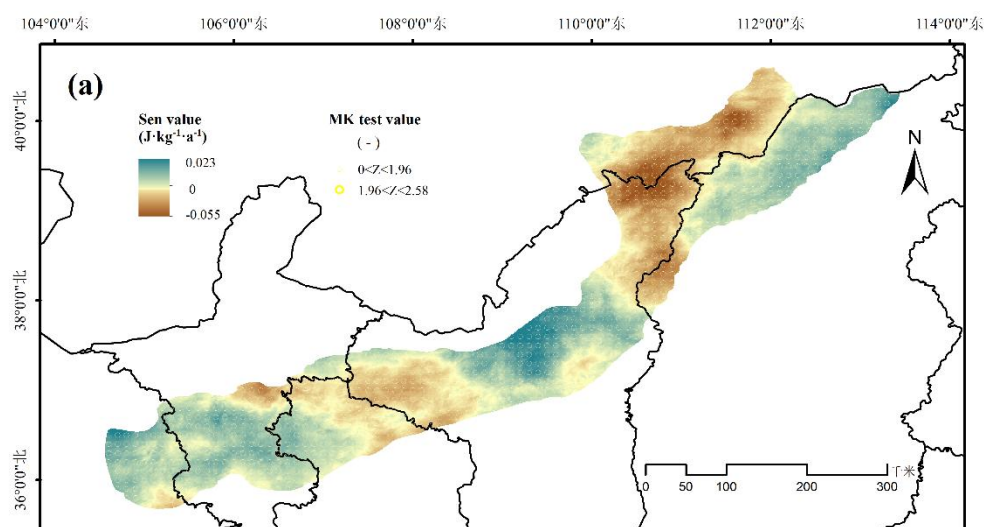
图 1 1990-2020 年风水复合区单位质量风蚀能量变化趋势及多年平均风蚀能量分布
(a)风蚀能量 MK-Sen 趋势检验分布;(b)多年平均风蚀能量空间分布;(c)逐年平均风蚀能量变化; $Z>1.96$ 和 $Z>2.58$ 分别表示显著性水平 95%和 99%

②水蚀能量空间分布及变化

1990—2020 年研究区单位质量水蚀能量变化趋势及分布如图 2 所示。31 年间，研究区单位质量水蚀能量总体呈波动下降趋势，年际变化较为明显。研究期间水蚀能量在 1995-1996 年出现较高值，随后整体有所下降，2000 年前后达到阶段性低值；2001 年以后虽存在多次波动回升，但长期趋势线仍表现为缓慢下降。MK-Sen 趋势分析表明，研究区水蚀能量变化具有明显的空间异质性，Sen 斜率约为 $-0.055 \sim 0.023 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ，增加与减少趋势并存。其中，增加趋势区主要分布于研究区西南部及中部部分区域，减少趋势区主要分布于中

北部和东北部，且通过 **95%**和 **99%**显著性检验的区域相对有限，说明多数区域水蚀能量虽具有一定变化趋势，但整体显著性不强。

从多年平均空间分布来看，研究区单位质量水蚀能量约为 **8.72 ~ 12.43 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$** ，整体呈现由西南向东北逐渐升高的空间格局。低值区主要集中于研究区西南部，高值区则主要分布于中北部至东北部区域，并形成较为连续的高值带。结合图 **2a** 和图 **2b** 可以看出，水蚀能量多年平均高值区与其长期变化趋势并不完全一致，中北部和东北部部分高能量区呈下降趋势，而西南部部分低能量区则表现为一定的增加趋势。总体而言，研究区水蚀能量虽然长期表现为缓慢下降，但中部及局部西南区域仍存在增强趋势。



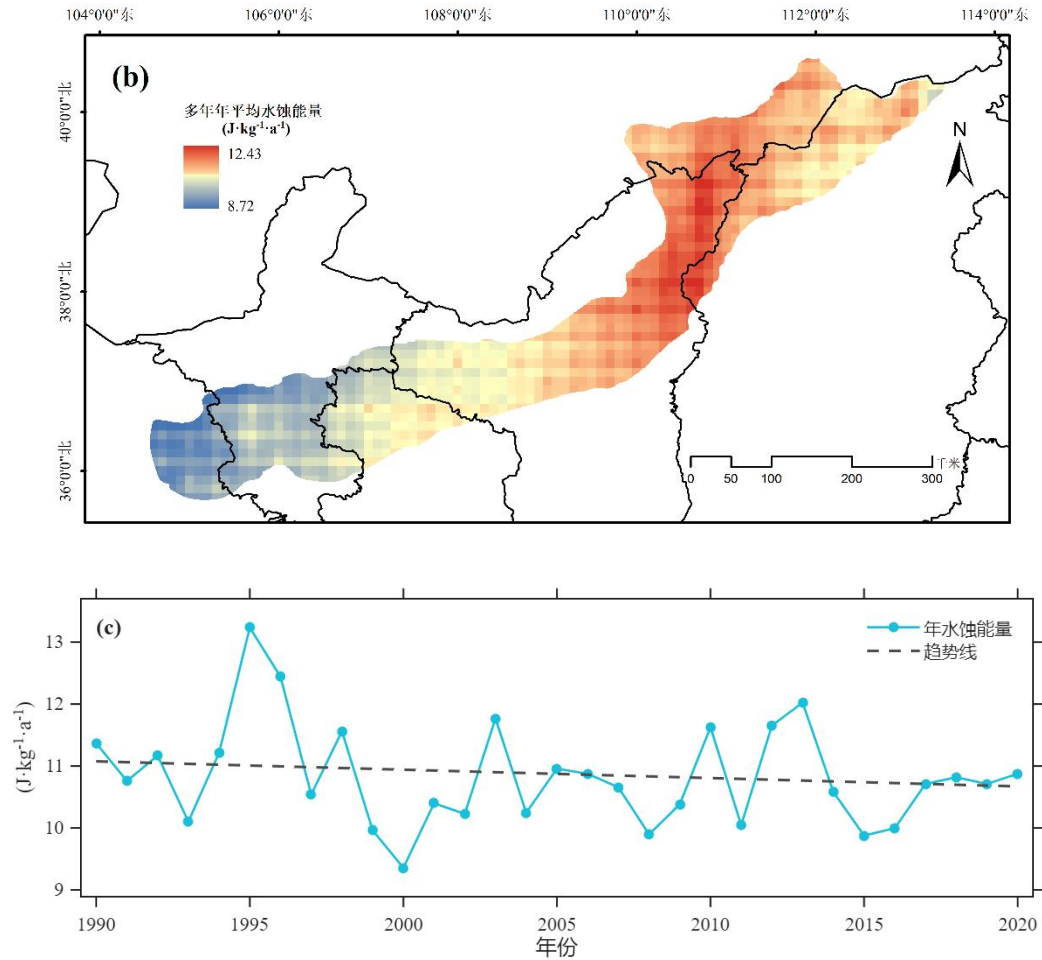


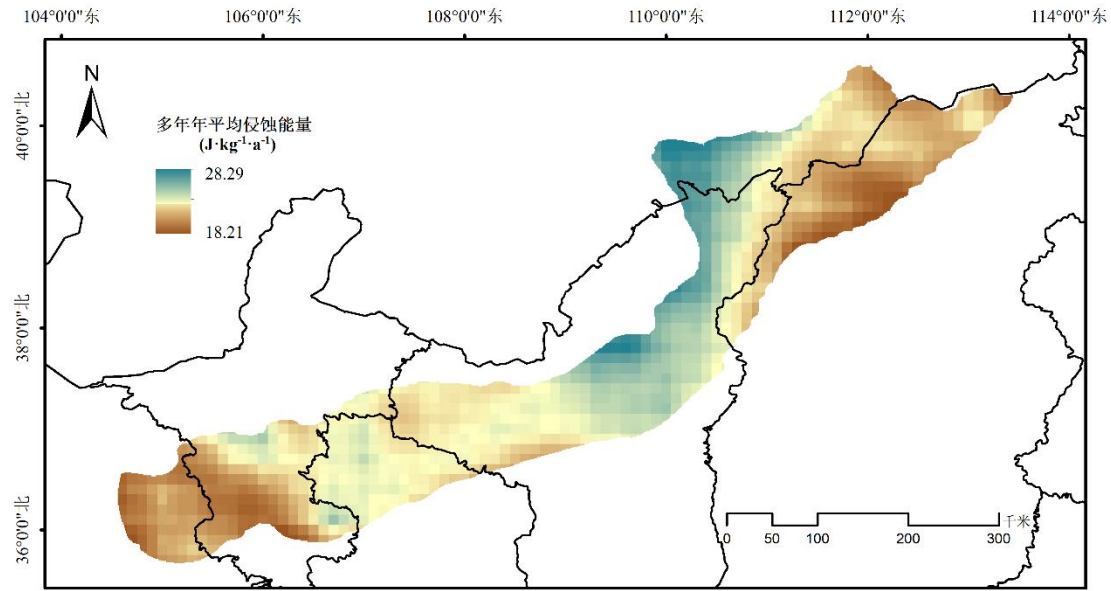
图 2 1990-2020 年风水复合区单位质量水蚀能量变化趋势及多年平均水蚀能量分布
(a)水蚀能量 MK-Sen 趋势检验分布;(b)多年平均水蚀能量空间分布;(c)逐年平均水蚀能量变化; $Z>1.96$ 和 $Z>2.58$ 分别表示显著性水平 95%和 99%

③总侵蚀量及风水贡献关系

经统一量纲处理后，研究区多年平均总侵蚀能量约为 $18.21 \sim 28.29 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ，整体呈现由西南部较低、向中部逐渐升高、至东北部再次降低的空间变化特征。其中，较高值区主要集中于研究区中部至中北部过渡区域，并形成较为连续的高值带；西南部及东北部部分区域总侵蚀能量相对较低，表明研究区风水复合侵蚀能量具有明显的空间非均一性。风蚀能量贡献率（RE）介于 $38.01\% \sim 62.45\%$ 之间，其空间分布与总侵蚀能量并不完全一致。总体来看，风蚀贡献率在研究区西南部及中西部相对较高、东北部部分区域较低。依据风蚀能量

贡献率可进一步划分风蚀主导型（**WD**）、风水均衡型（**CWR**）和水蚀主导型（**RD**）：当 $RE > 55\%$ 时为风蚀主导型， $45\% \leq RE \leq 55\%$ 时为风水均衡型， $RE < 45\%$ 时为水蚀主导型。由图 3 可见，研究区不同部位风、水侵蚀贡献存在较强的空间分异，反映出风水复合侵蚀作用在区域尺度上的差异性。

如图 4 所示，1990—2020 年研究区的风蚀能量占比与总侵蚀能量呈现正向关系，其拟合关系为 $y = -0.0008385x^2 + 0.05628x - 0.33668$ 。该关系表明，在总侵蚀能量较低的区域，水蚀贡献相对较高；随着总侵蚀能量增加，风蚀作用逐渐增强，部分区域由水蚀主导或风水均衡状态向风蚀主导状态过渡。但由于拟合曲线呈开口向下的非线性特征，风蚀贡献率随总侵蚀能量增加的增幅逐渐减小，说明区域总侵蚀能量的增强并非完全由单一侵蚀动力控制，而是风、水两种侵蚀动力共同作用的结果。



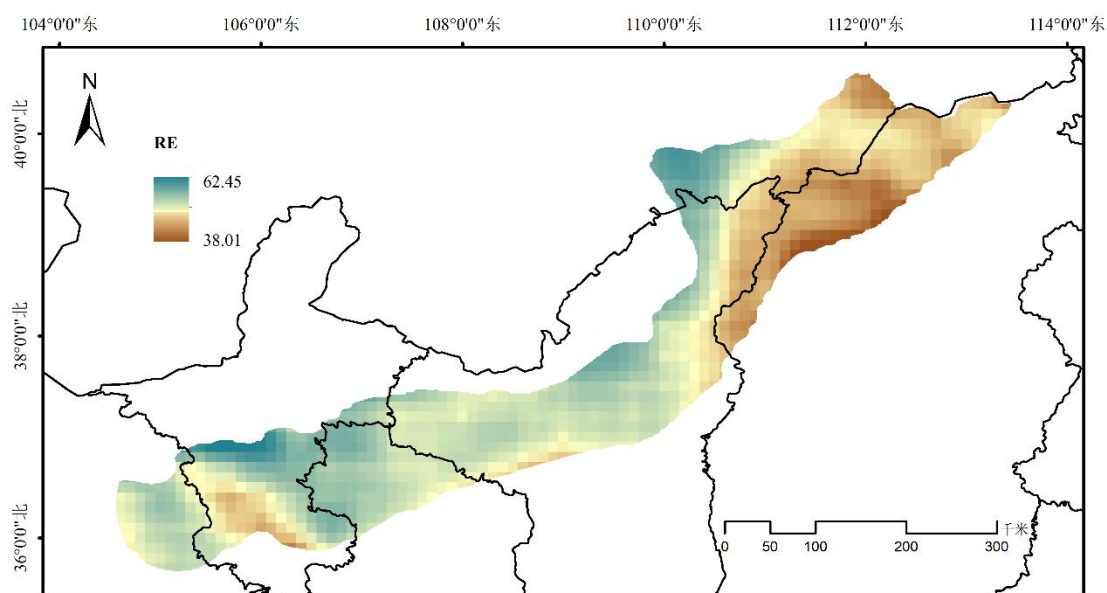


图 3 1990-2020 年黄河中游多沙粗沙区多年平均侵蚀能量空间分布(上)与风蚀能占比(下)
(RE: 风蚀能量与风水能量的比值)

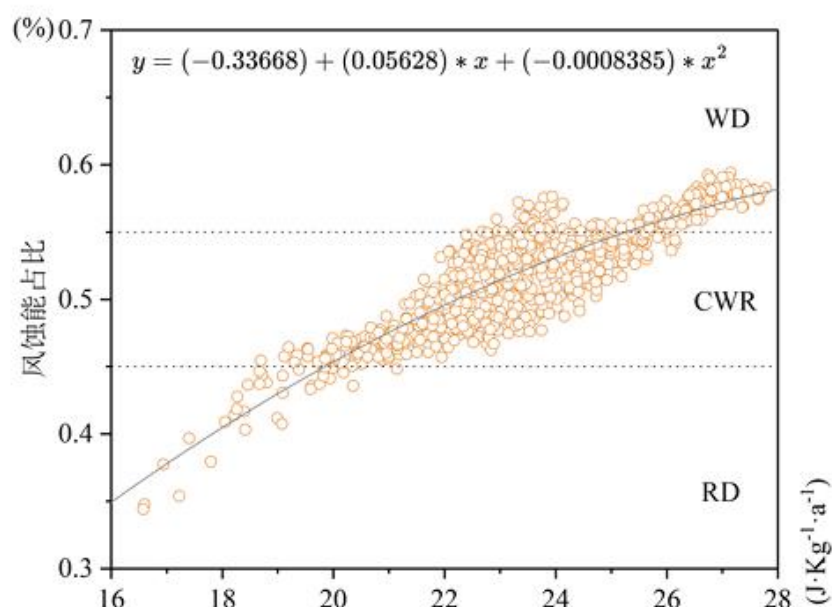


图 4 1990-2020 年不同等级侵蚀能量中风蚀能量占比分析图
(其中, WD:风蚀能主导; CWR:风水能量; RD: 水蚀能主导)

(4) 参数转化的合理性与可行性分析

研究结果表明,风蚀和水蚀动力具有明显的空间分异,而传统风蚀模数和水蚀模数由于计算机理、量纲及数值范围不同,不宜直接求和或比较。因此,本标准采用统一量纲的侵蚀能量进行复合侵蚀类型判定,并分别采用风蚀模数和水蚀模数评价单项侵蚀强度。

45%和**55%**的类型分界不作为自然界绝对临界值，而是在风、水贡献率**50%**为均衡中心的基础上，结合**1990—2020**年区域**RE**实际分布、空间连续性等不同主导区空间特征综合确定。因此，在标准中将其作为治理区划技术判据具有明确的数据基础。

最终形成“侵蚀能量贡献率确定复合侵蚀类型—单项侵蚀模数确定侵蚀强度—地貌部位和土地利用确定具体措施配置”的技术逻辑。该方法能够避免风蚀、水蚀指标直接比较造成的量纲差异，同时可在**GIS**和遥感数据基础上实现空间计算，具有较好的区域推广性和实际操作条件。

2.农地耕作措施

（1）研究内容

针对风蚀主导区及风水均衡区农地裸露期风蚀问题，采用野外调查与风洞模拟相结合的方法，对传统翻耕、玉米留茬、玉米秸秆覆盖以及玉米留茬+覆盖**4**种地表状态开展对比试验。试验重点分析不同耕作措施下近地表风速、摩阻风速、起沙特征、风蚀量和输沙量变化，明确留茬高度和地表覆盖度对风蚀过程的影响，为标准中保护性耕作措施的选择及组合配置提供依据。

（2）研究方法

①样地调查

在每种农田上选取**200m×200m**的样方作为试验区，在每个试验区内随机选取**3**个**20m×20m**样方作为每种农田的样点，采用五点取样法在每个试验区**3**个样点内（每个样点取**5**个**1m×1m**的小样方）

取样并测量地表覆盖特征。玉米留茬地测量留茬的高度、直径及留茬密度，玉米秸秆覆盖农田测量覆盖度，玉米留茬+覆盖农田则需测定留茬高度、直径、密度及覆盖度，各样地地表覆盖情况见表 1。

表 1 农田地表特征

措施类型	残茬覆盖度 (%)	留茬株高 (cm)	土壤容重 (g/cm ³)	土壤硬度 (kg/cm ²)
玉米留茬+覆盖	73.4±5.8	18±3.8	1.7±0.25	1.70±0.51
玉米留茬	13.4±1.2	23±0.1	1.4±0.23	0.67±0.02
玉米秸秆覆盖	17.3±5.5	0	1.6±0.27	1.30±0.16
传统翻耕	0	0	1.2±0.26	0.30±0.01

②风洞试验

为了保证试验结果的有效性,试验时风洞的轴心风速设计为 **8m/s、12m/s、16m/s、20m/s、24m/s** 五个等级，每个风速的吹蚀时间均为 **30min**，试验按照风速由小到大的顺序进行。风速采用皮托管与补偿式微压计组合测定，主要测定了 **1cm、3cm、5cm、8cm、10cm、13cm、15cm、18cm、20cm、25cm、30cm** 各高度的风速。每个风速吹蚀结束后取下原状土箱再次称重，用塑封袋收集集沙仪里的风蚀物并进行称重，按高度层（**0-5 cm、5-10cm、10-15cm、15-20cm、20-30cm、30-40cm、40-50cm、50-60cm**）取下导电胶带送入电镜实验室进行电镜扫描分析。

（3）研究结果

①不同土地覆盖条件的摩阻风速

试验结果表明（图 5），传统翻耕农田最易起沙，留茬+覆盖措施综合抗风蚀效果最好，说明留茬和覆盖通过增加地表粗糙度、降低近地风速和提高起沙阻力，可有效降低农田风蚀风险。

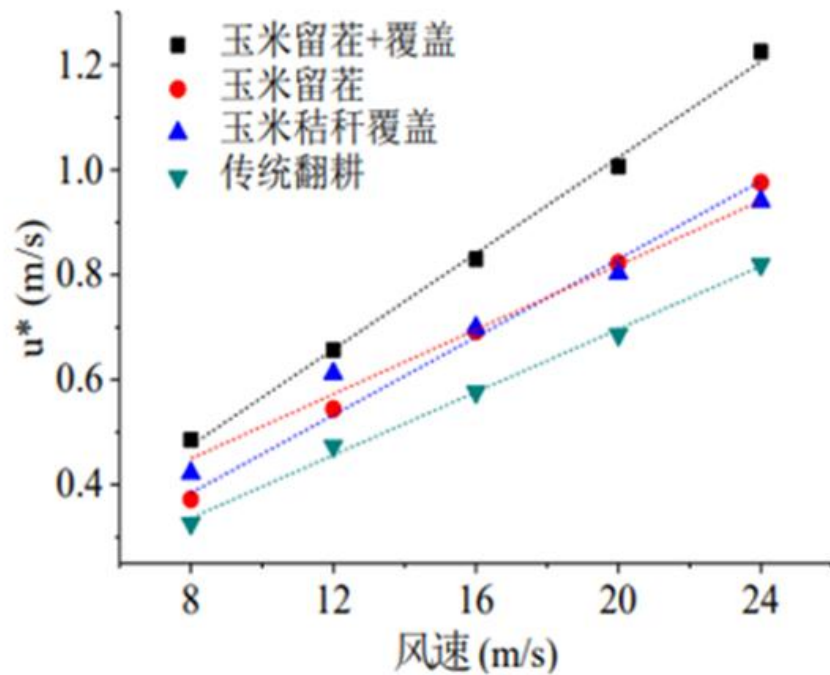


图 5 不同耕作措施摩阻风速与风速的关系

②风速及摩阻风速对风蚀量的影响

不同土地覆盖条件的农田，风速对风蚀量有着显著影响。风速是风蚀的启动力，与风蚀强度成正相关关系。如图 6，4 种耕作措施的土壤风蚀量随风速升高均呈现增加的趋势，但增加的幅度存在差异，留茬和覆盖显著削弱近地表风速。随风速升高，传统翻耕措施的风蚀量增加最快，玉米留茬措施次之，接着是玉米秸秆覆盖措施，增加最慢的是玉米留茬+覆盖措施。

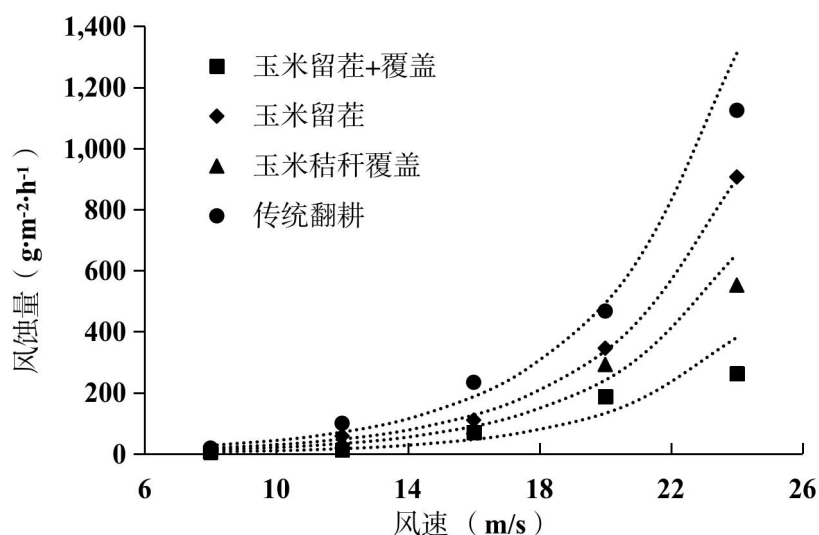


图 6 风蚀量随风速变化图

③不同农业耕作条件的防风蚀效果

不同轴心风速下，三种地表覆盖的农田在近地表处的风速均小于传统翻耕农田，以传统翻耕农田的近地表风速为对照，计算得出各种地表覆盖农田的地表风速减小率（见表 2）。在地表 10 cm 高度处，玉米留茬+覆盖和留茬农田的风速减小率（约 20%）远大于秸秆覆盖农田；地表 1 m 高度处，风速 8 m/s 时，风速减小率依次为秸秆覆盖>玉米留茬+覆盖>玉米留茬；风速 12 m/s 和 16 m/s 时，减小率依次为玉米留茬+覆盖>玉米留茬；风速 20 m/s 后，秸秆覆盖农田减小率最小，留茬的两种措施相近。由此可见，地表覆盖无论是留茬还是平铺，均能明显阻挡和削弱近地表气流。

表 2 保护性耕作措施的风速减小率

风速	高度(cm)	风速减小率（%）		
		玉米留茬+覆盖	玉米留茬	玉米秸秆覆盖
8m/s	10	19.50	19.61	2.00
	1	17.39	4.28	19.33

12m/s	10	20.89	19.12	0.09
	1	20.63	11.00	17.63
16m/s	10	21.26	20.99	1.03
	1	20.63	11.00	17.63
20m/s	10	22.34	20.29	0.53
	1	17.14	18.11	5.43
24m/s	10	22.68	21.86	0.31
	1	19.77	19.29	8.49

④风蚀物输沙量的影响因素

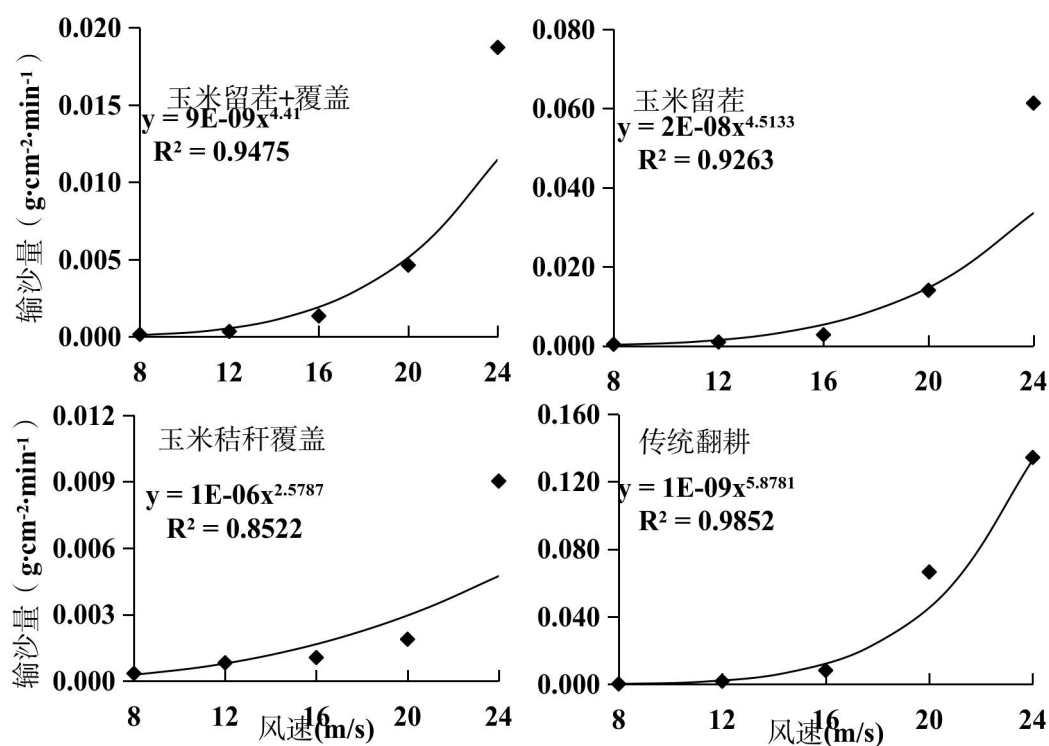


图 7 不同耕作措施输沙量随风速的变化

图 7 为不同措施总输沙量与风速的拟合关系，4 种耕作措施的风蚀量均随风速升高而增加，其中传统翻耕增加最快，玉米留茬次之，玉米留茬+覆盖增加最慢。输沙量与风速呈明显幂函数关系，各处理拟合决定系数 R^2 均大于 0.85，说明风速是控制风蚀输沙的重要动力

因子。

⑤留茬高度及地表覆盖率对农田输沙量的影响

试验样点表明，随留茬高度增加，输沙量整体降低；随地表覆盖率提高，输沙量亦呈下降趋势。结果验证了增加地表覆盖和增加垂向粗糙度均可降低风沙输移，但二者作用机制不同，因此组合措施比单一措施具有更稳定的防风蚀效果。

（4）参数转化的合理性与可行性分析

风洞试验表明，残茬和秸秆覆盖均能降低近地表风速、提高地表起沙阻力并减少风蚀输沙，其中“留茬+覆盖”在不同风速条件下具有较稳定的防护效果。因此，标准中将减少裸露地表、保留作物残茬、增加地表覆盖和优先采用组合保护性耕作作为风蚀主导区农地配置的基本要求具有明确试验依据。

试验中的 **73.4%**覆盖度、**18 cm** 留茬高度等参数属于具体样地条件，不宜直接作为黄土高原全区域统一强制值。因此，标准采用依据风蚀强度、土地利用、作物类型及立地条件确定留茬与覆盖参数的方式；在高风蚀风险区域，优先采用“留茬+覆盖”等组合措施。

3.生物措施治理配置

（1）研究内容

针对黄土高原风、水侵蚀在时间上交替发生、空间上叠加作用的特点，开展“风蚀—水蚀—再次风蚀”连续模拟试验，分析前期风蚀扰动对后续径流产沙过程的影响，以及降雨后地表结构变化对再次风蚀的反馈作用。风沙土试验重点分析风速、坡度和植被覆盖度的共同作

用；黄绵土试验重点分析风速、降雨强度和植被覆盖度对连续侵蚀产沙的影响，从而验证不同动力条件下采取单一措施或综合治理措施的适用性，为标准中差异化区域配置提供依据。

（2）研究方法

风沙土试验设置风速 7、9 和 11 m/s，覆盖度 10%、30%和 50%，坡度 10°、15°和 20°，各处理依次经历前期风蚀和后续模拟降雨。

黄绵土裸坡试验设置风速 7、9 和 11 m/s，雨强 60、90 和 120 mm/h；植被覆盖试验设置风速 7、9 和 11 m/s、覆盖度 10%、30%和 50%，降雨强度固定为 90 mm/h。

试验过程统一采用“第一次风蚀—地表三维扫描—人工降雨—水蚀取样—表面性质测定—风干—第二次风蚀”的连续流程。风蚀和降雨模拟持续时间均为 30 min，并测定风蚀产沙、水蚀产沙、土壤含水率、结皮抗剪强度及地表形态等指标。

（3）研究结果

①覆盖度对连续侵蚀过程具有明显调节作用

不同植被覆盖度下，三阶段产沙量及全过程总产沙量均呈明显的非单调变化（图 8）。10%、30%和 50%覆盖度条件下全过程总产沙量分别为 8692、3059 和 11370 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。其中，30%覆盖条件下总产沙量最低，较 10%和 50%覆盖处理分别降低约 64.8%和 73.1%。水蚀阶段产沙量约为 116.6 ~ 136.0 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ，明显低于两个风蚀阶段。结果表明，措施效果并非简单随覆盖度提高而线性增加，而是受到风速、地表结构及风水过程耦合共同控制。

②风速是连续侵蚀过程中的重要控制因素。

风速 7、9 和 11 m/s 条件下,总产沙量分别为 4990、3059 和 13016 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,其中 9 m/s 条件下最低,11 m/s 条件下明显增加。7 m/s 和 9 m/s 条件下,第二次风蚀产沙量分别为 3252 和 1708 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$; 11 m/s 条件下,第一次风蚀产沙量达到 7778 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,第二次风蚀产沙量为 5132 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。说明随着风动力增强,前期风蚀对全过程产沙贡献显著提高,而降雨形成的结皮、含水率及微地貌变化又会反过来影响第二次风蚀。

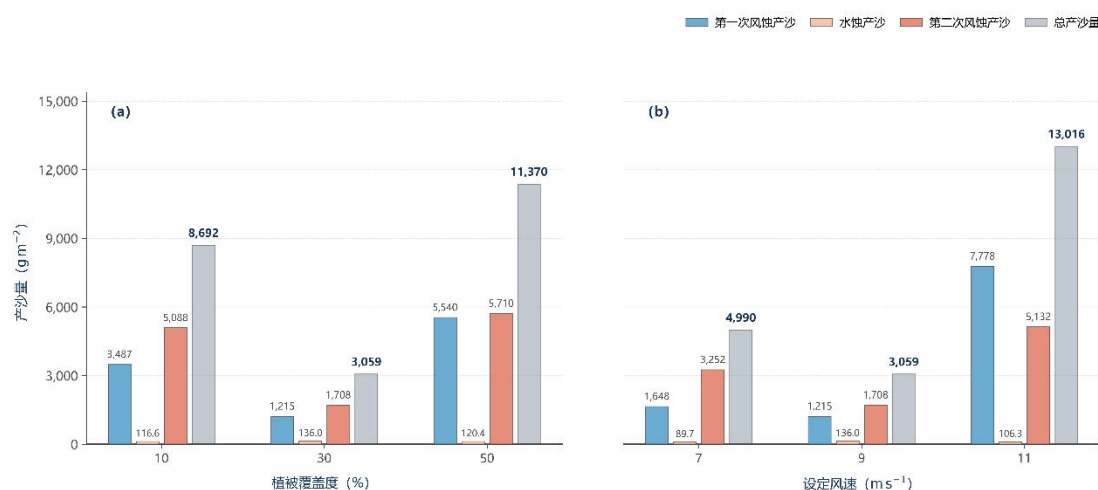


图 8 不同植被覆盖度和设定风速下风—水—风三阶段产沙量及总产沙量

(4) 参数转化的合理性与可行性分析

连续侵蚀试验表明,风蚀与水蚀并非相互独立,前期风蚀可通过改变地表微地形、颗粒组成和粗糙度影响后续降雨侵蚀;降雨又通过改变土壤含水率、形成地表结皮和重塑坡面微地貌,对后续风蚀产生反馈。

因此,本标准在措施配置中不采用“风蚀措施+水蚀措施”的简单叠加方式,而根据复合侵蚀类型和地貌部位进行组合配置。对于风蚀主导型,重点通过林草覆盖、保护性耕作、沙障及必要的固沙措施降

低近地风速和地表裸露度；对于水蚀主导型，重点形成“坡面减流减蚀—沟头防护—沟坡稳定—沟道消能拦沙”的配置体系；对于风水均衡型，优先选择兼具降低近地风速、稳定地表和削减径流作用的措施，避免治理单一侵蚀过程后造成另一侵蚀过程增强。

试验中 **30%**覆盖度条件下产沙量最低，可用于证明覆盖参数存在适宜范围和非线性响应，但由于该结果是在特定土壤、坡度、雨强和风速条件下获得，因此不直接将 **30%**作为全区域统一覆盖度阈值。标准最终采用依据侵蚀类型、强度、地貌部位、土地利用和立地条件综合确定措施参数的方法，更符合区域差异化和精准配置要求。

（三）预期效益分析

标准实施后，可提高治理措施与侵蚀类型、地形条件及立地条件的匹配程度，减少措施配置不合理和重复投入，提高工程建设与生态修复资金使用效率。通过优化措施组合和配置位置，可在保证治理效果的同时降低建设、维护及后期管理成本，具有较好的技术可行性和经济应用价值。

四、标准涉及的相关知识产权说明

本标准起草过程中未涉及其他相关知识产权。

五、采用国际标准的程度与水平的简要说明

本文件制定未采用相关国际标准。本标准的区域范围为黄土高原的风水复合侵蚀区，该区域具有特殊性，为我国特有地形地貌，大量前人在黄土高原开展工作，得到显著的成果，已形成一套较为成熟的

理论依据。

六、重大意见分歧的处理经过和依据

本文件在编制过程中广泛征求了领域内相关专家的意见。期间，共征询了全国各相关行业、领域内的 5 家单位的意见，共提出意见和建议 54 条。针对上述意见，编制组于 2026 年 8 月 10 日组织召开专题讨论会，经研讨论证，查阅相关资料等，最终确定采纳 46 条，部分采纳 5 条，未采纳 3 条的方案。

在 9 月 11 日召开的审定委员会上，对上述 8 条意见展开讨论。编制组充分研究并吸收审定专家提出的意见建议，对标准名称、术语表述、章节结构及相关技术内容进行系统修改完善，经内部复核和进一步论证后，形成标准报批稿（见下表）。

部分采纳与未采纳的 8 条意见处理表

序号	征求意见	采纳情况	理由	审定会专家评定意见
1	建议“5.1.判定依据”明确复合侵蚀评价时段、过程联系及证据要求，原则上采用完整水文年或连续多年，并可按季节识别过程，形成可操作的判定流程	部分采纳	明确完整水文年，并结合季节过程识别；相关判定内容调整至5.2并强化前后衔接，避免重复规定。	同意编制组处理意见。
2	建议“5.1.2 侵蚀强度”中明确同一空间单元内风、水侵蚀均达到轻度及以上，并增加侵蚀模数及达到相应等级面积比例等定量判定指标。	未采纳	复合侵蚀判定统一采用侵蚀能量指标，若再引入侵蚀模数和面积比例，易	同意编制组处理意见。建议标准正文突出判定结果和技术要求，计算

			造成指标体系不一致及空间划分歧义。	公式可不纳入正文，避免内容冗余。
3	建议“5.2.2 强度分级”部分明确风、水侵蚀是否需同时满足相应强度指标，以及二者处于不同强度等级时复合侵蚀强度的判定方式。	部分采纳	删除，判定依据以侵蚀能量为依据，使用会有歧义	同意编制组处理意见。建议标准以判定结果及应用要求为主，相关计算公式不再展开。
4	“5.2.2 强度分级”中风蚀、水蚀复合侵蚀简单借用风蚀、水蚀标准无法准确表述反差较大的复合侵蚀现象？应在规范中明确风蚀与水蚀强度分级出现明显大差异情况应怎样表述风水蚀复合强度。	部分采纳	删除，判定依据以侵蚀能量为依据，使用会有歧义	同意编制组处理意见。
5	建议“5.3复合侵蚀类型划分”将章节名称修改为“复合侵蚀类型及类型区划分”。	部分采纳	修改为“类型及类型区划分”	建议修改为“治理分区”，符合标准简化要求。
6	建议“5.3 复合侵蚀类型划分”进一步论证风、水侵蚀能量的可比性，统一物理量纲、计算时段、空间单元及计算方法，并完善参数来源和适用条件。	部分采纳	保留侵蚀能量贡献率方法，并在附录中补充统一量纲、计算方法及相关参数要求；详细验证过程在编制说明中论证。	建议在附录中补充各复合侵蚀类型区所涉及的主要行政单元，便于分区成果应用和治理实施。
7	建议“6水土保持措施精准配置”建立从侵蚀诊断、措施筛选、参数确定、空间定位到效益评价和成果输出的完整配置流程，并增加措施配置矩阵。	未采纳	本标准重点规定措施选择、组合及配置技术要求，完整项目实施流程超出标准技术边界。	同意编制组处理意见。

8	建议“6.1 一般规定”明确轻度、中度、强度及以上侵蚀区与后续具体治理措施和配置要求之间的对应关系。	未采纳	原分级与后续配置条款对应关系不够明确，易产生理解歧义，因此删除相关表述，统一按现有判定体系衔接措施配置。	同意编制组处理意见。
---	--	-----	--	------------

七、其他应予说明的事项

无