

冻融条件下藻结皮对土壤分离能力的影响

朱丽琴^{1,2}, 曹文华³, 马波^{1,4}, 曾建辉⁴, 马建业⁴

(1.中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,陕西 杨凌 712100;2.中国科学院大学,北京 100049;3.水利部水土保持监测中心,北京 100053;4.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100)

摘要:为探明生物结皮存在时,冻融条件下结皮盖度、坡度和流量对土壤分离能力的影响,以黄土高原北部东柳沟小流域的藻结皮为研究对象,采用室内模拟冻融和放水冲刷相结合的试验方法,利用正交设计和田口方法分析藻结皮盖度、坡度、流量和冻融对土壤分离能力的影响。结果表明:土壤分离能力最大时盖度、坡度和流量分别为 10%、20°和 24 L/min,而冻融次数正交设计和田口方法中分别为 10,1 次。冻融条件下,随藻结皮盖度的增大土壤分离能力逐渐减小,随坡度和流量的增加土壤分离能力增大;正交设计中土壤分离能力随冻融次数的增减呈先减小后增大的趋势,而田口方法中则在试验条件下无明显变化规律。正交设计中坡度是影响土壤分离能力的主要因子,各因子对土壤分离能力的贡献率为坡度(15.08%)>盖度(14.38%)>流量(13.69%)>冻融(-13.23%);田口方法中藻结皮盖度是土壤分离能力的主要影响因素,且各因子对土壤分离能力的贡献率为盖度(30.41%)>坡度(25.32%)>流量(1.59%)>冻融(0.85%)。田口方法预测的土壤分离能力相对误差变化幅度小(CV=0.49),决定系数大($R^2=0.961$, $p\leq 0.001$),在一定的试验条件下能够用田口方法预测土壤分离能力。研究结果可为黄土高原北部的土壤侵蚀研究提供理论参考。

关键词: 正交设计; 田口方法; 藻结皮; 冻融; 土壤分离能力

中图分类号:S157.1 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2023)01-0071-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.01.011

Effects of Algal Crusts on Soil Detachment Capacity Under Freeze-Thaw Conditions

ZHU Liqin^{1,2}, CAO Wenhua³, MA Bo^{1,4}, ZENG Jianhui⁴, MA Jianye⁴

(1. *Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*; 3. *Mortoring Center of Soil and Water Conservation, Beijing 100053*; 4. *Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100*)

Abstract: In order to explore the effects of biological crusts coverage, slope and flow rate on soil detachment capacity under freeze-thaw conditions when biological crusts existed, the algal crusts in the Dongliugou small watershed in the northern Loess Plateau were taken as the research object. A test method combining indoor freeze-thaw simulation and scour were carried out, and Taguchi method and Orthogonal design were used to analyze the effects of algal crust coverage, slope, flow and freeze-thaw on soil detachment capacity. The results showed that when the soil detachment capacity was the maximum, the crusts coverage, slope, flow was 10%, 20° and 24 L/min, respectively, while the number of freeze-thaw times was 1 and 10 in Taguchi method and Orthogonal design, respectively. Under freezing and thawing conditions, with the increasing of algal crust coverage, the soil detachment capacity gradually decreased. Soil detachment capacity increased with the increasing of slope and flow. In the orthogonal design, soil detachment capacity firstly decreased and then increased, but in the Taguchi method, the change of soil detachment capacity did not have had obvious law with the increasing of freeze-thaw times under the experimental conditions. Slope was the main factor affecting soil separation ability in the Orthogonal design, and the contribution rate of each factor was slope (15.08%)>coverage (14.38%)>flow (13.69%)>freeze-thaw (-13.23%). In Taguchi method, algal crust coverage was the main factor affecting soil detachment capacity, and the contribution rate of each factor

收稿日期:2022-06-21

资助项目:国家自然科学基金项目(41771311,41561144011);中国科学院西部之光人才计划项目(XAB2016B08)

第一作者:朱丽琴(1999—),女,在读硕士研究生,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:3458226731@qq.com

通信作者:马波(1982—),男,博士,副研究员,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:soilcrop@163.com

followed the order of coverage (30.41%) > slope (25.32%) > flow (1.59%) > freeze-thaw (0.85%). The relative error of the soil separation ability predicted by the Taguchi method was small ($CV=0.49$), and the coefficient of determination was large ($R^2=0.961>0.958$, $p\leq 0.001$). Taguchi method could be used to predict soil detachment capacity under certain experimental conditions. The results could provide a theoretical reference for soil erosion research on the northern Loess Plateau.

Keywords: Orthogonal design; Taguchi method; algal crusts; freeze-thaw; soil detachment capacity

土壤分离是土壤侵蚀首个过程,在降雨雨滴击溅和径流冲刷过程中均会产生,一般称清水中的最大土壤分离速率为土壤分离能力。生物结皮是土壤与绿色植物、细菌、真菌相互作用形成的复合体,影响土壤分离能力^[1]。当温度在 0℃ 左右频繁变化时,土壤水分不断地冻结和融化,破坏土壤结构使其更容易遭受侵蚀^[2]。我国黄土高原北部,春季虽以风力侵蚀为主,但同时存在的水力和冻融作用造成的土壤侵蚀不可忽略^[3];此外,该地区生物结皮广泛发育^[4],影响该地的土壤侵蚀状况。因此,加强生物结皮存在时,冻融条件下土壤分离能力的变化研究,可为深入理解该地区的土壤侵蚀原理提供科学参考。

已有学者^[5-6]从多方面研究土壤分离能力的影响因素。Liu 等^[1]通过放水冲刷试验研究不同类型生物结皮的覆盖作用和黏结作用对土壤分离能力的影响,结果表明,生物结皮的覆盖作用显著影响土壤分离能力,且影响最大,盖度是生物结皮覆盖作用的直接体现;也有研究^[7]表明,随生物结皮盖度的增大,土壤分离能力逐渐减小。冻融通过影响土壤理化性质影响土壤分离能力^[8],Liu 等^[9]通过量化冻融对土壤分离能力的影响指出,土壤分离能力随冻融次数的增加而增大,与未冻融相比提高 36.5%,但同时 Sun 等^[10]研究指出,土壤分离能力随冻融次数的增加存在阈值,因此,关于冻融对土壤分离能力的影响还需进一步研究。水动力学条件是影响土壤分离能力的关键因素^[11],坡度和流量是水动力学条件的基础,李敏等^[12]和肖俊波等^[13]在非冻融和冻融条件下的研究均表明,随坡度和流量的增加,土壤分离能力增大,冻融条件下坡度和流量是影响土壤分离能力的主要因素^[10]。

综上所述,多数学者分别研究了生物结皮、水动力学条件和冻融对土壤分离能力的影响,但三者结合对土壤分离能力影响的研究较少。因此,本文以黄土高原北部内蒙古鄂尔多斯市东柳沟流域的藻结皮为研究对象,采用室内模拟冻融和放水冲刷相结合的试验方法,结合研究区的相关资料和文献,利用正交设计和田口方法,研究不同藻结皮盖度、坡度、流量和冻融次数下的土壤分离能力,分析冻融条件下藻结皮对土壤分离能力的影响,为黄土高原北部的土壤侵蚀研究提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古鄂尔多斯市的东柳沟流域(34°58′02″—40°12′50″N,101°28′47″—110°31′35″E),是黄土高原北部典型的风水复合侵蚀区,属于温带大陆性气候,年均降水量 260~390 mm,年平均气温 6.85℃,初春时期,气温在 0℃ 上下波动,昼夜温差较大,冻融交替现象明显^[9-10]。研究区内植被稀疏,地表植被优势群落主要为猪毛菜(*Salsola collina* Pall.)、小蓬草(*Conyza canadensis*)、狗尾草(*Setaria viridis*)及艾蒿(*Artemisia argyi*),生物结皮以藻结皮和苔藓结皮居多,藻结皮优势种主要为小席藻(*Phormidium tenue*)、具鞘微鞘藻(*Microcoleus vaginatus*)和爪哇伪枝藻(*Scytonema javanicum*)。

1.2 供试材料

本试验于 2020 年 7—12 月进行,选取研究区内人为扰动少、藻结皮发育相对完整的撂荒地进行采样。采集时用铲刀尽可能地刮取藻结皮表面的藻种,用平铲切断结皮层与下层土壤间的黏结,然后用小刀刮除结皮层下部多余的土壤。采集藻结皮层下 0—10 cm 的土壤用于室内培养藻结皮,同时采集藻结皮层和下层 0—10 cm 的土壤,分层装入密封袋带回室内测定土壤基本理化性质,结果见表 1。

采回的土壤自然风干后过 5 mm 筛,剔除土壤中的植物根系和石块,按照实测土壤容重(1.46 g/cm³) 在直径 10 cm、高 5 cm 的不锈钢环刀中装填土壤。土壤装填完成后,将采集粉碎后的藻种铺撒在土壤表层,按照 30%~35% 的土壤含水率用喷壶缓慢喷洒使藻种充分润湿满足其生长最需的土壤含水率,然后将其置于温度 10~25℃、光照强度 338.9 lx 的环境中培养,控制光照强度 12 h/d^[14],最初的 2 周内每天喷一定量的水使土壤表面保持湿润,利于藻结皮生长。当藻结皮生长一段时间后,运用网格法^[15]计算藻结皮盖度,将符合设定盖度等级的环刀样进行冻融处理。干旱区藻结皮面积约为 40%^[16],因此设定藻结皮盖度分别为 10%,30%,50%,80%。

1.3 试验设计

1.3.1 冻融处理 将达到盖度要求的土样首先利用

酒精燃烧法测定其土壤含水率,测定完的环刀土样根据野外实测土壤含水率,按照土壤含水率为 10% 左右加水,土样加水后,用保鲜膜包裹,防止水分蒸发,室温下静置 12 h,使水分均匀分布。根据研究区

的气温变化及春季昼夜时长,设计冻结温度为 $-15 \sim -20 \text{ }^\circ\text{C}$,融化温度 $10 \text{ }^\circ\text{C}$,冻结和融化各 12 h,然后将土样放入冰箱中进行冻融处理。根据当地的气象资料设计冻融次数为 1, 3, 7, 10 次。

表 1 藻结皮层及下层土壤理化性质

土层 深度/cm	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	土壤有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	机械组成/%		
				黏粒	粉粒	砂粒
结皮层	1.31	12.60 ± 0.15	0.33 ± 0.020			
0—10	1.52	7.10 ± 0.37	0.19 ± 0.003	4.63	10.33	85.07

注:表中数据为平均值±标准差。

1.3.2 放水冲刷试验 利用可调节坡度的水槽(4.00 m×0.15 m×0.05 m)进行放水冲刷试验,为模拟野外地表粗糙率,需在水槽底部粘 1 层试验土壤。通过流量计控制流量,环刀样放在位于冲刷槽中线且距底部 0.3 m 处的圆形孔中。放水冲刷前,将环刀样放在托盘中,水面低于环刀内样品 1 cm 浸润 12 h,然后放在网架上除去土壤中的重力水;冲刷开始使用秒表计时,当土样被冲刷至 2 cm^[17]时记录时间,同时用径流桶收集泥沙样品;冲刷结束,将收集到的泥沙样品静置 24 h,用烘干法称量泥沙质量。放水冲刷前,调节流量和坡度,根据文献资料^[3]将此试验中流量和坡度分别设计为 6, 12, 18, 24 L/min 和 $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ 。每种处理重复 2 次,共计冲刷 32 次。

1.3.3 正交设计与田口方法 当土壤侵蚀试验中涉及因素过多、试验量较大时,经常用正交设计代替全因子设计以减少试验量,但正交设计中不可控因素会影响试验结果,因此常采用田口方法降低不可控因素的影响,即利用信噪比(signal to noise ratio, 简称为 S/N)对正交设计的数据进行二次处理。二者均以正交表为工具。

本试验中所涉及的主要影响因子包括藻结皮盖度、坡度、流量及冻融次数,每个因子分别有 4 个水平,需用 4 因子 4 水平 $L_{16}(4^4)$ 的正交表。利用 Minitab 17 软件生成正交表,每组试验的水平组合见表 2。

1.4 数据分析

土壤分离能力可由冲刷掉的泥沙质量与冲刷面积和时间来计算,计算方法为:

$$Dc = \frac{W}{At} \quad (1)$$

式中: Dc 为土壤分离能力 [$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]; W 为泥沙干重 (g); A 为土样面积 (m^2); t 为冲刷时间 (s)。

信噪比是田口方法中一个非常重要的参数,通过信噪比,可以降低试验过程中其他因素的影响。为确定最大土壤分离能力发生条件,选用信噪比越大越好的望大特性。信噪比望大特性的计算公式为:

$$S/N = -10 \lg \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{Y_i^2} \right) \quad (2)$$

式中: S/N 为信噪比; N 为试验重复次数; Y 为试验观测值 [$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$], 即本研究中的土壤分离能力。

表 2 $L_{16}(4^4)$ 正交表

试验 编号	因子水平组合				盖度/%	坡度/($^\circ$)	流量/ ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	冻融 次数/次
1	1	1	1	1	10	5	6	1
2	1	2	2	2	10	10	12	3
3	1	3	3	3	10	15	18	7
4	1	4	4	4	10	20	24	10
5	2	1	2	3	30	5	12	7
6	2	2	1	4	30	10	6	10
7	2	3	4	1	30	15	24	1
8	2	4	3	2	30	20	18	3
9	3	1	3	4	50	5	18	10
10	3	2	4	3	50	10	24	7
11	3	3	1	2	50	15	6	3
12	3	4	2	1	50	20	12	1
13	4	1	4	2	80	5	24	3
14	4	2	3	1	80	10	18	1
15	4	3	2	4	80	15	12	10
16	4	4	1	3	80	20	6	7

正交设计中最大土壤分离能力发生的试验条件可直接在正交表中获得,土壤分离能力最大时所对应的各因子不同水平组合即为最大土壤分离能力的发生条件。田口方法分析最大土壤分离能力的发生条件时,首先要计算各因子不同水平下的信噪比均值,再将各因子信噪比均值最大的水平进行组合,即可得到最大土壤分离能力的试验条件。各因子不同水平下的信噪比均值计算公式^[18]为:

$$M_{\text{Factor}=f}^{\text{Level}=l} = \frac{1}{N_{fl}} \sum_{j=f}^{N_{fl}} \left[\left(\frac{S}{N} \right)_{\text{Factor}=f}^{\text{Level}=l} \right]_j \quad (3)$$

式中: $M_{\text{Factor}=f}^{\text{Level}=l}$ 为 f 因子在 l 水平下信噪比的均值; N_{fl} 为 f 因子在 l 水平上出现的次数。

通过方差分析进行各因子对土壤分离能力的显著性检验和计算因子贡献率。因子贡献率计算公式为:

$$PC = \frac{SS_F - (DF \times V_{Er})}{SS_T} \times 100\% \quad (4)$$

式中: PC 为因子贡献率 (%); SS_T 为总离差平方和; SS_F 为各因子离差平方和; V_{Er} 为误差平方和; DF 为因子的自由度。

利用 Excel 2010 和 Minitab 17 软件进行数据整理、田口试验设计、主效应分析、方差分析和预测,利用 Origin 2018 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 最大土壤分离能力发生的试验条件

各因子不同水平下的土壤分离能力和信噪比见表 3。该试验平均土壤分离能力为 $641.46 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,变化范围为 $7.31 \sim 3\,186.32 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,不同试验条件下的平均土壤分离能力差异较大,土壤分离能力信噪比均值为 45.64。当盖度为 10%、坡度 20°、流量 24 L/min 及冻融

10 次时,土壤分离能力最大,为 $3\,186.32 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;当盖度为 80%、坡度 5°、流量 6 L/min 及冻融 3 次时,土壤分离能力最小,为 $7.31 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;最大和最小土壤分离能力的信噪比分别为 69.61 和 17.18。

由各因子的信噪比可知,土壤分离能力最大时的试验条件组合为盖度 10%、坡度 20°、流量 24 L/min 及冻融 1 次,各因子的信噪比分别为 56.01, 57.48, 50.27, 51.20;同理,当盖度为 80%、坡度 5°、流量 6 L/min 及冻融 10 次时,各因子的信噪比最小,分别为 35.40, 32.17, 37.06, 40.57,即在此组合条件下土壤分离能力最小。

表 3 各因子土壤分离能力和信噪比

指标	土壤分离能力/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$				信噪比			
	水平 1	水平 2	水平 3	水平 4	水平 1	水平 2	水平 3	水平 4
盖度/%	1190.00	1094.75	171.11	109.19	56.01	54.45	36.69	35.40
坡度/ $^{\circ}$	103.49	279.51	768.95	1413.89	32.17	46.42	46.48	57.48
流量/ $(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	91.79	314.21	768.96	1390.90	37.06	46.94	48.29	50.27
冻融/次	697.15	632.51	402.47	833.72	51.20	40.90	49.88	40.57

注:对于盖度,水平 1~4 分别表示 10%, 30%, 50%, 80%;对于坡度,水平 1~4 分别表示 5°, 10°, 15°, 20°;对于流量,水平 1~4 分别表示 6, 12, 18, 24 L/min;对于冻融,水平 1~4 分别表示 1, 3, 7, 10 次。下同。

2.2 各因子对土壤分离能力的主效应

正交设计因子主效应分析结果见图 1a,土壤分离能力随盖度的增大而减小,随坡度和流量的增加而增大,但随坡度的增加,后一水平的土壤分离能力均为前一水平的 2 倍;除 12 L/min 流量时的土壤分离能力为 6 L/min 的 3 倍外,其余后一水平均为前一水平的 2 倍,而随冻融次数的增加,土壤分离能力呈先减小后增大的趋势,当冻融次数由 1 次增加到 7 次时,土壤分离能力减小 73%,但当冻融次数由 7 次增加到 10 次时,土壤分离能力增加 107%。用信噪比进行因子主效应分析,由图 1b 可知,随藻结皮盖度的增大,土壤分离能力

逐渐减小,当藻结皮盖度由 30% 增加到 50% 时,信噪比直线的斜率最大,即土壤分离能力减小最多;随坡度的增加,土壤分离能力增大,当坡度由 5° 增加到 10° 和由 15° 增加到 20° 时,土壤分离能力分别增大 44% 和 24%,但当坡度由 10° 增加到 15° 时,土壤分离能力只增加 0.1%;随流量的增加土壤分离能力增大,当流量由 6 L/min 增加到 12 L/min 时,土壤分离能力增大 27%,但此后随流量的增加,土壤分离能力增大程度较小,分别增大 3% 和 4%;随冻融次数的增大,土壤分离能力变化规律不明显,当冻融 1 次时土壤分离能力最大,而冻融 10 次时土壤分离能力最小。

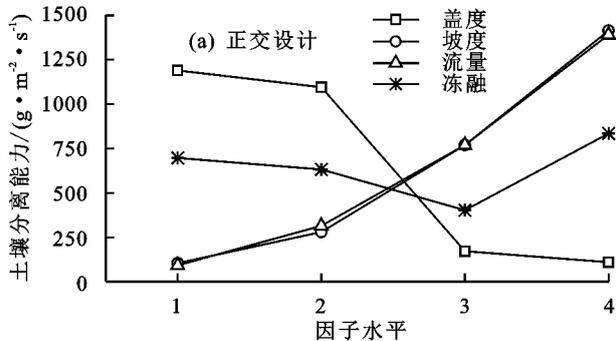
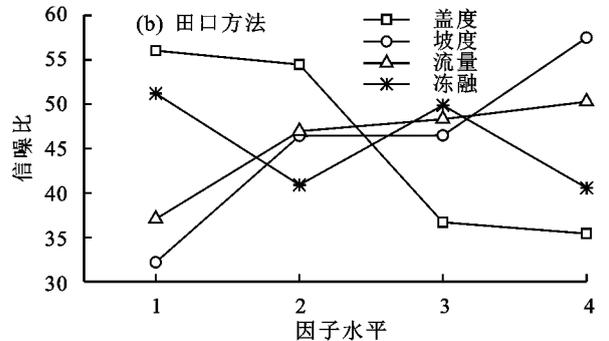


图 1 不同试验设计的各因子对土壤分离能力的主效应



2.3 各因子对土壤分离能力的贡献率

基于方差分析的各因子对土壤分离能力显著性及贡献率见表 4。正交设计结果显示,盖度、坡度、流量和冻融对土壤分离能力的影响均不显著 ($p > 0.05$);田口方法结果表明,盖度和坡度显著影响土壤分离能力 ($p \leq 0.05$),而流量和冻融对土壤分离能力的影响不显著 ($p > 0.05$)。正交设计得到的各因子对土壤分离能力的贡献率为坡度 (15.08%) > 盖度 (14.38%) >

流量 (13.69%) > 冻融 (-13.23%),误差贡献率为 70.08%;田口方法得到的各因子对土壤分离能力的贡献率为盖度 (30.41%) > 坡度 (25.32%) > 流量 (1.59%) > 冻融 (0.85%),误差贡献率为 41.84%。对正交设计和田口方法的结果比较发现,正交设计中坡度是土壤分离能力的主要影响因素,盖度和流量次之,且 3 个因子的贡献率非常接近;而在田口方法中盖度是土壤分离能力的主要影响因素,坡度次之,而流量的贡献

率非常小。正交设计中冻融对土壤分离能力的贡献率(-13.23%)为负值,且误差项的贡献率较大,为70.08%,因此误差掩盖冻融对土壤分离能力的影响,

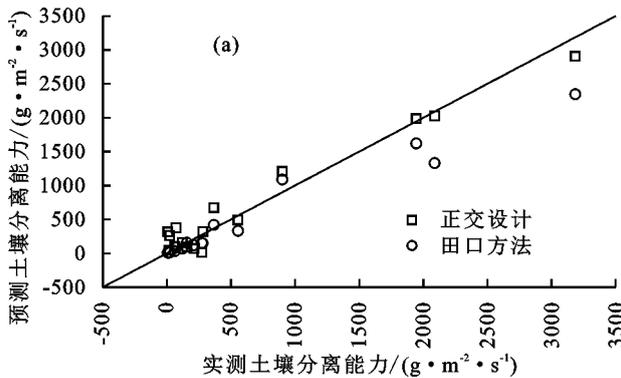
表 4 基于方差分析的各因子对土壤分离能力影响的显著性及贡献率

方法	因子	平方和	自由度	均方和	F 值	显著性	因子贡献率/%
正交设计	盖度/%	4040273	3	1346758	5.67	0.094	14.38
	坡度/(°)	4133297	3	1377766	5.80	0.091	15.08
	流量/(L·min ⁻¹)	3948581	3	1316194	5.54	0.097	13.69
	冻融/次	389048	3	129683	0.55	0.684	-13.23
	误差	712918	3	237639			70.08
	总和	13224117	15				
田口方法	盖度/%	1480	3	493.5	12.45	0.033	30.41
	坡度/(°)	1292	3	430.50	10.86	0.040	25.32
	流量(L·min ⁻¹)	415.3	3	138.40	3.49	0.166	1.59
	冻融/次	388.20	3	129.40	3.26	0.179	0.85
	误差	118.90	3	39.63			41.84
	总和	3694.40	15				

2.4 正交设计与田口方法预测

利用 Minitab 17 软件中的田口预测功能预测不同试验条件下的土壤分离能力,土壤分离能力预测值与实测值的散点图见图 2a。正交设计和田口方法土壤分离能力预测值与实测值均呈极显著正相关关系,决定系数分别为 $R^2 = 0.958$, $R^2 = 0.961$ ($p \leq 0.001$)。正交设计中 44%(7 组试验)的预测土壤分离能力小于实测值,而 56%(9 组试验)的预测土壤分离能力大于实测土壤分离能力。田口方法中除 3 组试验土壤分离能力的预测值较 1:1 线远之外,其余均在 1:1 线附近。

相对误差表示实测值偏离预测值的大小,由图



且降低其他因子的贡献率,而田口方法降低误差项的贡献率,增大盖度、坡度和冻融的贡献率,使其约为正交设计贡献率的 2 倍。

2b 可知,正交设计相对误差的分布范围较广且 1/2 的相对误差 > 50%,且存在极端值。田口方法中只有 1 组试验的相对误差 > 50%,其余试验的实测土壤分离能力与预测土壤分离能力的相对误差均 < 50%。正交设计中在土壤分离能力较小时 [$\leq 1000 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] 相对误差大,而当土壤分离能力较大 [$> 1000 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] 时的相对误差均小于田口方法,在土壤分离能力较大时相对误差小;田口方法中相对误差的值分布范围较接近。正交设计中去掉 3 个极端值后,相对误差的变异系数为 1.11,田口方法的变异系数为 0.49,相对误差的变化幅度较小。因此,在一定的试验条件下可用田口方法对土壤分离能力进行预测。

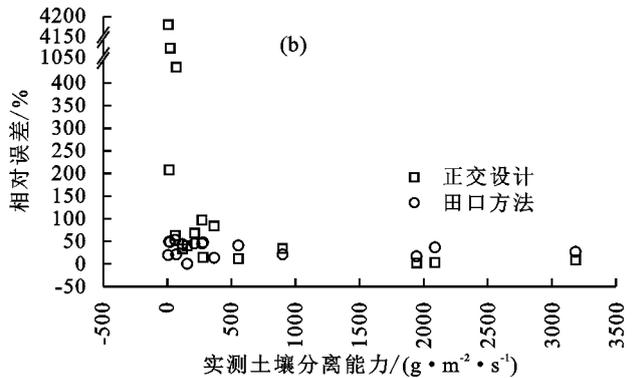


图 2 预测和实测土壤分离能力及相对误差

3 讨论

由因子主效应分析可知,冻融条件下随藻结皮盖度的增大,土壤分离能力逐渐减小,与张冠华等^[7]在非冻融条件下的研究结果相似。可能是因为:一方面冻融作用导致土壤细化^[19],土壤中的细颗粒增加使土壤更容易遭受侵蚀;另一方面,生物结皮影响土壤颗粒的分布^[20]。余韵^[21]通过室内人工培养生物结皮发现,随生物结皮的发育土壤中粉粒含量增加,而随土壤中粉粒含量的增加土壤分离能力减小^[22],二

者的共同作用导致冻融条件下土壤分离能力随藻结皮盖度的增大而减小。此外,冻融交替过程会增加土壤中的有机质含量^[3],显著降低土壤可蚀性,生物结皮的发育也增加表层土壤有机质^[23],两者的叠加可能使冻融条件下土壤分离能力随藻结皮盖度的增大而减小。当生物结皮发育到一定的盖度时,通过不受冻融影响的生物结皮物理作用抵抗径流冲刷^[24],也能降低土壤分离能力。由因子贡献率可知,藻结皮盖度对土壤分离能力的贡献率(30.41%)大于冻融对土

壤分离能力的贡献率(0.85%),高丽倩^[24]通过对生物结皮抗水蚀的定量研究表明,藻结皮主要通过覆盖作用提高土壤抗蚀性降低土壤分离能力,因而冻融条件下通过藻结皮的覆盖作用也能使土壤分离能力减小。

生物结皮土壤经过冻融,随坡度的增加土壤分离能力逐渐增大,这与冯梦蝶等^[25]的研究结果较为一致,随流量的增加土壤分离能力逐渐增大,与肖俊波等^[13]的研究结果相似。Zhang 等^[26]研究表明,坡度和流量往往是相互影响土壤分离能力,正交设计中坡度和流量的贡献率接近,与本研究结果相似。但由田口方法的方差分析结果可知,坡度的贡献率(25.32%)大于流量(1.59%),说明坡度对土壤分离能力的影响大于流量,这可能是由于田口方法增大盖度、坡度和冻融的贡献率,相较于正交设计均增大 15%左右,而本试验误差的贡献率较大,导致在总误差不变的情况下流量的贡献率变小。生物结皮存在的情况下,信噪比分析结果表明,随冻融次数的增加土壤分离能力的变化规律不明显,但正交设计中随冻融次数的增加,土壤分离能力先减小后增大,这可能与冻融循环过程中土壤团聚体稳定性先增强后减弱有关^[27]。

由因子贡献率分析可知,正交设计中由于误差的贡献率过大,被误差所覆盖导致冻融的贡献率为负值,而田口方法降低误差的贡献率,增大冻融的贡献率使其为正值。已有研究^[10]表明,当因子水平变化幅度较小时,误差掩盖因子变化对试验结果的影响,在该研究中,通过正交设计和田口方法得到的最大和最小土壤分离能力试验条件盖度、坡度和流量相同,但冻融次数不同,这可能是由于正交设计和田口方法中冻融对土壤分离能力的贡献率均较小,而误差的贡献率较大掩盖冻融对土壤分离能力的影响,通过田口方法分析的冻融影响规律不明显,因此,在利用田口方法进行土壤分离能力的研究时,试验因子水平的设置以及试验的精细控制非常重要。利用田口方法进行预测时的相对误差小,可对其他试验条件下的结果进行预测,能够为土壤侵蚀研究提供参考。

4 结论

(1)通过正交设计和田口方法分析的最大土壤分离能力发生的试验条件均是当藻结皮盖度为 10%,坡度和流量分别为 20°、24 L/min 时,但冻融次数 2 种方法分别为 10,1 次。

(2)冻融条件下,土壤分离能力随藻结皮盖度的增大而减小,随坡度和流量的增加而增大,正交设计中土壤分离能力随冻融次数的增加呈先减小后增大的趋势,田口方法中在本试验条件下土壤分离能力随冻融次数的变化规律不明显。

(3)正交设计中坡度是影响土壤分离能力的主要因素,其次是藻结皮盖度,而田口方法中藻结皮盖度是主要影响因子,其次是坡度。2 种方法所有因子中冻融对土壤分离能力的影响最小。

参考文献:

- [1] Liu F, Zhang G H, Sun F B, et al. Quantifying the surface covering, binding and bonding effects of biological soil crusts on soil detachment by overland flow[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2017, 42(15):2640-2648.
- [2] Li G Y, Fan H M. Effect of freeze-thaw on water stability of aggregates in a black soil of northeast China[J]. *Pedosphere*, 2014, 24:285-290.
- [3] 孙宝洋,吴志广,李占斌,等.冻融对土壤分离能力及侵蚀阻力的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(11):57-65.
- [4] Lg A, Mab B, Mxa C, et al. Biological soil crusts decrease erodibility by modifying inherent soil properties on the Loess Plateau, China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 105:49-58.
- [5] Li Z W, Zhang G H, Geng R, et al. Land use impacts on soil detachment capacity by overland flow in the loess plateau, China[J]. *Catena*, 2015, 124:9-17.
- [6] 耿韧,张光辉,洪大林,等.我国水蚀区坡耕地土壤分离能力的空间分布与影响因素[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(3):156-161.
- [7] 张冠华,易亮,丁文峰,等.三峡库区生物结皮对土壤分离过程的影响及其机制[J]. *土壤*, 2021, 53(3):610-619.
- [8] 孙宝洋,李占斌,肖俊波,等.冻融作用对土壤理化性质及风水蚀影响研究进展[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(1):337-347.
- [9] Liu H Y, Yang Y, Zhang K L, et al. Soil erosion as affected by freeze-thaw regime and initial soil moisture content[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2017, 81(3):459-467.
- [10] Sun B Y, Xiao J B, Li Z B, et al. An analysis of soil detachment capacity under freeze-thaw conditions using the Taguchi method[J]. *Catena*, 2018, 162:100-107.
- [11] 张冠华,胡甲均.径流驱动土壤分离过程的影响因素及机制研究进展[J]. *水科学进展*, 2019, 30(2):294-304.
- [12] 李敏,张含玉,刘前进.含水量、坡度和流量对土壤分离能力的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(5):35-40.
- [13] 肖俊波,孙宝洋,马建业,等.季节性冻融对东柳沟流域风沙土分离能力的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2017, 15(6):1-8.
- [14] 许永霞,廖超英,孙长忠,等.黄土藻类回接之生境条件研究[J]. *西北林学院学报*, 2012, 27(2):30-33.
- [15] Liu F, Zhang G H, Sun L, et al. Effects of biological soil crusts on soil detachment process by overland flow in the Loess Plateau of China[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2016, 41(7):875-883.
- [16] Bettina W, Burkhard B, Jayne B. Biological soil crusts: An organizing principle in drylands[M]. Cham: Springer, 2016.

- [23] 陶婷婷,陈晓燕,陈仕奇,等.饱和紫色土初始态和稳定态细沟水力学特征研究[J].土壤学报,2022,59(1):129-138.
- [24] Han Z, Chen X Y, Li Y H, et al. Quantifying the rill-detachment process along a saturated soil slope[J].Soil and Tillage Research,2020,204:e104726.
- [25] 刘森,杨明义,张风宝.黄土坡面细沟发育及细沟与细沟间侵蚀比率研究[J].水土保持学报,2015,29(1):12-16.
- [26] 裴冠博,龚冬琴,付兴涛.晋西黄绵土坡面细沟形态及其对产流产沙的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):79-84,182.
- [27] 倪世民,冯舒悦,王军光,等.不同质地重塑土坡面细沟侵蚀形态与水力特性及产沙的关系[J].农业工程学报,2018,34(15):49-156.
- [28] 韩珍,陈晓燕,李彦海,等.近饱和与非饱和土壤细沟水流输沙能力的对比研究[J].山地学报,2020,38(6):841-850.
- [29] 薛姣姣,王健,李鹤,等.重粉质壤土坡面细沟侵蚀发育规律实验分析[J].灌溉排水学报,2016,35(1):67-70.
- [30] 王健,李鹤,孟秦倩,等.黄土坡面细沟横断面形态及其水动力学与挟沙特性[J].水土保持学报,2015,29(3):32-37.
- [31] 龙琪,韩剑桥,何育聪,等.黄土坡面细沟侵蚀强度的空间分布及形态分异特征[J].水土保持学报,2022,36(1):1-7.
- [32] 郝好鑫,郭忠录,王先舟,等.降雨和径流条件下红壤坡面细沟侵蚀过程[J].农业工程学报,2017,33(8):134-140.
- [33] 严冬春,文安邦,史忠林,等.紫色土坡面跌坑贯穿发生细沟的水动力过程[J].长江流域资源与环境,2012,21(1):94-99.

(上接第70页)

- [17] 王永平,周子柯,滕昊蔚,等.东大河小流域林地土壤侵蚀及养分特征研究[J].核农学报,2021,35(7):1658-1667.
- [18] 邓威,汪晶晶,白云,等.苦驴河上游小流域土壤侵蚀及其养分流失特征[J].水土保持通报,2020,40(1):85-90,2.
- [19] 刘丹,丁明军,文超,等.赣南红壤丘陵区¹³⁷C示踪土壤侵蚀对土壤养分元素的影响[J].水土保持学报,2019,33(1):62-67.
- [20] 魏哈梅,郑粉莉,冯志珍,等.薄层黑土区流域尺度土壤养分对侵蚀-沉积的响应[J].水土保持学报,2021,35(4):49-54.
- [21] 周华坤,赵新全,周立,等.青藏高原高寒草甸的植被退化与土壤退化特征研究[J].草业学报,2005,14(3):31-40.
- [22] Kristensen J A, Boëtius S H, Abekoe M, et al. The combined effect of termite bioturbation and water erosion on soil nutrient stocks along a tropical forest catena in Ghana[J].Catena,2019,178:307-312.
- [23] Zhang L L, Huang Y, Rong L, et al. Effect of soil erosion depth on crop yield based on topsoil removal method: A meta-analysis[J].Agronomy for Sustainable Development,2021,41(5):1-13.
- [24] Mahadevan R, Gonemaituba W. A note on soil erosion and the loss in crop production: Case study of Fiji's ginger farms[J].Journal of the Asia Pacific Economy,2013,18(3):502-511.
- [25] 鄂丽丽,胡伟,谷思玉,等.黑土农田极端侵蚀对土壤质量及作物产量的影响[J].水土保持学报,2018,32(2):142-149,172.

(上接第76页)

- [17] 张光辉.土壤分离能力测定的不确定性分析[J].水土保持学报,2017,31(2):1-6.
- [18] 张风宝,杨明义,李占斌.微小区土壤侵蚀试验中田口方法代替全因子设计的可行性分析[J].农业工程学报,2015,31(13):1-9.
- [19] Wang E H, Cruserichard M, Chen X W, et al. Effects of moisture condition and freeze/thaw cycles on surface soil aggregate size distribution and stability[J].Canadian Journal of Soil Science,2011,92(3):529-536.
- [20] 高广磊,丁国栋,赵媛媛,等.生物结皮发育对毛乌素沙地土壤粒度特征的影响[J].农业机械学报,2014,45(1):115-120.
- [21] 余韵.黄土丘陵区人工培育生物结皮对坡面水蚀的影响研究[D].南昌:江西农业大学,2014.
- [22] 王军光,李朝霞,蔡崇法,等.集中水流内红壤分离速率与团聚体特征及抗剪强度定量关系[J].土壤学报,2011,48(6):1133-1140.
- [23] 王芳芳,肖波,李胜龙,等.黄土高原生物结皮对土壤养分的表层聚集与吸附固持效应[J].植物营养与肥料学报,2021,27(9):1592-1602.
- [24] 高丽倩.黄土高原生物结皮土壤抗水蚀机理研究[D].北京:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,2017.
- [25] 冯梦蝶,陈展鹏,何丙辉,等.不同土壤容重水平下喀斯特黄壤分离能力水动力学特性[J].水土保持学报,2021,35(2):1-7.
- [26] Zhang G H, Liu B Y, Liu G B. Detachment of undisturbed soil by shallow flow[J].Soil Science Society of America Journal,2003,67(3):713-719.
- [27] 王展,张玉龙,虞娜,等.冻融作用对土壤微团聚体特征及分形维数的影响[J].土壤学报,2013,50(1):83-88.