doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.11.015

不同切根打孔参数条件下伊犁山地草甸土壤物理性质与产草量研究

樊学婷[1,2]　章　莲[3]　和海秀[3]　陈　宁[3]　段震宇[3]　梁　飞[1,2]

(1.伊犁师范大学资源与环境学院,伊宁 835000;
2.伊犁师范大学伊犁河谷农业资源与环境实验室,伊宁 835000;
3.新疆农垦科学院科技服务与成果转化处,石河子 832000)

摘要:为探究切根与打孔组合对山地草甸土壤改良及产草量的影响,于 2023 年 5 月—2024 年 9 月在伊犁河谷进行定位试验,设置了切根深度(5、10、15 cm)、打孔间距(20、40、60 cm)及对照(CK),分析其对土壤物理性质和产草量的影响。结果表明,切根使土壤容重降 14.58% ~20.83%,比重降 3.54% ~9.73%,孔隙度提升 2.76% ~5.47%,鲜草增产 26.54% ~36.01%,干草增产 18.46% ~26.80%,并降低土壤紧实度;打孔使土壤容重降 16.67% ~17.71%,比重降 2.65% ~7.96%,孔隙度提升 1.52% ~5.56%,鲜草增产 20.68% ~35.08%,干草增产 9.31% ~29.49%,亦改善紧实度。切根与打孔组合能有效改良土壤物理性质、提升产草量,改善山地草甸环境,其中 $D_{60}Q_5$ 在土壤改良和增产方面表现突出,兼具生态与经济效益。综上,单一切根最佳深度为 5 ~10 cm,单一打孔最佳间距为 40 ~60 cm;打孔 60 cm 和切根 5 cm 组合为伊犁河谷山地草甸改良的最优方案。

关键词:山地草甸;切根;打孔;土壤物理性质;产草量

中图分类号:S152.5;S22　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)11-0165-12　　**OSID**:

Soil Physical Properties and Grass Yield under Different Root Cutting and Punching Parameters in Yili Mountain Meadow

FAN Xueting[1,2]　ZHANG Lian[3]　HE Haixiu[3]　CHEN Ning[3]　DUAN Zhenyu[3]　LIANG Fei[1,2]

(1. *College of Resources and Environment*, *Yili Normal University*, *Yining* 835000, *China*
2. *Laboratory of Agricultural Resources and Environment in Yili River Valley*, *Yili Normal University*, *Yining* 835000, *China*
3. *Department of Science and Technology Services and Achievements Transformation*, *Xinjiang Academy of Agricultural Reclamation Science*, *Shihezi* 832000, *China*)

Abstract: Aiming to investigate the effects of root cutting and punching combinations on soil improvement and grass yield in mountain meadow soils, a targeted experiment was conducted in the Yili River Valley from May 2023 to September 2024. The experimental factors included root cutting depths (5 cm, 10 cm, 15 cm), punching (20 cm, 40 cm, 60 cm), and a control (CK). The experiment aimed to analyze their influence on the soil's physical properties and grass yield, providing a comprehensive understanding of how these treatments affect the ecosystem. The results showed that root cutting reduced soil bulk density by 14.58% to 20.83%, reduced soil specific gravity by 3.54% to 9.73%, increased soil porosity by 2.76% to 5.47%, and significantly boosted fresh grass yield by 26.54% to 36.01%, and dry grass yield by 18.46% to 26.80%, while also reducing soil compaction. Similarly, punching reduced soil bulk density by 16.67% to 17.71%, reduced soil specific gravity by 2.65% to 7.96%, increased soil porosity by 1.52% to 5.56%, and improved fresh grass yield by 20.68% to 35.08%, and dry grass yield by 9.31% to 29.49%, while also enhancing soil compaction. The combination of root cutting and punching effectively improved soil physical properties and increased grass yield, leading to a better

收稿日期:2025-08-26　修回日期:2025-09-10

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFD1301705)、兵团重点领域科技攻关计划项目(2024AB033)和伊犁师范大学高层人才引进项目(2023RCYJ01)

作者简介:樊学婷(2001—),女,硕士生,主要从事资源与环境研究,E-mail:18196373638@163.com

通信作者:梁飞(1984—),男,研究员,博士生导师,主要从事土壤质量与水肥一体化研究,E-mail:liangfei3326@126.com

mountain meadow environment. Among the treatments, $D_{60}Q_5$ demonstrated the most significant effects on both soil improvement and yield increase, providing both ecological and economic benefits. In conclusion, the optimal root cutting depth was 5 ~ 10 cm, and the optimal punching spacing was 40 ~ 60 cm. The combination of punching at 60 cm and root cutting at 5 cm provided a sustainable and efficient approach to improve soil physical properties and increase grass productivity, which can be considered as the optimal solution for improving the mountain meadows in the Yili River Valley.

Key words: mountain meadow; root cutting; punching; soil physical properties; grass yield

0 引言

草地在维持生态平衡和保障畜牧业发展等方面具有不可替代的作用[1-2]。然而,全球气候变暖与人类活动加剧的影响[3],导致我国 90% 草地面临退化威胁[4],草地退化不仅削弱了其生态服务功能,还制约了畜牧业的可持续发展,因此,探寻科学合理的草地改良措施以缓解退化趋势、恢复草地生态,已成为亟待解决的关键问题[5-6]。当前针对草地退化治理的主要方法有化学改良及物理改良两大类。化学改良主要通过施加生物炭[7]、无机肥和有机肥[8]等方式提升土壤养分状况;物理改良则通过划破草皮[9]、切根[10]、打孔、浅翻耕[11]等改善土壤通透性。

草地的土壤-根系复合体会加剧土壤紧实化[12],而切根通过机械或人工方法将草地植被的根系切断,可刺激根系的生长点,进而影响土壤质地、改良土壤物理特征[13]。打孔是通过对植物根际土壤进行钻孔,改善土壤透气性[14],促进草地植被恢复。切根和打孔作为物理改良的常用措施[14-15],当前研究多聚焦单一措施的改良效应,即使涉及组合措施,也多为初步探索。文献[11]研究发现采用切根、打孔、补播、施肥等措施能够提升退化天然草地的土壤肥力、产草量,优化草地群落结构。也有研究表明切根释压松土的方式能有效降低退化羊草草地的土壤坚实度和容重[16]。文献[17]采取“3414”正交试验结合打孔与不打孔的物理改良方案,研究表明施肥和打孔均有利于提高大针茅草原草地生产力及群落物种多样性。文献[18]以西藏那曲地区高寒退化草地为研究对象,发现浇水打孔处理更有利于退化草地恢复。但整体而言,现有研究关于切根与打孔及其组合效应的系统性研究仍较缺乏,尤其在典型牧区的针对性研究不足。

伊犁河谷作为新疆的核心牧区,其草地资源占全疆 25%[19],然而,长期超载放牧已导致土壤环境退化、草地生产力下降等问题,亟需通过量化研究优化物理改良技术体系。切根与打孔是伊犁河谷草地常用的物理改良方式,但其交互作用(如切根深度与打孔间距)对土壤物理性质(容重、孔隙度)和产草量的协同调控机制尚不明确,关键参数尚不清晰。为此,本文以伊犁河谷山地草甸为研究对象,设计切根(切根深度 5、10、15 cm)与打孔(打孔间距 20、40、60 cm)及不改良对照处理,探究不同处理对草甸土壤物理性改良及产草量的影响,通过回归模型解析不同参数组合对土壤容重、比重、孔隙度及产草量的非线性影响,筛选优化改良方案,旨在为物理改良修复山地草甸提供参数化调控依据和数据支撑。

1 数据获取与处理方法

1.1 研究区域概况

试验于 2023 年 5 月在新疆生产建设兵团第四师 77 团 9 连山地草甸进行,试验样地位于昭苏盆地中部(北纬 43°12′,东经 81°08′),北部毗邻哈萨克斯坦,距昭苏县城 35 km。试验区海拔 1 895 m,降水集中在每年 5—8 月,属于大陆性温带山地半干旱半湿润冷凉气候类型[20],年均降水量 512 mm,年均气温 2.9℃。土壤类型为黑钙土,腐殖质层厚度 20 cm 以上;草地类型为山地草甸[21],植被类型丰富,以禾本科、唇形科、豆科植物为主,包含早熟禾、无芒雀麦、新塔花、老鹳草、三叶草等。试验区为天然打草场,每年 5—8 月封育,8 月中下旬进行打草,干产草量稳定在 280 kg/hm^2 左右,该区域土壤-根系复合体繁多,导致土壤紧实化,对植物根系生长、草种发芽产生不利影响。2023 年 5 月试验开始前在试验区内测定基础土壤紧实度,采集土样测其各项指标,结果如表 1 所示。

表 1 试验地土壤基本理化性质

Tab. 1 Basic physical and chemical properties of soil in experimental field

土层深度/cm	全氮质量比/(g·kg^{-1})	全磷质量比/(g·kg^{-1})	全钾质量比/(g·kg^{-1})	电导率/(μS·cm^{-1})	pH 值	有机质质量比/(g·kg^{-1})	土壤容重/(g·kg^{-1})	土壤紧实度/kPa
0 ~ 10	11.61	1.07	27.53	50	5.57	156.00	0.93	932
10 ~ 20	9.01	1.02	28.47	20	5.74	115.13	0.94	1 414
20 ~ 30	7.30	0.95	30.20	10	5.96	93.97	0.96	1 552

1.2　试验设计

试验采用双因素完全随机区组设计，设置切根（Q，切根深度为 5、10、15 cm，分别标记为 Q_5、Q_{10}、Q_{15}）和打孔（D，打孔间距为 20、40、60 cm，分别标记为 D_{20}、D_{40}、D_{60}）两因素，未处理做对照（CK），共计 10 个处理组合：CK、$D_{20}Q_5$、$D_{20}Q_{10}$、$D_{20}Q_{15}$、$D_{40}Q_5$、$D_{40}Q_{10}$、$D_{40}Q_{15}$、$D_{60}Q_5$、$D_{60}Q_{10}$、$D_{60}Q_{15}$，各小区均为 5 m × 6 m 的样方，小区间设 1 m 缓冲带。选择地势平坦、密度均匀且避开群落边缘的地块划分为试验小区（图 1）。

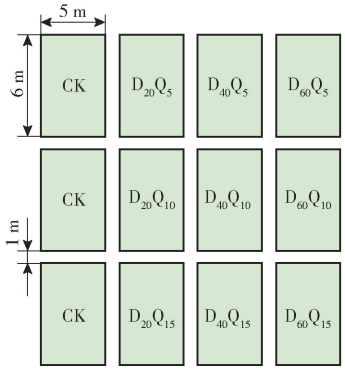


图 1　试验小区布局图

Fig. 1　Layout plan of experimental plots

打孔采用农用螺旋式打洞钻孔机，打孔间距通过人工拉尺方式控制，作业前先以卷尺（精度为 1 mm）沿预设轨迹标记孔位，钻孔深度设定为 10 cm，误差在 ±1 cm 范围内，孔洞直径为 6 cm，误差在 ±0.05 cm 范围内；采用豪狮（HORSCH）PRONTO 6 DC 型气动条播机进行切根作业（不进行补播），该设备作业幅宽为 6 m，作业速度为 10 ~ 20 km/h，其切根播种部件为 TurboDisc 涡轮种盘，该种盘为双盘结构（2 个独立圆盘协同工作），直径 34 cm，边缘锯齿设计增强土壤穿透力，双盘间距通过压力反馈装置动态调节，确保在高速作业时仍能保持稳定的入土角度，同一组种盘中的任意 1 个圆盘压力可通过液压调节系统在 5 ~ 120 kg 范围内无级调整，以适应不同土壤硬度；该设备配置 40 组 TurboDisc 涡轮种盘，种盘间距为 15 cm，保证切根距离均匀，种盘入土通过机械旋钮和液压调节系统，作业中可实时调节种盘深度，种盘可精准嵌入 0 ~ 15 cm 深的土壤，深度误差在 ±0.5 cm 范围内，切根后不镇压。条播机具体参数如表 2 所示，切根与打孔具体操作如图 2 所示。采用围栏封育的管理技术[22]，避免放牧干扰，8 月进行打草。

1.3　试验数据采集与分析方法

本试验于 2023 年 5 月开始布置田间试验，2024 年开展各指标检测。

土壤紧实度[23]：采用美国 FieldscoutSC－900 型数显式土壤紧实度仪（1/2 规格探头）于 2024 年 8 月 17 日测定 0 ~ 15 cm 土层的土壤紧实度，每 2.5 cm 自动保存 1 次数据，每个小区随机重复测 4 次。

表 2　条播机主要技术参数

Tab. 2　Main technical parameters of drill seeder

参数	数值
整机质量/kg	7 565
行距/cm	15
工作幅宽/m	6
播种深度/cm	0 ~ 15（可调节）
作业速度/（km·h^{-1}）	10 ~ 20
作业效率/（hm^2·h^{-1}）	6 ~ 12



图 2　打孔与切根现场作业图

Fig. 2　Diagram of on-site operation for punching and root cutting

土壤容重与孔隙度：2024 年 8 月 17 日，采用环刀法在小区内 5 cm 土层重复取样，将充满土样的环刀立即密封，避免水分蒸发，称量后，放入干燥箱中在（105 ± 2）℃下加热干燥至质量恒定、称量[24]；在室内采用浸水法测土壤孔隙度[25]。

土壤比重：2024 年 8 月 17 日，将采集回的土样风干，用比重瓶法测土样的比重，每个小区 3 个重复。

产草量：2024 年 8 月 17 日，每小区内随机划定 1 m × 1 m 样方，刈割（留茬 3 cm）样方内全部地上部分，称量得其鲜产草量，装袋带回实验室，在恒温干燥箱内 105℃杀青 30 min，再调至 75℃加热干燥至质量恒定，称量干产草量[26]。

1.4　数据计算与处理

土壤容重[27]计算公式为

$$D = \frac{M}{V} \tag{1}$$

式中　D——土壤容重，g/cm^3

M——烘干土的质量，g

V——环刀容积，cm^3

土壤比重计算公式为

$$d = \frac{E\rho_{water}}{E + E_1 - E_2} \tag{2}$$

式中　d——土壤比重，g/cm^3

E——烘干土样质量，g

E_1——加满纯水的比重瓶质量,g

E_2——煮沸冷却后加满纯水及烘干土样的比重瓶质量,g

ρ_{water}——4 ℃纯水的密度,1.00 g/cm^3

土壤孔隙度计算公式为

$$P=\frac{H_1-H_2}{\rho_{water}V}\times 100\% \tag{3}$$

式中 P——总孔隙度,%

H_1——浸水 12 h 后带环刀的质量,g

H_2——烘干至质量恒定的干土带环刀质量,g

数据均采用 Excel 2019 和 SPSS 26.0 进行分析,LSD 进行多重比较;利用 $y=ax^2+bx+c$ 二次多项式回归模型分析切根深度、打孔间距与土壤指标的非线性关系,通过极值计算确定最优参数组合;使用 Sigmaplot 15.0、Origin 2024 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 切根打孔对土壤容重的影响

2.1.1 切根深度和打孔间距对山地草甸土壤容重的影响

由图 3a(不同字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$),下同)可知,切根和打孔均显著降低土壤容重。切根后,相较 CK,Q_{10}、Q_{15}处理土壤容重显著降低($P<0.05$),Q_5有所降低,但差异不显著($P>0.05$),切根深度 5、10、15 cm 土壤容重分别降低 14.58%、15.63%、20.83%。通过建立切根深度(x)与土壤容重(y)的二次回归模型(图 3c),得拟合方程:$y=0.000\ 9x^2-0.025\ 7x+0.951\ 5$($R^2=0.95$),当切根深度为 14.28 cm 时,土壤容重达到理论最小值 0.77 g/cm^3,与实测最低值偏差仅为 1.3%,表明该模型有较好的预测精度。

打孔后,相较 CK,打孔间距 20、40、60 cm 土壤容重均显著下降,降幅分别为 16.67%、17.71% 和 17.71%。通过建立的二次回归模型,分析打孔间距(x)与土壤容重(y)的定量关系(图 3d),得其拟合方程为:$y=0.000\ 1x^2-0.008\ 6x+0.953$($R^2=0.95$),模型预测显示,当打孔间距为 43 cm 时,该试验区土壤容重达到理论最低值 0.77 g/cm^3,低于实测值,表明该模型具有较高的预测精度。

2.1.2 切根+打孔组合对山地草甸土壤容重的影响

不同切根+打孔的组合处理下,土壤容重均呈现明显降低趋势(图 4)。CK 土壤容重最高,$D_{20}Q_{15}$、$D_{40}Q_{10}$、$D_{40}Q_{15}$、$D_{60}Q_5$、$D_{60}Q_{10}$的土壤容重较 CK 显著下降($P<0.05$),降幅为 17.71%~29.17%。其他组合虽然较 CK 差异不显著($P>0.05$),但其土壤容重仍低于 CK,表明切根+打孔组合处理对土壤结构改良具有普适性。综合考虑实际作业情况及农业生产经济效益,$D_{60}Q_5$在降低土壤

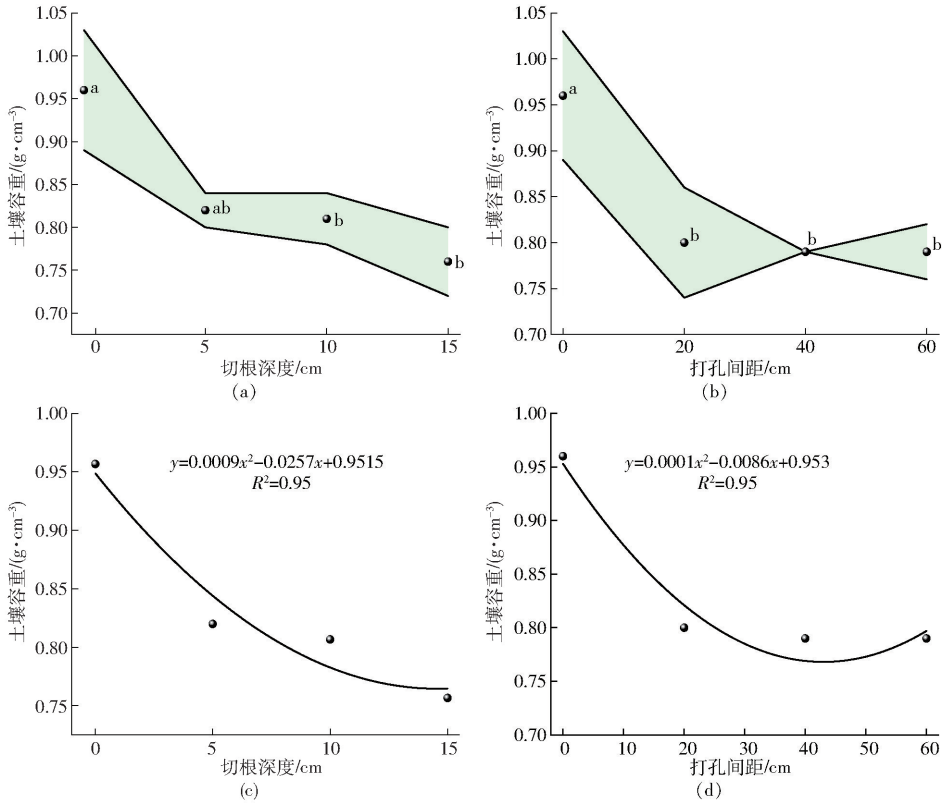


图 3 切根深度和打孔间距对山地草甸土壤容重的影响及拟合曲线

Fig. 3 Influence of root cutting depth and punching spacing on soil bulk density in mountain meadow and its fitting curves

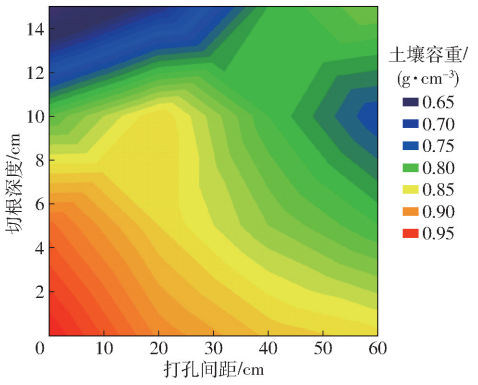


图 4　切根 + 打孔组合对山地草甸土壤容重的影响

Fig. 4　Influence of root cutting and punching combination on soil bulk density in mountain meadow

容重方面更具生产实践推广价值。

2.2　切根打孔对土壤比重的影响

2.2.1　切根深度和打孔间距对山地草甸土壤比重的影响

土壤比重反映了土壤固体颗粒的密度，由图 5a、5b 可知，切根和打孔在一定程度上能够降低山地草甸的土壤比重，但各处理组间差异不显著（$P>0.05$）。与 CK 相比，切根深度 5、10、15 cm 的土壤比重降幅分别为 3.54%、5.31%、9.73%。切根深度（x）与土壤比重（y）之间存在负相关关系（图 5c）。通过线性拟合得到一元一次方程为：$y=2.26-0.014x$（$R^2=0.99$）。

相较 CK，打孔间距 20、40、60 cm 的土壤比重分别下降了 7.52%、7.96%、2.65%。通过二次多项式回归分析发现，打孔间距（x）与土壤容重（y）呈非线性关系（图 5d），方程为：$y=0.002x^2-0.118x+2.259$（$R^2=0.99$）。模型预测显示，当打孔间距为 32.63 cm 时，土壤比重达到理论最低值 2.06 g/cm³，略低于试验实测最低值，表明模型仍具有较好的预测可靠性。

2.2.2　切根 + 打孔组合对山地草甸土壤比重的影响

不同组合处理对山地草甸土壤比重的改良效果存在显著差异（$P<0.05$），与 CK 相比，切根 + 打孔组合处理下的土壤比重整体呈现下降趋势（图 6），其中相较 CK，$D_{20}Q_{15}$、$D_{40}Q_{15}$ 的土壤比重显著下降（$P<0.05$），降幅分别为 12.83% 和 15.49%。$D_{40}Q_5$、$D_{60}Q_{10}$ 的土壤比重较 CK 降低 7.96%；综合经济效益与改良效果，$D_{40}Q_5$ 与 $D_{60}Q_{10}$ 其土壤比重均为 2.08 g/cm³，接近理论最优值，对机械动力需求更低，更具经济可行性。

2.3　切根打孔对土壤孔隙度的影响

2.3.1　切根深度和打孔间距对山地草甸土壤孔隙度的影响

由图 7a、7b 可知，切根和打孔在一定程度上增加了山地草甸土壤孔隙度，但差异不显著（$P>0.05$）。相较 CK，各切根试验组（5、10、15 cm）的土

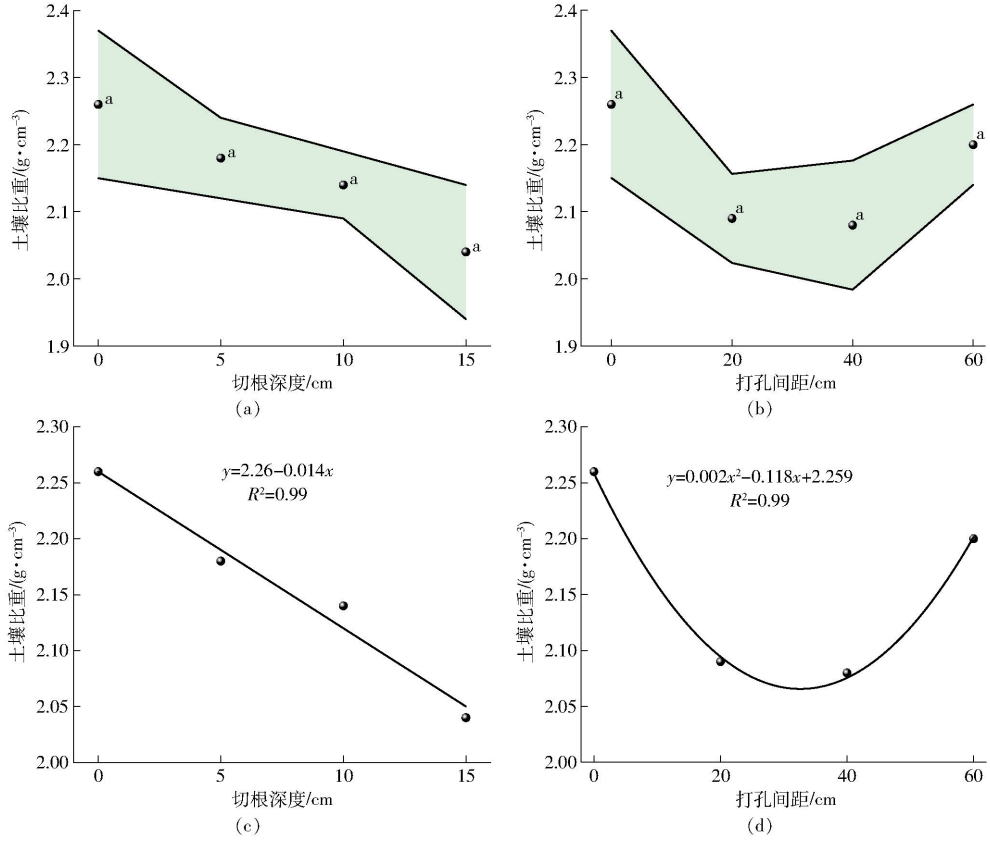


图 5　切根深度和打孔间距对山地草甸土壤比重的影响及拟合曲线

Fig. 5　Influence of root cutting depth and punching spacing on soil specific gravity in mountain meadow and its fitting curves

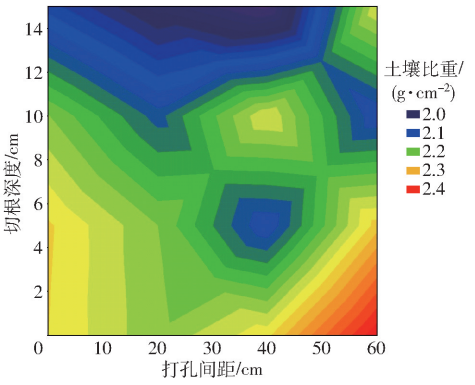


图 6 切根 + 打孔组合对山地草甸土壤比重的影响

Fig. 6 Influence of root cutting and punching combination on soil specific gravity in mountain meadow

壤孔隙度分别增加了 3.69%、2.76%、5.47%。通过建立打孔间距(x)与土壤孔隙度(y)二次回归模型,得拟合方程:$y = -0.006x^2 + 0.279\ 6x + 61.453$ ($R^2 = 0.78$)(图 7c)。结果表明,当切根深度为 23.30 cm 时,理论孔隙度可达 64.71%,略高于实测值,证实模型具有较好的预测可靠性。

相较 CK,打孔间距 20、40、60 cm 的土壤孔隙度分别提高了 5.56%、1.52%、4.82%。通过二次多项式回归分析打孔间距(x)与土壤孔隙度(y)的非线性关系(图 7d),模型显示,打孔间距与土壤孔隙度呈弱相关($R^2 = 0.32$)。表明除打孔间距参数外,其他因素(如土壤有机质含量、根系分布等)可能共

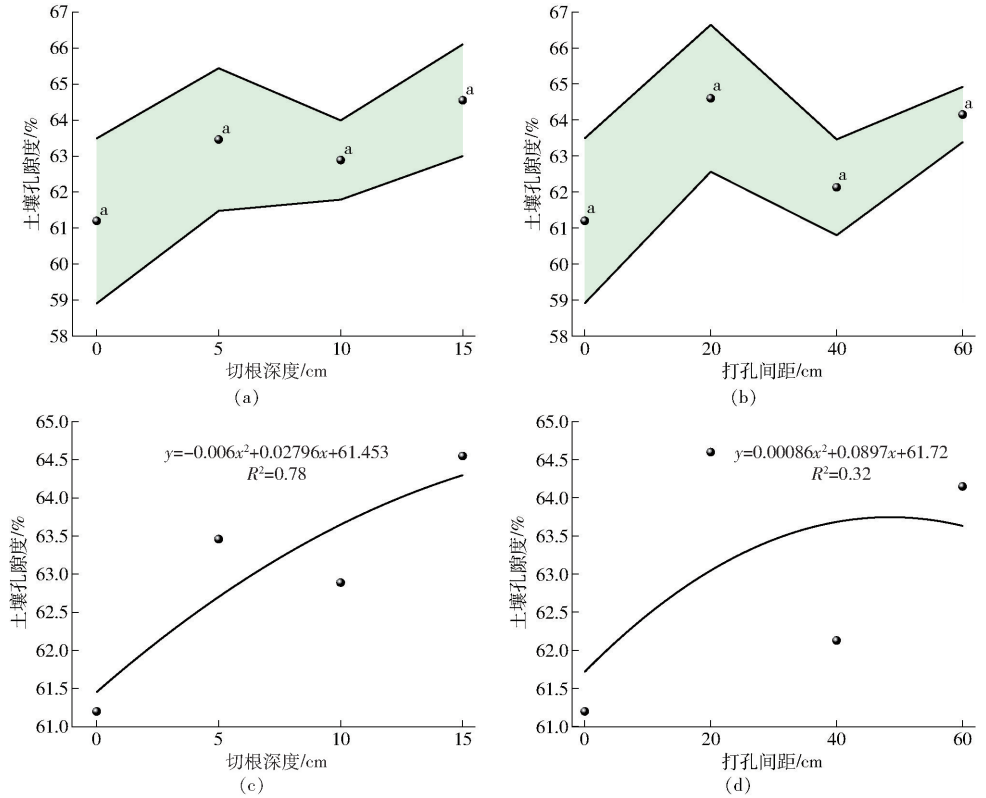


图 7 切根深度和打孔间距对山地草甸土壤孔隙度的影响及拟合曲线

Fig. 7 Influence of root cutting depth and punching spacing on soil porosity in mountain meadow and its fitting

同影响孔隙度变化。

2.3.2 切根 + 打孔组合对山地草甸土壤孔隙度的影响

由图 8 可知,相较于 CK,$D_{20}Q_{15}$ 的土壤孔隙度显著增加($P < 0.05$),而其他试验小区的土壤孔隙度虽较 CK 有所提升,但差异不显著($P > 0.05$)。其中 $D_{20}Q_{15}$ 土壤孔隙度最高,较 CK 提高 10.52%;$D_{20}Q_5$ 与 $D_{60}Q_5$ 土壤孔隙度较 CK 分别提高 6.96%、6.90%;$D_{20}Q_{15}$ 处理虽孔隙度指标最优,但实际生产难度较高,经济效益低。$D_{20}Q_5$ 与 $D_{60}Q_5$ 对提高土壤孔隙度作用都较好,而 $D_{60}Q_5$ 在保证提高土壤孔隙度的同时又能有效降低土壤容重,这一处理兼顾土

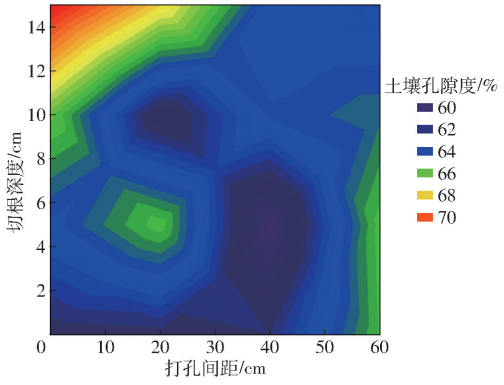


图 8 切根 + 打孔组合对山地草甸土壤孔隙度的影响

Fig. 8 Influence of root cutting and punching combination on soil porosity in mountain meadow

壤物理性质改良与机械作业经济效益，更符合山地草甸的实际应用。

2.4　切根打孔对土壤紧实度的影响

2.4.1　切根深度和打孔间距对山地草甸土壤紧实度的影响

切根和打孔在一定程度上可以降低山地草甸的土壤紧实度。切根条件下（表 3），各处理差异不显著（$P>0.05$）。切根后各处理在 5 ~ 10 cm 范围内土壤紧实度从大到小依次为 CK、Q_5、Q_{10}、Q_{15}；10 ~ 15 cm 范围内，土壤紧实度从大到小依次为 Q_5、Q_{10}、CK、Q_{15}，且 Q_{15}在 5 ~ 15 cm 整个土层范围内始终保持最低紧实度。

打孔后（表 4），相较 CK，D_{40}处理显著降低了 5 ~ 10 cm 范围内的土壤紧实度（$P<0.05$），其他处理土壤紧实度有所降低，但差异不显著（$P>0.05$）；各处理在 5 cm 土层处的土壤紧实度从大到小依次为 CK、D_{20}、D_{60}、D_{40}；10 cm 土层处，土壤紧实度从大到小依次为 CK、D_{20}、D_{60}、D_{40}；15 cm 土层土壤紧实度从大到小依次为 D_{60}、CK、D_{40}、D_{20}，其中 D_{20}较 CK 降低 32.58%。

表 3　切根深度对山地草甸土壤紧实度的影响

Tab.3　Influence of root cutting depth on soil compactness in mountain meadow　　kPa

土层深度/cm	切根处理			
	CK	Q_5	Q_{10}	Q_{15}
5	(724.67 ± 127.23)^{a}	(536.55 ± 33.30)^{a}	(463.72 ± 61.77)^{a}	(455.89 ± 119.01)^{a}
10	(1 443.17 ± 63.97)^{a}	(1 247.56 ± 63.31)^{a}	(1 253.50 ± 110.08)^{a}	(1 222.89 ± 65.01)^{a}
15	(1 408.67 ± 119.65)^{a}	(1 456.39 ± 26.79)^{a}	(1 420.05 ± 67.83)^{a}	(1 364.72 ± 30.12)^{a}

注：同行数据不同字母表示各处理组间差异显著（$P<0.05$），下同。

表 4　打孔间距对山地草甸土壤紧实度的影响

Tab.4　Influence of punching spacing on soil compactness in mountain meadow　　kPa

土层深度/cm	打孔处理			
	CK	D_{20}	D_{40}	D_{60}
5	(724.67 ± 127.23)^{a}	(548.22 ± 29.82)^{ab}	(386.94 ± 75.97)^{b}	(521.00 ± 83.38)^{ab}
10	(1 443.17 ± 63.97)^{a}	(1 309.00 ± 63.80)^{ab}	(1 172.95 ± 102.18)^{b}	(1 242.00 ± 38.40)^{ab}
15	(1 408.67 ± 119.65)^{a}	(1 366.55 ± 32.18)^{a}	(1 387.39 ± 34.89)^{a}	(1 487.22 ± 44.09)^{a}

总体而言，切根与打孔对土壤紧实度的改善效果因处理方式和土层深度而异，其中 Q_{15}切根和 D_{40}打孔有利于降低土壤紧实度。

2.4.2　切根 + 打孔组合对山地草甸土壤紧实度的影响

切根打孔组合处理在一定程度上降低了山地草甸的土壤紧实度（表 5），但各处理之间差异不显著（$P>0.05$）。土层深度为 5 cm 时，CK 土壤紧实度最高，$D_{40}Q_{15}$土壤紧实度最低，较 CK 土壤紧实度降低了 67.52%；土层深度为 10 cm 时，CK 土壤紧实度最高，$D_{40}Q_{10}$土壤紧实度最低，较 CK 土壤紧实度降低了 27.89%；土层深度为 15 cm 时，$D_{60}Q_{10}$土壤紧实度最高，$D_{20}Q_{15}$土壤紧实度最低。分析表明，切根 + 打孔组合处理对于降低 0 ~ 10 cm 土层的土壤紧实度有一定效果，为土壤生态环境的优化和植物生长提供了有利的条件。

表 5　切根 + 打孔组合对山地草甸土壤紧实度的影响

Tab.5　Influence of root cutting and punching combination on soil compactness in mountain meadow　　kPa

处理	土层深度/cm		
	5	10	15
CK	(724.67 ± 137.74)^{a}	(1 443.17 ± 54.39)^{a}	(1 408.67 ± 86.58)^{a}
$D_{20}Q_5$	(580.83 ± 214.13)^{a}	(1 190.17 ± 146.40)^{a}	(1 414.33 ± 197.14)^{a}
$D_{20}Q_{10}$	(575.17 ± 150.85)^{a}	(1 408.67 ± 116.73)^{a}	(1 380.00 ± 92.99)^{a}
$D_{20}Q_{15}$	(488.67 ± 55.92)^{a}	(1 328.17 ± 80.16)^{a}	(1 305.33 ± 58.65)^{a}
$D_{40}Q_5$	(471.33 ± 297.26)^{a}	(1 374.00 ± 101.83)^{a}	(1 448.67 ± 109.18)^{a}
$D_{40}Q_{10}$	(454.17 ± 162.38)^{a}	(1 040.67 ± 213.98)^{a}	(1 327.83 ± 107.58)^{a}
$D_{40}Q_{15}$	(235.33 ± 201.33)^{a}	(1 104.17 ± 122.20)^{a}	(1 385.67 ± 82.36)^{a}
$D_{60}Q_5$	(557.50 ± 155.39)^{a}	(1 178.50 ± 142.98)^{a}	(1 506.17 ± 141.33)^{a}
$D_{60}Q_{10}$	(361.83 ± 211.19)^{a}	(1 311.17 ± 199.79)^{a}	(1 552.33 ± 77.31)^{a}
$D_{60}Q_{15}$	(643.67 ± 259.64)^{a}	(1 236.33 ± 200.98)^{a}	(1 403.17 ± 198.86)^{a}

2.5 切根打孔对产草量的影响

2.5.1 切根深度和打孔间距对山地草甸产草量的影响

由图 9 可知,切根和打孔能提高山地草甸生产力。切根后,相较 CK,各切根试验组的鲜产草量均显著提升($P<0.05$),Q_5、Q_{10}干产草量有所提升但差异不显著($P>0.05$),Q_{15}干草产量显著提升($P<0.05$);各试验组(切根深度 5、10、15 cm)鲜产草量分别提高了 27.70%、26.54%、36.01%,干产草量提高了 18.46%、23.85%、26.80%,Q_5干鲜比低于 Q_{10},因此干产草量低于 Q_{10}。建立切根深度(x)与鲜产草量、干产草量(y)的二次函数模型(表 6),得其最佳切根深度,与切根 15 cm 时实测鲜草、干产草量偏差率仅为 3.27%、0.12%,说明该数学模型对

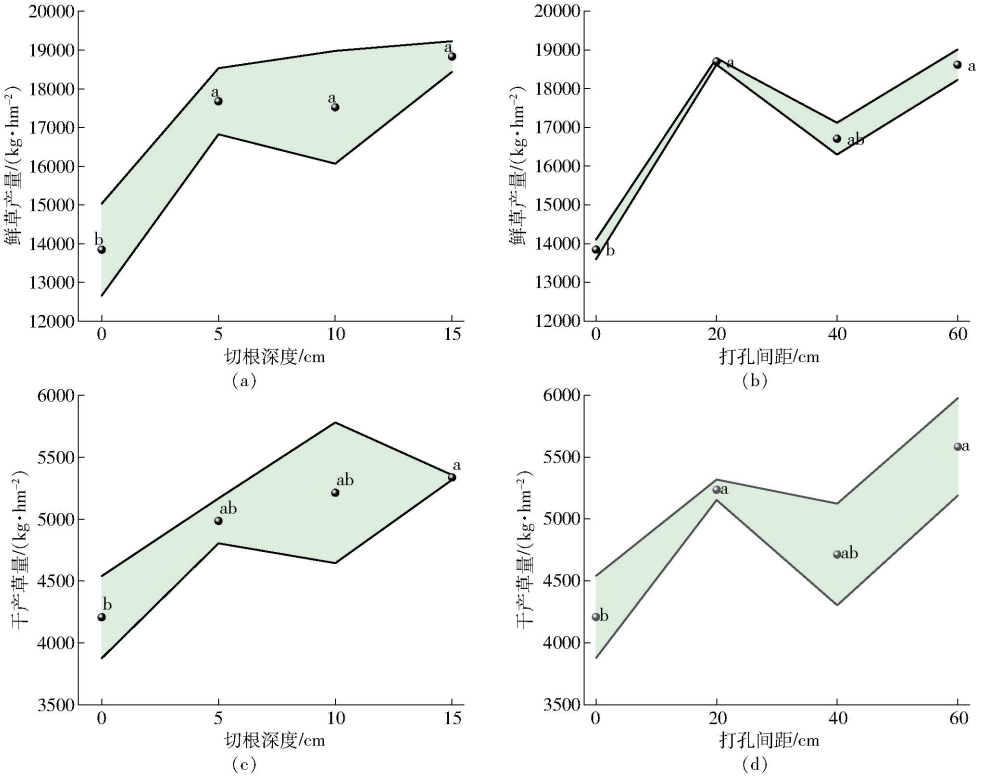


图 9 切根深度和打孔间距对山地草甸产草量的影响

Fig. 9 Influence of root cutting depth and punching spacing on grass yield in mountain meadow

表 6 切根、打孔方程建立及产量测算结果分析

Tab. 6 Analysis of equation establishment and yield measurement results for root cutting and punching

类别	处理	方程	R^2	最佳值/cm	最佳产量/(kg·hm⁻²)
鲜产草量/(kg·hm⁻²)	切根	$y=-25.21x^2+647.22x+14\,118.94$	0.89	12.84	18 216.71
	打孔	$y=-1.84x^2+172.19x+14\,383.90$	0.63	46.79	18 328.66
干产草量/(kg·hm⁻²)	切根	$y=-6.53x^2+170.13x+4\,230.49$	0.97	13.02	5 329.65
	打孔	$y=18.02x+4\,394.8$	0.60		

草地管理实践具有可靠的预测价值。

打孔后,相较 CK,D_{20}、D_{60}两组试验鲜产草量显著提升,D_{60}干产草量显著提升($P<0.05$),但各处理组间差异不显著($P>0.05$)。各打孔试验组(打孔间距 20、40、60 cm)的鲜产草量分别提高了 35.08%、20.68%、34.47%,干产草量提高了 21.43%、9.31%、29.49%,D_{20}干鲜比低于 D_{60},因此干产草量低于 D_{60}。通过建立一元二次、一元一次回归模型,分析切根深度(x)与鲜产草量、干产草量(y)的定量关系(表 6),得其最佳打孔间距,计算可知当打孔间距为 46.79 cm 时,理论鲜产草量达 18 328.66 kg/hm^2,与打孔间距 20 cm 和 60 cm 的实测鲜产草量偏差率仅为 2.00% 和 1.55%,表明模型具有较好预测精度。

2.5.2 切根 + 打孔组合对山地草甸产草量的影响

不同切根 + 打孔组合处理对山地草甸产草量具有提升作用(图 10)。相较 CK,切根 + 打孔组合处理后,鲜产草量整体提升 9.87% ~45.99%,干产草量整体提升 0.19% ~46.91%。$D_{60}Q_{10}$的鲜产草量、干产草量均显著高于 CK($P<0.05$),其他处理虽有利于产草量的提升,但差异不显著($P>0.05$)。总体而言,切根 + 打孔组合能提升伊犁河谷山地草甸

的产草量，$D_{60}Q_{10}$这一组合效果尤为突出，可作为伊犁河谷山地草甸增产实践的参考方案。

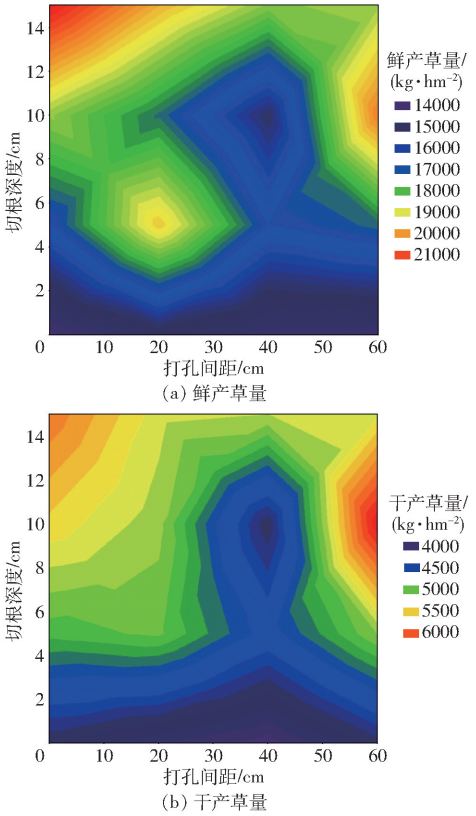


图 10　切根 + 打孔组合对山地草甸产草量的影响

Fig. 10　Influence of root cutting and punching combination on grass yield in mountain meadow

2.6　切根、打孔对土壤物理性质及产草量的相关性分析

切根后山地草甸 0 ~ 5 cm 土层中土壤物理指标、产草量之间存在相关性，如图 11a 所示（* 表示 $0.01 < P \leqslant 0.05$，** 表示 $P \leqslant 0.01$）。土壤容重（BD）与土壤比重（SG）、土壤紧实度（SC）都呈强正相关，相关系数为 0.92、0.97；与土壤孔隙度（SP）、鲜产草量（FGY）、干产草量（DGY）呈强负相关，相关系数分别为 −0.96、−1.00、−0.99。SG 与 SC 呈强正相关，相关系数为 0.88；与 SP、FGY、DGY 呈强负相关，相关系数为 −0.92、−0.90、−0.91。SP 与 SC 呈强负相关，相关系数为 −0.87；与 FGY、DGY 呈强正相关，相关系数为 0.97、0.90。SC 与 FGY、DGY 呈强负相关，相关系数为 −0.96、−1.00。FGY 与 DGY 呈强正相关，相关系数为 0.97。表明切根后土壤容重、土壤比重、土壤紧实度降低，土壤孔隙度增加，进而促进伊犁河谷山地草甸的生产力。

打孔后山地草甸 0 ~ 5 cm 土层中土壤物理指标、产草量之间存在相关性（图 11b）。土壤容重（BD）与土壤孔隙度（SP）呈负相关，相关系数为 −0.58；与鲜产草量（FGY）、干产草量（DGY）呈负相关，相关系数为 −0.90、−0.77；与土壤比重（SG）、土壤紧实度（SC）呈正相关，相关系数分别为 0.77、0.88。SG 与 SC 呈正相关，相关系数为 0.81，与 FGY 呈负相关，相关系数为 −0.58。SP 与 FGY、DGY 呈正相关，相关系数为 0.87、0.89。SC 与 FYG 呈负相关，相关系数为 −0.58。FYG 与 DGY 呈强正相关，相关系数为 0.94。表明打孔通过降低土壤容重，有效增加了土壤孔隙度，进而促进了草地生产力的提高。

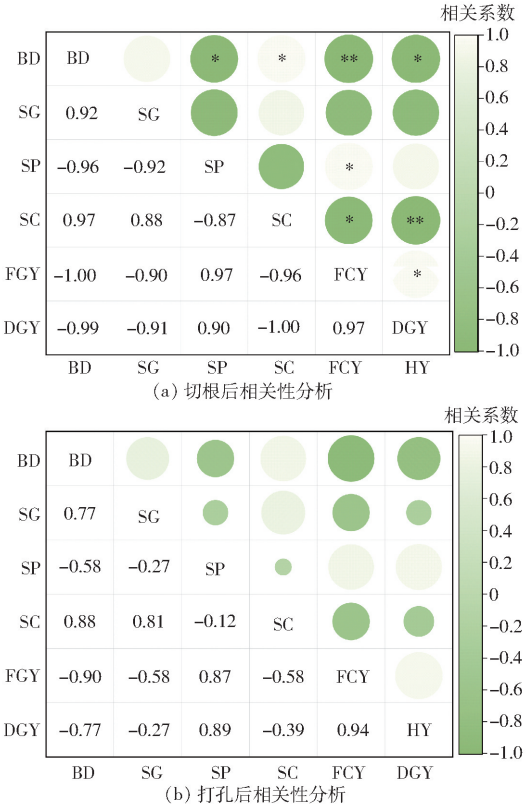


图 11　切根打孔下土壤物理指标及产草量的相关性分析

Fig. 11　Correlation analysis of soil physical indicators and grass yield under root cutting and punching

3　讨论

3.1　切根对土壤物理性质及产草量的影响

切根通过机械扰动，破除草地土壤结皮层致密结构，提升土壤通气性和透水性，提升土壤孔隙度，降低土壤容重、比重及紧实度，进而实现草地产草能力的提升。相较对照，切根处理后土壤容重降幅达 14.58% ~ 20.83%，土壤比重下降 3.54% ~ 9.73%，孔隙度提升 2.76% ~ 5.47%，同时土壤紧实度明显降低。此结果与文献[28]在松嫩退化羊草草地的研究结论一致，也与文献[29]关于犁地破坏草地土壤大团聚体、改善土壤结构的研究发现相契合。此外，文献[30]通过切根松土试验进一步证实切根能有效降低土壤容重和坚实度，显著提升土壤孔隙度。在草地生产力方面，相较对照，切根后鲜

产草量增加 26.54% ~ 36.01%，干产草量提升 18.46% ~26.80%，这一结果与文献[31]在松嫩平原开展的研究结果“5 cm 切根深度显著提高羊草地上生物量”趋势相同。通过二次方程拟合发现本试验条件下，切根深度 14.28 cm 时土壤容重达理论最低值，切根深度 23.30 cm 时土壤孔隙度达理论峰值，切根深度 12.84、13.02 cm 时，鲜产草量、干产草量达到理论最高值，而切根深度对土壤比重的影响呈现线性趋势，二者呈负相关（R^2 =0.99）。综合分析各项指标，理论最佳切根深度范围 12.84 ~ 23.3 cm，但最佳切根后各指标的对应值与切根深度 5、10、15 cm 时各指标的对应值无显著差异（P > 0.05）。前人研究中已表明 5 cm 切根深度即可显著提高地上生物量[31]，本研究虽理论深度范围更广，但结合前人实践、操作方便性及经济效益，5 ~ 10 cm 切根深度既能达到较理想的改良效果，且更具实践价值。

3.2 打孔对土壤物理性质及产草量的影响

土壤打孔是有效的草地改良方式之一，其通过对植物根际土壤进行钻孔改良土壤透气状况，提升土壤孔隙度，降低土壤容重、土壤比重、紧实度[32]。与 CK 相比，打孔后土壤容重降幅达 16.67% ~ 17.71%，土壤比重下降 2.65% ~7.96%，孔隙度提升 1.52% ~5.56%，且降低了土壤紧实度。这与文献[33]在呼伦贝尔草原研究结论“草地打孔可以增加土壤透水性，提高土壤孔隙度，降低土壤容重”一致；此外，文献[14]研究也证实打孔可以增加土壤缝隙，进而提升土壤孔隙度。在草地生产力方面，相较 CK，打孔后山地草甸的鲜产草量增加了 20.68% ~ 35.08%，干产草量提升了 9.31% ~29.49%，这与文献[34]在贝加尔针茅割草地地上生物量对打孔的响应中研究结论一致。通过二次方程拟合发现，打孔间距 43 cm 时，土壤容重达到理论最低值；打孔间距为 32.63 cm 时，土壤比重达到理论最低值；打孔间距 46.79 cm 时，鲜产草量达到理论最高值。综合分析各项指标，理论最佳打孔间距范围为32.63 ~46.79 cm，但最佳打孔间距下各指标的对应值与打孔间距 40、60 cm 时各指标的对应值无显著差异（P > 0.05）；考虑到农业生产经济效益，40 ~ 60 cm 的打孔间距即可达到较理想的改良效果。

3.3 切根 + 打孔组合效应对土壤物理性质及鲜产草量的影响

切根和打孔作为物理改良退化草地的常用方法，均能够提升土壤孔隙度，降低土壤容重、比重、紧实度，从而提升草地生产力[35]。本研究切根 + 打孔的组合效应中，$D_{20}Q_{15}$ 在土壤物理性质改良方面表现出最优效果，而 $D_{60}Q_5$ 的综合改良效果接近最优水平，其土壤容重、孔隙度与 $D_{20}Q_{15}$ 间差异不显著（P > 0.05）；$D_{60}Q_{10}$ 对山地草甸的产草量提升效果最优。此外，试验发现切根 + 打孔组合有利于降低 0 ~ 10 cm 土层的土壤紧实度。

在生产实践中，机械作业产生的压实作用是技术实施的关键考量因素。研究发现，$D_{60}Q_5$ 在降低土壤容重、提升孔隙度方面表现突出；尽管其产草量较对照（CK）增幅略低于 $D_{60}Q_{10}$，但通过优化作业参数，有效规避了过度机械作业导致的土壤压实风险，兼顾生态效益与经济效益。$D_{60}Q_5$ 既保留了对土壤结构的持续改良能力，又减少了机械作业对地表的扰动强度，更符合可持续管理的技术需求。综合土壤物理性质改良的持续性、产草量提升的效果以及机械作业的实操性，$D_{60}Q_5$ 凭借其土壤容重降低（0.78 g/cm^3）、孔隙度优化（65.42%）及产量提升的协同效应，成为本试验区最优试验组合。

4 结论

（1）切根有利于山地草甸土壤物理性质的改良且能有效提升产草量，推荐单一切根改良最佳深度为 5 ~ 10 cm。

（2）打孔能有效降低山地草甸的土壤容重、土壤比重、土壤紧实度，并提升了产草量，但对土壤孔隙度影响较小，单一打孔改良最佳间距为 40 ~ 60 cm。

（3）切根 + 打孔组合改良优化了山地草甸的土壤物理性质，并提升了产草量，$D_{60}Q_5$ 在土壤物理性质改良方面表现最优且鲜产草量较对照组提升 23.47%，打孔间距 60 cm 和切根深度 5 cm 组合是最优技术方案。

参 考 文 献

[1] 陈晨旭，张力，赵巍，等. 中国西部退化草地对不同类型恢复措施响应的 Meta 分析[J]. 草业科学，2023，40(12)：3048 - 3061.
CHEN Chenxu, ZHANG Li, ZHAO Wei, et al. The response of degraded grasslands to different types of restoration measures in western China: a Meta-analysis[J]. Pratacultural Science, 2023, 40(12): 3048 - 3061. (in Chinese)

[2] 姚欣妮，李春杰. 土壤微生物提升退化草地地力研究进展[J]. 草业科学，2025，42(4)：916 - 932.
YAO Xinni, LI Chunjie. Progress in research on the microbial enhancement of soil fertility in degraded grasslands[J]. Pratacultural Science, 2025, 42(4): 916 - 932. (in Chinese)

[3] 阳辉,廉诗启,曹建生,等. 退化草原草场修复和恢复理论与技术研究进展[J]. 生态科学,2024,43(5):207 - 215.
YANG Hui, LIAN Shiqi, CAO Jiansheng, et al. Review on theory and technology of restoration and recovery in degraded steppe [J]. Ecological Science,2024,43(5):207 - 215. (in Chinese)

[4] 王德利,王岭,辛晓平,等. 退化草地的系统性恢复:概念、机制与途径[J]. 中国农业科学,2020,53(13):2532 - 2540.
WANG Deli, WANG Ling, XIN Xiaoping, et al. Systematic restoration for degraded grasslands: concept, mechanisms and approaches[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(13): 2532 - 2540. (in Chinese)

[5] HUANG X, HOU F. Principle, technique and application of grassland improvement [J]. Journal of Environmental Management, 2024, 369:122264.

[6] 马东峰,贾存智,王学朋,等. 甘南高寒退化草甸多物种组配的修复效果评估[J]. 植物生态学报,2025,49(1):93 - 102.
MA Dongfeng, JIA Cunzhi, WANG Xuepeng, et al. Effect of multi-species grouping on restoration of alpine degraded meadows in Gannan, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2025,49(1):93 - 102. (in Chinese)

[7] 牧仁,乔俊,王丹阳,等. 石墨烯添加对无芒雀麦生长及土壤养分的影响[J]. 中国草地学报,2024,46(10):133 - 143.
MU Ren, QIAO Jun, WANG Danyang, et al. Impact of graphene addition on the growth of *Bromus inermis* and soil nutrients [J]. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(10): 133 - 143. (in Chinese)

[8] 代蓉,刘苏兴,王正文,等. 不同施肥模式对甘南亚高山草甸植被群落和土壤的影响[J]. 草地学报,2025,33(7):2184 - 2197.
DAI Rong, LIU Suxing, WANG Zhengwen, et al. Effects of different fertilization modes on vegetation and soil of alpine meadow in Gannan prefecture[J]. Acta Agrestia Sinica, 2025,33(7):2184 - 2197. (in Chinese)

[9] 赵海东,梁海红,胡小文,等. 基于草地植被恢复指数的退化高寒草甸生态修复措施初步效果评价[J/OL]. 草地学报. https://link.cnki.net/urlid/11.3362.S.20250218.1127.004.

[10] 张学宁,王德成,尤泳,等. 草地切根下根土复合体本构关系研究[J]. 农业机械学报,2022,53(7):337 - 346.
ZHANG Xuening, WANG Decheng, YOU Yong, et al. Constitutive relationship of soil-root composite based on root-cutting of grassland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(7):337 - 346. (in Chinese)

[11] 孙波,吴瑛,周大荣,等. 复合改良措施对喀斯特山区退化天然草地土壤性质和植被特征的影响[J]. 草业科学,2024,41(10):2263 - 2274.
SUN Bo, WU Ying, ZHOU Darong, et al. The impact of composite improvement measures on soil properties and vegetation characteristics of degraded natural grasslands in Karst mountainous areas[J]. Pratacultural Science,2024,41(10):2263 - 2274. (in Chinese)

[12] 贺长彬,尤泳,王德成,等. 退化草地复合体力学特性与影响因素研究[J]. 农业机械学报,2016,47(4):79 - 89.
HE Changbin, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Mechanical characteristics of soil-root composite and its influence factors in degenerated grassland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(4):79 - 89. (in Chinese)

[13] 赵朋波,邱开阳,谢应忠,等. 毛乌素沙地南缘不同固沙灌木下土壤养分的空间异质性[J]. 草地学报,2021,29(9):2040 - 2048.
ZHAO Pengbo, QIU Kaiyang, XIE Yingzhong, et al. Spatial heterogeneity of soil nutrients under different sand-fixing shrubs in Southern Mu Us Sandy Land, China[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(9): 2040 - 2048. (in Chinese)

[14] 张爽,吕世杰,丁莉君,等. 羊草草甸草原群落多样性对打孔和施肥的响应[J]. 中国草地学报,2019,41(4):80 - 86.
ZHANG Shuang, LÜ Shijie, DING Lijun, et al. Response of community diversity to drilling and fertilization in *Leymus chinensis* meadow grassland[J]. Chinese Journal of Grassland, 2019, 41(4): 80 - 86. (in Chinese)

[15] 李祎,李亚晓,亓雯雯,等. 全球草地退化的成因、修复技术及恢复效果评估研究进展[J]. 中国草地学报,2024,46(11):110 - 129.
LI Yi, LI Yaxiao, QI Wenwen, et al. Review of causes, restoration techniques, and effectiveness evaluation of global grassland degradation[J]. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(11): 110 - 129. (in Chinese)

[16] 王昭宇,尤泳,贺长彬,等. 退化羊草地切根释压松土工艺研究与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(12):404 - 417.
WANG Zhaoyu, YOU Yong, HE Changbin, et al. Research and experiment on loosening soil by cutting roots to release pressure for degraded *Leymus chinensis* grassland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(12):404 - 417. (in Chinese)

[17] 杨阳,贾丽欣,乔荠琼,等. 施肥和打孔对大针茅草群落特征及多样性的影响[J]. 中国草地学报,2019,41(5):111 - 119.
YANG Yang, JIA Lixin, QIAO Jirong, et al. Effects of fertilization and perforation on community characteristics and diversity of *Stipa grandis* steppe[J]. Chinese Journal of Grassland, 2019, 41(5): 111 - 119. (in Chinese)

[18] 仝淑萍,苗彦军,边步云,等. 不同恢复措施对藏北草地群落生产力和多样性影响的研究[J]. 草地学报,2018,26(5):1078 - 1083.
TONG Shuping, MIAO Yanjun, BIAN Buyun, et al. Effects of different restoration measures on productivity and diversity of grassland communities in Northern Tibet[J]. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(5): 1078 - 1083. (in Chinese)

[19] 陈春波,李刚勇,彭建. 1981—2018 年新疆草地归一化植被指数时空特征及其对气候变化的响应[J]. 生态学报,2023,43(4):1537 - 1552.
CHEN Chunbo, LI Gangyong, PENG Jian. Spatio-temporal characteristics of Xinjiang grassland NDVI and its response to climate change from 1981 to 2018[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(4): 1537 - 1552. (in Chinese)

[20] ZHANG M, ZHNAG F, GUO L, et al. Contributions of climate change and human activities to grassland degradation and

improvement from 2001 to 2020 in Zhaosu County, China[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 348: 119465.
[21] 刘伟,赵越,杨龙,等. 补播优良牧草对新疆昭苏退化草地生产性能和牧草品质的影响[J]. 草地学报,2025,33(1):231 - 240.
LIU Wei, ZHAO Yue, YANG Long, et al. Effects of reseeding fine grass on production performance and grass quality of degraded grassland in Zhaosu, Xinjiang[J]. Acta Agrestia Sinica,2025,33(1):231 - 240. (in Chinese)
[22] 孙世贤,杜华,哈斯巴特尔,等. 切根 + 施肥对羊草人工草地产草量及其芽库的影响[J]. 中国草地学报,2024,46(6):77 - 85.
SUN Shixian, DU Hua, HASIBATEER, et al. The effect of root cutting and fertilization on the yield and bud bank of *Leymus chinensis* artificial grassland[J]. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(6): 77 - 85. (in Chinese)
[23] 王奇,扶亚芳,司雷勇,等. 不同膜上遮挡措施对旱地玉米土壤理化性状及产量的影响[J]. 作物学报,2021,47(2):359 - 367.
WANG Qi, FU Yafang, SI Leiyong, et al. Effects of different cooling methods on maize soil physical and chemical properties and yield in dryland[J]. Acta Agronomica Sinica,2021,47(2):359 - 367. (in Chinese)
[24] 柴锦隆,徐长林,杨海磊,等. 模拟践踏和降水对高寒草甸土壤物理特性和微生物数量的影响[J]. 草业学报,2017,26(2):30 - 42.
CHAI Jinlong, XU Changlin, YANG Hailei, et al. Effect of simulated trampling and rainfall on soil physical properties and microorganism abundance in an alpine meadow[J]. Acta Prataculturae Sinica,2017,26(2):30 - 42. (in Chinese)
[25] 刘畅,张建军,张海博,等. 晋西黄土区退耕还林后土壤入渗特征及土壤质量评价[J]. 水土保持学报,2021,35(5):101 - 107.
LIU Chang, ZHANG Jianjun, ZHANG Haibo, et al. Characteristics of soil infiltration and soil quality evaluation after conversion of farmland to forest in Loess region of Western Shanxi Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(5): 101 - 107. (in Chinese)
[26] 罗峰,米文博,李文,等. 不同高寒草地生态区种植模式对饲产草量和营养品质的影响[J]. 草业科学,2024,41(8):1934 - 1947.
LUO Feng, MI Wenbo, LI Wen, et al. Effects of planting patterns on grass yield and nutritional quality in different alpine ecological regions[J]. Pratacultural Science,2024,41(8):1934 - 1947. (in Chinese)
[27] 中华人民共和国农业部. 土壤检测系列标准:NY/T 1121—2006[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
[28] 陈积山,孔晓蕾,朱瑞芬,等. 切根和施氮对退化羊草草地土壤理化性质的影响[J]. 草地学报,2018,26(5):1104 - 1108.
CHEN Jishan, KONG Xiaolei, ZHU Ruifen, et al. Effects of cutting root and nitrogen application on soil physical and chemical properties of degraded *Leymus chinensis* grassland[J]. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(5): 1104 - 1108. (in Chinese)
[29] LINSLER D,NÜSSE A,BUCHEN C, et al. Effects of chemical and physical grassland renovation on the temporal dynamics of organic carbon stocks and water-stable aggregate distribution in a sandy temperate grassland soil[J]. Soil Use and Management, 2018,34(4):490 - 499.
[30] 张学宁,尤泳,王得伟,等. 板结羊草草地切根松土镇压机设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(增刊1):135 - 146,164.
ZHANG Xuening, YOU Yong, WANG Dewei, et al. Design and experiment of root-cutting and subsoiler for compacted *Leymus chinensis* grassland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(Supp. 1): 135 - 146,164. (in Chinese)
[31] 张佳良,曹杰,邓波,等. 垂直切根可以改善松嫩草地羊草生长[J]. 草业科学,2017,34(5):1057 - 1063.
ZHANG Jialiang, CAO Jie, DENG Bo, et al. Root cutting can improve the growth of *Leymus chinensis* in Songnen Plain[J]. Pratacultural Science,2017,34(5):1057 - 1063. (in Chinese)
[32] 闫瑞瑞,卫智军,乌仁其其格,等. 微生物肥料对呼伦贝尔打孔羊草草甸草原土壤微生物及酶活性的影响研究[J]. 生态环境学报,2017,26(4):597 - 604.
YAN Ruirui, WEI Zhijun, WURENQIQIGE, et al. Effect of combined microbial fertilizer on soil microorganism and enzyme activity in the Hulunber punching *Leymus chinensis* meadow steppe[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(4): 597 - 604. (in Chinese)
[33] 杨轶博,郑志荣,刁兆岩,等. 呼伦贝尔草原不同打孔技术土壤入渗特征比较[J]. 生态与农村环境学报,2025,41(5):662 - 668.
YANG Yibo, ZHENG Zhirong, DIAO Zhaoyan, et al. Soil infiltration characteristics under different drilling treatments in Hulunbuir grassland[J]. Journal of Ecology and Rural Environment,2025,41(5):662 - 668. (in Chinese)
[34] 吕世杰,张爽,刘红梅,等. 贝加尔针茅割草地地上生物量对施肥及打孔的响应[J]. 草地学报,2018,26(2):330 - 340.
LÜ Shijie, ZHANG Shuang, LIU Hongmei, et al. Responses of aboveground biomass to fertilizing and perforating in *Stipa baicalensis* clipping pasture[J]. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(2): 330 - 340. (in Chinese)
[35] 张超,闫瑞瑞,梁庆伟,等. 不同利用方式下草地土壤理化性质及碳、氮固持研究[J]. 草业学报,2021,30(4):90 - 98.
ZHANG Chao, YAN Ruirui, LIANG Qingwei, et al. Study on soil physical and chemical properties and carbon and nitrogen sequestration of grassland under different utilization modes[J]. Acta Prataculturae Sinica,2021,30(4):90 - 98. (in Chinese)