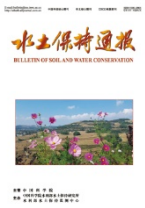


水土保持通报
Bulletin of Soil and Water Conservation
ISSN 1000-288X,CN 61-1094/X

《水土保持通报》网络首发论文

题目：　黄土坡面种植柠条对土壤团聚体稳定性和可蚀性的影响
作者：　杨璐，刘小芳，巨佳敏，张秀敏，常富强，赵勇钢
DOI：　10.13961/j.cnki.stbctb.20240528.003
收稿日期：　2023-10-10
网络首发日期：　2024-05-30
引用格式：　杨璐，刘小芳，巨佳敏，张秀敏，常富强，赵勇钢．黄土坡面种植柠条对土壤团聚体稳定性和可蚀性的影响[J/OL]．水土保持通报．https://doi.org/10.13961/j.cnki.stbctb.20240528.003

网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.20240528.003　网络首发时间：2024-05-30 11:00:22
网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/61.1094.X.20240528.1508.006

黄土坡面种植柠条对土壤团聚体稳定性和可蚀性的影响

杨 璐，刘小芳，巨佳敏，张秀敏，常富强，赵勇钢
（山西师范大学 生命科学学院，山西 太原 030031）

摘　要：［目的］探究黄土丘陵区坡面长期种植柠条对土壤团聚体稳定性和可蚀性的影响，为黄土高原人工植被建设和生态环境恢复提供理论依据。［方法］以荒草坡地为对照，选取坡面沿等高线种植的不同年限（15，25，35 年）柠条地为研究对象，分析长期种植柠条对坡面土壤团聚体稳定性和可蚀性的变化特征及其主要影响因素。［结果］①样地土壤团聚体稳定性指标平均重量直径（MWD）、几何平均直径（GMD）和＞0.25 mm 团聚体含量（$WR_{0.25}$）总体表现为：15 年柠条地＞荒草地＞25 年柠条地＞35 年柠条地，在坡面位置上表现为坡下＞坡顶＞坡中＞坡上，土壤可蚀性因子 K 值则有相反的趋势。②随着柠条种植年限的增加，相较于荒草地，各坡位柠条带土壤团聚体稳定性指标均呈先增后降的趋势，间隔荒草带则持续降低，两者的差值在柠条种植年限大于 15 a 后逐渐扩大，且在坡下位置最为明显。③土壤有机碳和坡位是影响坡面土壤团聚体稳定性与可蚀性的主要因素，分别解释了 38.0%和 4.1%的变异，其次是种植年限和海拔。［结论］黄土丘陵区坡面带状柠条种植通过影响土壤有机碳分布，进而影响土壤团聚体稳定性和可蚀性。柠条种植小于 15 a 有助于土壤团聚体稳定性的提升和可蚀性的下降，但大于 15 a 后逐渐有相反趋势，尤其在坡下位置。

关键词：柠条；种植年限；土壤团聚体稳定性；土壤可蚀性
文章编号：1000-288X(2024)03-0000-00　**中图分类号：**S157.1

文献参数：杨璐，刘小芳，巨佳敏，等.黄土坡面种植柠条对土壤团聚体稳定性和可蚀性的影响[J].水土保持通报，2024，44(3).　Yang Lu，Liu Xiaofang，Ju Jiamin，et al. Effects of *Caragana korshinskii* plantation on soil aggregate stability and erodibility on loess slopes [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2024，44(3).

Effects of *Caragana korshinskii* Plantation on Soil Aggregate Stability and Erodibility on Loess Slopes

Yang Lu，Liu Xiaofang，Ju Jiamin，Zhang Xiumin，Chang Fuqiang，Zhao Yonggang
（*College of Life Sciences*，*Shanxi Normal University*，*Taiyuan*，*Shanxi* 030031，*China*）

Abstract：［Objective］The effects of a long-term *Caragana korshinskii*（*C. korshinskii*）plantation on the stability of soil aggregates and erodibility on loess hilly slopes were determined，in order to provide theoretical support for artificial vegetation construction and ecological restoration in the Loess Plateau region.［Methods］A barren grassy slope was compared with *C. korshinskii* plots of different plantation ages（15，25，35 years）along similar slope contour lines. the characteristics of changes in soil aggregate stability and erodibility due to a long-term *C. korshinskii* plantation was analyzed，as well as the main influencing factors.［Results］① The soil aggregate stability indicators（i.e.，mean weight diameter（MWD），geometric mean diameter（GMD），and the content of aggregates ＞0.25 mm（$WR_{0.25}$））generally followed the order of 15-year *C. korshinskii* plantation ＞ barren grassy land ＞ 25-year *C. korshinskii* plantation ＞ 35-year *C. korshinskii* plantation. In terms of slope position，the order was bottom slope ＞ top slope ＞ mid-slope ＞

收稿日期：2023-10-10　**修回日期：**2023-12-11
资助项目：国家自然科学基金项目“黄土丘陵区植物根系与土壤大孔隙对优先流的影响”（42007064）；山西省研究生教育创新项目“晋南黄土区灌草坡地土壤优先流形成的驱动机制”（2022Y486）；山西省自然科学研究面上项目“黄土丘陵区灌草复合生态系统深层土壤水分消耗驱动机制”（202203021221133）
第一作者：杨璐（1998—），女（汉族），河南省信阳市人，硕士研究生，主要从事土壤生态方面的研究。Email：1259352968@qq.com。
通信作者：刘小芳（1980—），女（汉族），山西省晋中市人，博士，副教授，主要从事植被恢复生态效应方面的研究。Email：liuxiaofang04@163.com。

upper slope. Conversely, the soil erodibility K factor exhibited an opposite trend. ② As *C. korshinskii* plantation age increased compared with barren grassy land, soil aggregate stability indicators initially increased and then decreased, while the stability of barren grassy strips continuously declined. The difference between the two became more pronounced after plantation age exceeded 15 years, especially at the bottom slope. ③ Soil organic carbon and slope position were the main factors influencing soil aggregation stability and erodibility on the slope, explaining 38% and 4.1% of the variation, respectively, followed by plantation age and altitude. [Conclusion] Strip planting of *C. korshinskii* on loess hilly slopes affected the distribution of soil organic carbon, thereby influencing soil aggregate stability and erodibility. Plantations of less than 15 years contributed to an increase in soil aggregate stability and a reduction in erodibility, but a reverse trend gradually emerged with older plantations, particularly at the bottom slope locations.

Keywords: *Caragana korshinskii*; plantation years; soil aggregate stability; soil erodibility

土壤团聚体是土壤结构的基本构成单位,影响着土壤的物理、化学和水肥气热性质,以及生态系统的多个关键过程[1]。土壤可蚀性常被用来评价土壤是否易受侵蚀营力破坏,土壤可蚀性因子(K 值)越大,意味着土壤更容易受到侵蚀。土壤团聚体稳定性和土壤可蚀性 K 值是评价土壤结构稳定性的重要指标[2],在土壤侵蚀、水文循环、植物根系生长、碳储存等研究中有重要作用。在坡面尺度上,土壤团聚体稳定性和可蚀性受降水、植被覆盖、地形特征和土壤性质等多种因素的综合影响[3]。植被覆盖能够通过减缓降雨对土壤的直接冲击,提高土壤有机质含量,从而增强土壤团聚体的稳定性[4]。同时,植物的根系活动和有机质输入也对土壤团聚体稳定性产生积极影响[5]。地形因素,如坡位、坡度和坡向,也会影响土壤水分、养分和颗粒等物质在坡面上的分布,进而影响土壤团聚体的稳定性和可蚀性[6]。已有研究表明,植被恢复年限和坡面位置均与土壤团聚体稳定性密切相关[7-9]。然而,坡面位置和长期植被恢复两种因素结合作用对土壤团聚体稳定性和可蚀性的影响研究较少,仍需进一步探明。

黄土高原干旱缺水与水土流失严重并存,生态系统脆弱,威胁着区域的生态环境和社会生产生活,为解决这些问题,中国在该区域实施了大规模的植被建设工程[10]。在黄土丘陵区,柠条(*Caragana korshinskii*)因其生长迅速、根蘖性强、耐干旱瘠薄等优点,成为生态建设中重要的人工灌木树种之一[11]。坡面是进行水土保持措施的重点对象,通常会在坡面沿着等高线种植柠条,这种方式会形成一种植物篱,同时中间留下一段荒草带,形成了一种灌草复合生态系统[12]。这种植被建设模式使得坡面上的土壤性质(如土壤水分、养分)在空间流通和分配上发生变化,进而对土壤团聚体的形成和稳定性产生影响。目前对黄土高原柠条种植和坡位影响下的土壤团聚体稳定性影响的研究已有一些,但在坡面尺度上综合考虑柠条长期种植影响下所形成的灌草复合生态系统对土壤团聚体稳定性与可蚀性影响的研究还不多。本研究在黄土丘陵区选取 3 种不同种植年限的柠条林坡地为研究对象,并以相邻荒草坡地为对照,研究坡面尺度上土壤团聚体的分布、稳定性和可蚀性 K 值,并分析其环境影响因素,阐明坡面柠条长期种植对土壤团聚体稳定性与可蚀性 K 值的影响,为黄土高原地区植被建设和生态环境评价提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

研究区位于宁夏回族自治区固原市上黄村(E106°26′—106°27′,N35°59′—36°01′)。该区属典型黄土高原丘陵区,土壤类型多为黄土母质上发育的黄绵土。该区为温带大陆性半干旱气候,年均气温为 6.9 ℃,年均潜在蒸发量为 1 558.3 mm。年均降水量为 419.1 mm,年内降雨变化很大,约 71%的降雨量集中于 6 月至 9 月,其中大部分是高强度的暴雨,是土壤侵蚀发生的主要时间段。该地区的植被覆盖较低,地势复杂,因长期过度耕作导致水土流失问题突出。国家生态环境建设和退耕还林(草)工程已对该区域的大部分坡地进行了自然或人工植被修复,其中人工植被修复以柠条为主。主要的自然植被类型有长芒草(*Stipa bungeana*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、大针茅(*Stipa grandis*)、百里香(*Thymus mongolicus*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、星毛委陵菜(*Potentilla acaulis*)、茭蒿(*Artemisia giraldii.*)、早熟禾(*Poa annua*)等。

1.2 样品采集

选取研究区 4 个不同坡地为研究样地(图 1a),分别为种植 15 a 柠条地(N15,2004 年种植),25 a 柠条地(N25,1994 年种植),35 a 柠条地(N35,1984 年种植)和对照荒草地(CK,大于 40 a 的自然草地)。柠条种植年限和土地使用历史主要通过与当地村委

会和村民的沟通来确定。坡地上柠条以等高线模式进行带状种植,相邻两条柠条带中间为间隔荒草地。因此,4 个样地可细分为 N15 柠条地(N15-S)、N15 荒草地(N15-G)、N25 柠条地(N25-S)、N25 荒草地(N25-G)、N35 柠条地(N35-S)、N35 荒草地(N35-G)和 CK,共 7 个样地。

对每个样地,沿坡面线状布点进行采样,每隔 15 m设置一个样点,在每个样点将柠条带和间隔荒草带成对进行采样,共设置 99 个样点,并在每个样点沿等高线水平设置 3 个 10 m×10 m 的样方作为 3 个重复,重复之间的距离大于 20 m。其中 N15-S 和 N15-G 分别设置 14 个样点,N25-S 和 N25-G 分别设置 11 个样点,N35-S 和 N35-G 分别设置 17 个样点,CK 设置 15 个样点,并按照采样点的海拔划分为坡顶、坡上、坡中和坡下 4 个坡位(图 1b)。于 2019 年 7 月在每个样点采集原状土、混合样和环刀样,以分析土壤理化性质,采集深度为 0—10 cm。采样期间,记录每个样地的经纬度、海拔高度、坡度和坡向,以及植被种类、株高、冠幅、种植密度等生态学信息,各采样点基本情况见表 1。

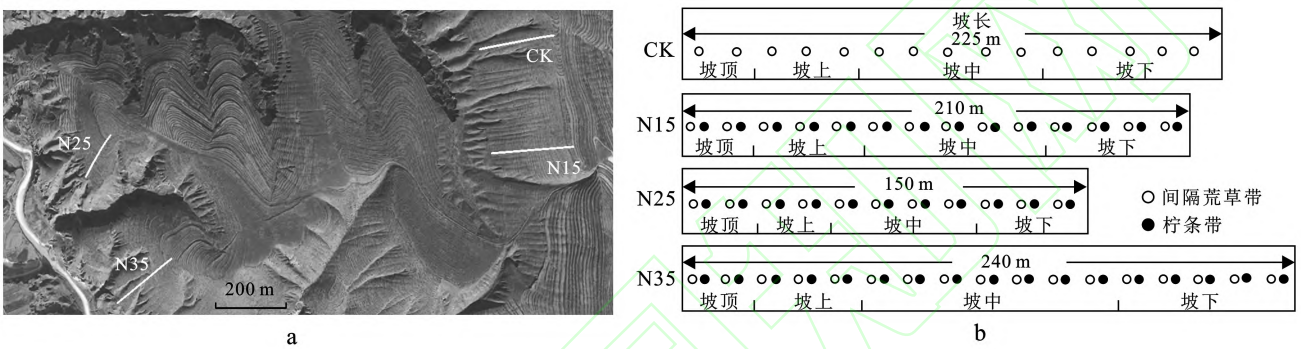


图 1　研究区位置及采样线(a)和坡面采样点分布(b)

Fig.1　The location of the study area and the sampling line (a) and the distribution of sampling points on the slope (b)

表 1　采样点的基本信息

Table 1　Basic Information of Sampling Points

样地	经纬度	海拔/m	坡度/(°)	株高/m	冠幅/m^2	种植密度/(株·hm^{-2})	样点数/个
CK	E106°29′01.67″ N36°00′40.56″	1 711～1 797	0～25	—	—	—	15
N15	E106°29′03.81″ N36°00′31.04″	1 713～1 810	0～20	1.1～2.0	3.1～3.4	7 333～7 910	28
N25	E106°47′48.63 N36°00′91.04″	1 629～1 675	0～23	1.0～2.0	3.2～4.1	6 666～6 950	22
N35	E106°28′21.58″ N36°00′20.16″	1 563～1 668	0～23	1.4～2.0	4.0～4.7	6 666～6 954	34

1.3　土壤样品测定分析

土壤容重采用环刀法测定。土壤机械组成采用激光粒度仪(Mastersizer2 000)法进行测定,土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾外加热法测定[13]。

土壤团聚体稳定性采用沙维诺夫法[14]测定。取 200 g 风干土样,采用干筛法得到>2,2～0.25,0.25～0.053 和<0.053 mm 团聚体。按照干筛法测得的各级团聚体质量百分数,按比例配成 50 g 土样,采用湿筛法得到>2,2～0.25,0.25～0.053 和<0.053 mm 的水稳性团聚体。

土壤团聚体平均重量直径(MWD),几何平均直径(GMD),>0.25 mm 团聚体破坏率($PAD_{0.25}$)和可蚀性 K 值计算公式[15-16]为:

$$MWD=\sum_{i}^{n}x_i w_i/\sum_{i}^{n}w_i \tag{1}$$

$$GMD=\exp\left(\sum_{i}^{n}w_i \ln x_i/\sum_{i}^{n}w_i\right) \tag{2}$$

$$PAD_{0.25}=\frac{WD_{0.25}-WR_{0.25}}{WD_{0.25}}\times 100\% \tag{3}$$

$$K=7.954\times\left\{0.001\,7+0.0494\times \exp\left[-0.5\times\left(\frac{\lg GMD+1.675}{0.698\,6}\right)^2\right]\right\} \tag{4}$$

式中:x_i 为第 i 级团聚体平均直径(mm);w_i 为第 i 级团聚体质量分数(%);$WD_{0.25}$ 表示>0.25 mm 各粒级机械稳定性团聚体质量分数(%);$WR_{0.25}$ 表示>0.25 mm 各粒级水稳性团聚体质量分数(%)。

1.4　数据分析

柠条种植年限和坡位对土壤团聚体分布、稳定性

和可蚀性 K 因子的影响，采用单因素或双因素进行方差分析，并用最小显著性差异法（LSD）进行多重比较，显著性水平为 0.05。相关性分析采用 Pearson 相关分析法。数据统计分析使用 SPSS 25.0 软件，冗余分析（RDA）使用 Canoco5 软件，绘图采用 Origin 2022 软件。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质

双因素方差分析结果（表 2）表明，样地和坡位对黏粒、砂粒、容重和有机碳有显著影响（$P<0.05$），坡位对粉粒有显著影响（$P<0.05$）。总体来说，随着种植年限的增加，柠条带和间隔荒草带的黏粒、粉粒和有机碳含量均下降，砂粒含量和容重则呈相反的趋势。随着坡位的下降，各样地黏粒、粉粒和有机碳含量表现为先减少后增加，而砂粒和容重则呈相反的趋势。同一样地中，柠条带的黏粒、粉粒和有机碳含量均高于间隔荒草带，砂粒含量和容重则低于间隔荒草带。除粉粒含量外，N15-S 的黏粒、粉粒和有机碳含量均显著高于对照荒草地（$P<0.05$）。

表 2 坡面不同样地土壤理化性质比较

Table 2 Comparison of physicochemical properties of soil in different plot types on slope surface

		黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	容重/(g·cm^{-3})	土壤有机碳/(g·kg^{-1})
样地	CK	16.77±1.25^{b}	60.78±1.01^{ab}	22.45±2.01^{bc}	1.02±0.10^{c}	16.40±4.27^{bc}
	N15-G	17.23±1.89^{b}	61.01±1.11^{ab}	21.76±2.69^{c}	1.04±0.08^{c}	17.01±4.87^{b}
	N15-S	18.50±1.69^{a}	61.57±1.23^{a}	19.92±2.59^{d}	0.95±0.06^{d}	21.09±5.11^{a}
	N25-G	15.36±1.24^{c}	60.89±1.10^{ab}	23.75±1.74^{ab}	1.15±0.05^{b}	13.04±2.54^{c}
	N25-S	17.38±1.79^{b}	61.23±1.20^{a}	21.39±2.87^{cd}	1.03±0.10^{c}	17.93±6.47^{ab}
	N35-G	15.56±0.89^{c}	60.27±0.92^{b}	24.17±1.07^{a}	1.21±0.04^{a}	12.93±2.34^{c}
	N35-S	17.24±1.20^{b}	61.36±0.79^{a}	21.40±1.70^{cd}	1.02±0.04^{c}	14.45±3.85^{bc}
坡位	坡顶	16.86±1.65^{B}	60.66±0.75^{B}	22.48±1.97^{A}	1.07±0.11^{A}	16.11±4.03^{B}
	坡上	15.86±1.17^{C}	60.64±0.95^{B}	23.51±1.56^{A}	1.08±0.09^{A}	13.09±3.77^{C}
	坡中	16.52±1.43^{BC}	60.94±0.94^{AB}	22.53±1.96^{A}	1.08±0.11^{A}	14.98±3.61^{BC}
	坡下	17.95±1.84^{A}	61.47±1.36^{A}	20.57±3.02^{B}	1.02±0.12^{A}	19.21±5.96^{A}
P 值	样地	<0.001	0.118	<0.001	<0.001	<0.001
	坡位	<0.001	0.006	<0.001	<0.001	<0.001
	样地×坡位	0.71	0.013	0.357	<0.001	0.131

注：不同小写字母表示不同样地之间的差异显著（$P<0.05$），不同大写字母表示不同坡位间差异显著（$P<0.05$），未标注大小写字母则表示样地或坡位间差异不显著（$P>0.05$），P 值<0.05 字体加粗。

2.2 土壤团聚体分布

种植年限和坡位对除 0.25～0.053 mm 粒级外的其他粒级团聚体含量有显著（$P<0.05$）影响（表 3）。从样地来看，>2，2～0.25 mm 粒级团聚体含量总体表现为：N15>CK>N25>N35。随着柠条种植年限增加，>2，2～0.25 mm 粒级团聚体含量在柠条带和间隔荒草带持续降低，<0.053 mm 粒级团聚体含量在柠条带表现出先降低后增加的趋势，在间隔荒草带表现出持续增加的趋势。与对照荒草地（CK）相比，N25-G 和 N35-G 样地的>2 mm 粒级团聚体含量以及 N35-G 样地的 2～0.25 mm 粒级团聚体含量有显著降低（$P<0.05$），N35-G 样地的<0.053 mm 粒级团聚体含量有显著增加（$P<0.05$）。从坡位来看，>0.25 mm 粒级团聚体含量表现为：坡下>坡中>坡上，<0.25 mm 粒级团聚体含量则表现出相反趋势。坡下>2，2～0.25 mm 粒级团聚体含量显著高于坡上，<0.053 mm 粒级团聚体含量则显著低于坡上（$P<0.05$）。

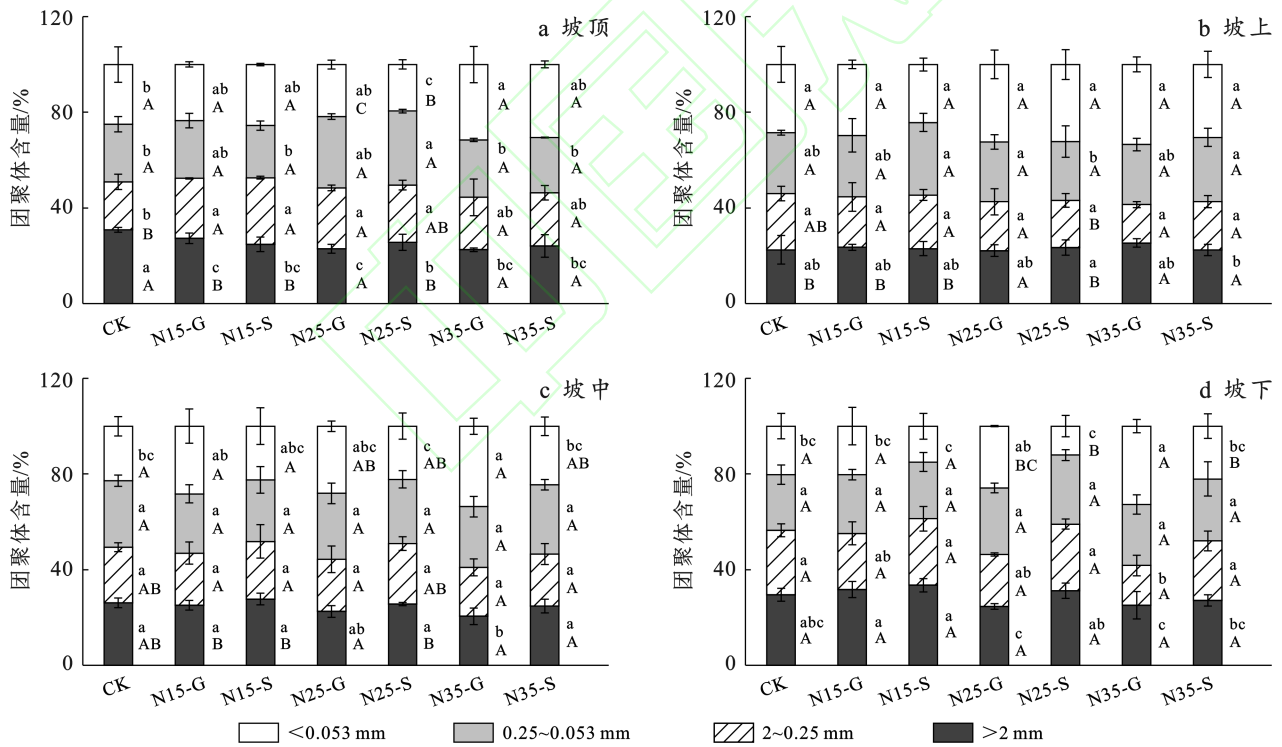
不同样地土壤水稳定性团聚体含量分布在不同坡位有较大的差异（图 2）。在坡顶，CK 样地>2 mm 粒径团聚体含量显著高于其他样地（$P<0.05$），N25-S 样地<0.053 mm 粒径团聚体含量显著低于其他样地（$P<0.05$），N15-S 样地>0.25 mm 粒级团聚体含量最多。各样地>0.25 mm 团聚体含量随着坡面的下降表现为先降低后增加，<0.25 mm 团聚体含量则有相反的趋势。坡位对于柠条样地团聚体粒级的影响主要在坡下位置，N15-G，N15-S 和 N25-S 样地>2 mm 粒级团聚体含量在坡下要显著（$p<0.05$）高于其他坡位。在相同坡位中，柠条带>0.25 mm 粒级团聚体含量均大于间隔荒草带，<0.25 mm 团聚体含量呈相反趋势，并随着种植年限的增加和坡位的下降，间隔荒草带的大团聚体（>0.25 mm）含量显著低于柠条带。

表 3　不同样地和坡位下土壤水稳定性团聚体分布、稳定性和可蚀性 *K* 值指标的平均值和方差分析

Table 3　Mean and variance analysis of soil water stability aggregate distribution, stability and erodibility *K* indicators in different plots and slope positions

		团聚体分布/%				团聚体稳定性指标				可蚀性指标
		>2 mm	2~0.25 mm	0.25~0.053 mm	<0.053 mm	$WR_{0.25}$/%	MWD/mm	GMD/mm	$PAD_{0.25}$/%	*K*
样地	CK	27.2±4.2^{a}	24.1±3.3^{a}	25.3±3.3	23.4±5.9^{bc}	51.3±6.1^{ab}	0.86±0.10^{ab}	0.28±0.06^{ab}	18.13±5.16^{b}	0.13±0.03^{cd}
	N15-G	27.0±4.0^{a}	22.6±4.4^{a}	24.8±3.7	25.6±6.8^{bc}	49.5±6.3^{abc}	0.84±0.10^{ab}	0.26±0.07^{abc}	21.53±5.13^{ab}	0.13±0.02^{bcd}
	N15-S	27.9±4.7^{a}	25.3±5.2^{a}	25.6±4.9	21.2±6.6^{c}	53.3±7.6^{a}	0.89±0.11^{a}	0.31±0.08^{a}	20.85±8.24^{ab}	0.12±0.03^{d}
	N25-G	23.1±2.0^{b}	22.2±4.0^{a}	27.6±3.1	27.1±4.2^{b}	45.3±3.3^{cd}	0.76±0.04^{cd}	0.23±0.03^{cd}	20.37±4.69^{b}	0.14±0.02^{b}
	N25-S	26.7±3.6^{a}	24.7±3.6^{a}	27.8±3.8	20.8±8.2^{c}	51.5±6.4^{ab}	0.86±0.10^{ab}	0.30±0.08^{a}	18.28±3.17^{b}	0.12±0.03^{cd}
	N35-G	23.0±4.3^{b}	18.7±4.3^{b}	25.2±3.5	33.1±3.4^{a}	41.7±2.9^{d}	0.72±0.05^{d}	0.19±0.02^{d}	25.76±7.16^{a}	0.17±0.01^{a}
	N35-S	25.0±3.0^{ab}	22.5±4.0^{a}	27.0±4.5	25.6±5.3^{bc}	47.4±5.3^{bc}	0.80±0.08^{bc}	0.25±0.05^{bc}	20.96±6.39^{ab}	0.14±0.02^{bc}
坡位	坡顶	26.3±5.2^{B}	22.0±3.6^{A}	24.9±3.2	26.9±5.4^{BC}	49.2±3.8^{B}	0.82±0.06^{B}	0.26±0.04^{B}	20.58±5.43^{AB}	0.13±0.02^{BC}
	坡上	23.2±3.6^{B}	19.3±2.4^{B}	27.5±4.3	30.1±3.2^{A}	43.8±4.3^{C}	0.74±0.06^{C}	0.21±0.03^{C}	24.02±6.00^{A}	0.15±0.02^{A}
	坡中	25.4±2.7^{B}	22.1±1.7^{AB}	27.0±2.0	25.4±4.6^{AB}	46.9±5.3^{BC}	0.79±0.08^{BC}	0.24±0.05^{BC}	22.08±5.40^{A}	0.14±0.02^{AB}
	坡下	29.2±4.6^{A}	24.1±4.4^{A}	26.2±2.4	20.6±7.8^{C}	52.9±7.9^{A}	0.89±0.12^{A}	0.30±0.09^{A}	18.04±7.16^{B}	0.12±0.03^{C}
P 值	样地	0.001	0.005	0.356	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.034	<0.001
	坡位	<0.001	0.025	0.659	<0.001	0.001	0.001	<0.001	0.031	<0.001
	样地×坡位	0.105	0.614	0.512	0.228	0.304	0.129	0.156	0.629	0.303

注：在同一团聚体粒级、稳定性、与可蚀性指标下，不同小写字母表示样地间差异显著（$P<0.05$），不同大写字母表示坡位间差异显著（$P<0.05$），未标注大小写字母则表示样地或坡位间差异不显著（$P>0.05$），*P* 值<0.05 字体加粗。



注：不同小写字母表示相同坡位和粒级下，不同样地间团聚体含量差异显著（$P<0.05$）；不同大写字母表示相同样地和粒级下，不同坡位间团聚体含量差异显著（$P<0.05$），未标注大小写字母则表示样地或坡位间差异不显著（$P>0.05$）。

图 2　不同样地和坡位下土壤团聚体含量分布

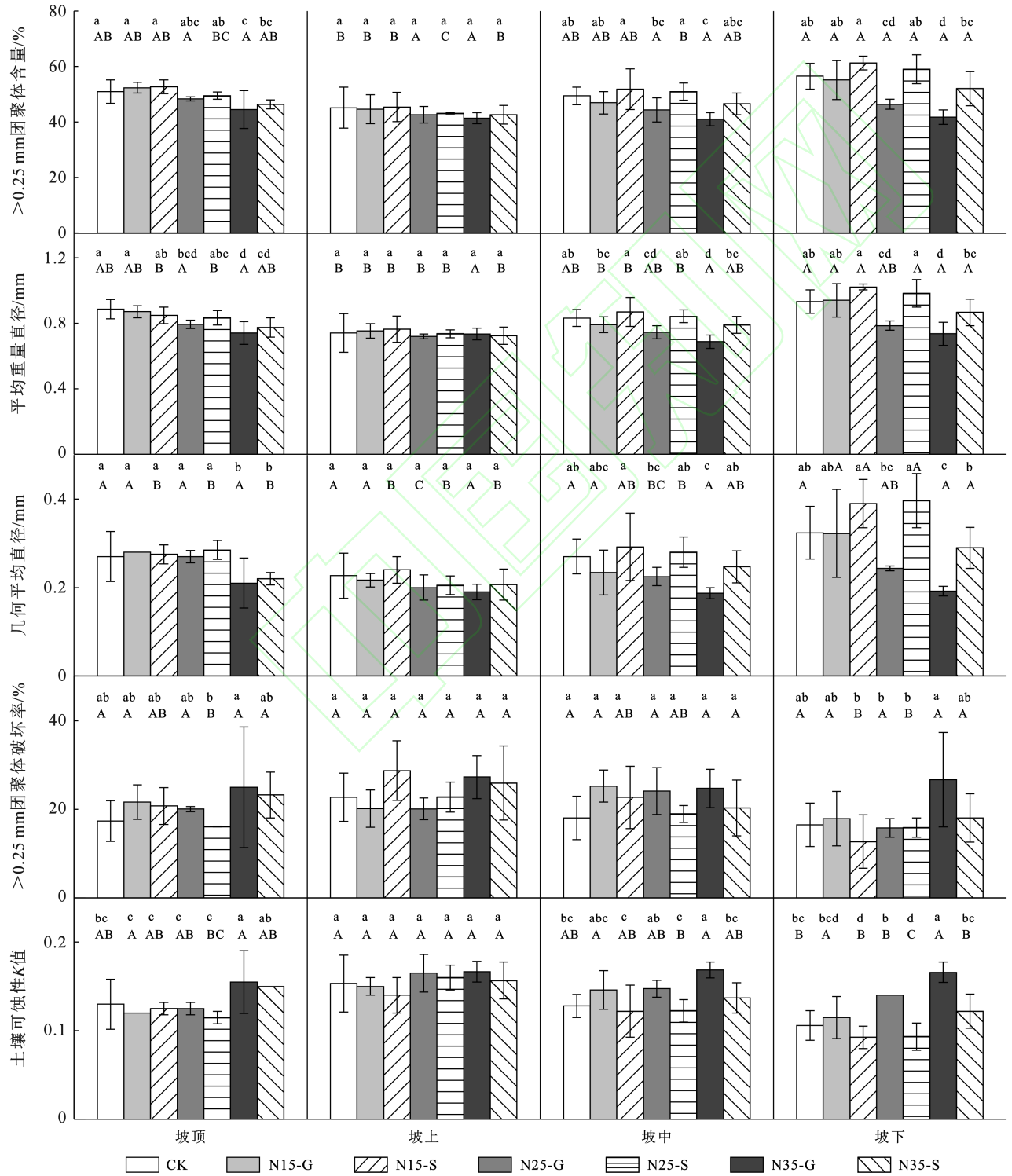
Fig.2　Distribution of soil aggregate content under different plot types and slope positions

2.3　土壤团聚体稳定性与可蚀性 *K* 值指标

种植年限和坡位对 $WR_{0.25}$，MWD，GMD，$PAD_{0.25}$ 和可蚀性 *K* 值均有显著性（$P<0.05$）影响（表 3）。从样地来看，$WR_{0.25}$，MWD 和 GMD 值总体表现为：N15>CK>N25>N35。$WR_{0.25}$，MWD 和 GMD 值在柠条带均大于间隔荒草带，并随着柠条种植年限的增加而降低。与 CK 相比，N15-S 样地的 $WR_{0.25}$，MWD 和 GMD 值具有最大值，分别提高了 3.9%，3.5% 和 10.7%；N35-G 样地则具有最低值，分别降低了 18.7%，16.3% 和 32.1%。土壤可蚀性 *K* 值与团聚体破坏率 $PAD_{0.25}$ 的值与上述 3 个指标表现相反。从坡位来看，$WR_{0.25}$，MWD 和 GMW 值均表现为坡

下>坡顶>坡中>坡上，$PAD_{0.25}$ 和可蚀性 K 值则有相反的趋势。与坡上相比，坡下的 $WR_{0.25}$，MWD 和 GMD 分别提高了 20.8%，20.3%和 42.9%，$PAD_{0.25}$ 和可蚀性 K 值则降低了 24.9%和 20%。

各样地 $WR_{0.25}$，MWD 和 GMD 值均表现为坡下>坡顶>坡中>坡上(图 3)，其中 CK 和 N15 样地在坡顶位置要显著($P<0.05$)高于 N35 样地，在坡中位置要显著($P<0.05$)高于 N35-G 样地，在坡下位置要显著高于 N25-G 和 N35-G 样地。$PAD_{0.25}$ 和可蚀性 K 值与 $WR_{0.25}$，MWD 和 GMD 值呈相反趋势。



注：不同小写字母表示相同坡位下不同样地之间差异显著，而不同大写字母则表示相同样地不同坡位间差异显著($P<0.05$)，未标注大小写字母则表示样地或坡位间差异不显著($P>0.05$)。

图 3 不同样地和坡位下土壤团聚体稳定性和可蚀性指标

Fig.3 Stability and erodibility indicators of soil aggregates under different plot types and slope positions

坡上与坡顶相比,CK,N15,N25,N35 样地 MWD 值分别下降了 14.6%,12.2%,9.9%,9.5%。坡下与坡上相比,CK,N15,N25,N35 样地 MWD 值分别提高了25.9%,29.3%,21.6%和 10%。除坡顶外,间隔荒草带的 $WR_{0.25}$,MWD 和 GMD 值均小于柠条带和荒草地,$PAD_{0.25}$ 和可蚀性 K 值呈相反趋势。坡顶和坡上位置柠条带与间隔荒草带之间的团聚体稳定性指标值差异不显著,随着种植年限增加和坡位下降,间隔荒草带的团聚体稳定性指标值显著低于柠条带,$PAD_{0.25}$ 和可蚀性 K 值显著高于间隔荒草带。

2.4　土壤团聚体稳定性和可蚀性的影响因子

相关性分析结果表明,$WR_{0.25}$,MWD 和 GMD 与土壤性质和环境因子均有显著($P<0.05$)相关性(图 4)。$WR_{0.25}$,MWD 和 GMD 与有机碳、粉粒、黏粒、坡位和海拔呈显著正相关($P<0.05$),与容重、砂粒、年限和坡度呈显著负相关($P<0.05$)。$PAD_{0.25}$ 和可蚀性 K 值与容重和砂粒呈显著正相关($P<0.05$),与有机碳、粉粒、黏粒呈显著负相关($P<0.05$)。$PAD_{0.25}$ 与海拔和坡度无显著($P>0.05$)相关性。

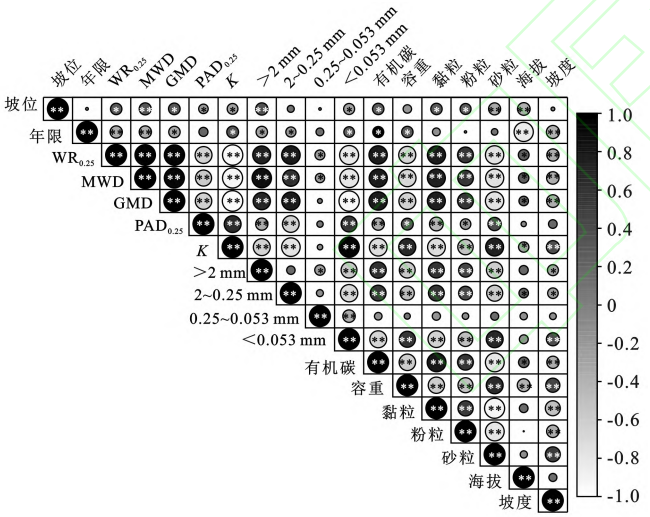


图 4　土壤团聚体稳定性和可蚀性 K 值与影响因素的相关性分析

Fig.4　Correlation analysis of soil aggregate stability, erodibility K and influencing factors

将 9 个主要环境因子与湿筛处理下土壤团聚体稳定性指标进行冗余分析(图 5)。结果显示第一、二排序轴共同解释了土壤团聚体稳定性总变异的 54.63%。有机碳、坡位是土壤团聚体稳定性的主要影响因素,其对土壤团聚体稳定性指标的解释方差分别为 38%和 4.1%。有机碳和坡位均与土壤团聚体稳定性呈显著的正相关关系,与可蚀性 K 值呈负相关关系($P<0.05$)。此外,年限与海拔是土壤团聚体稳定性和可蚀性 K 值的两个重要预测因子。年限与 MWD,GMD 呈显著负相关($P<0.05$),与可蚀性 K 值呈正相关($P<0.05$)。海拔与 MWD,GMD 呈显著的正相关,与可蚀性 K 值呈负相关($P<0.05$)。

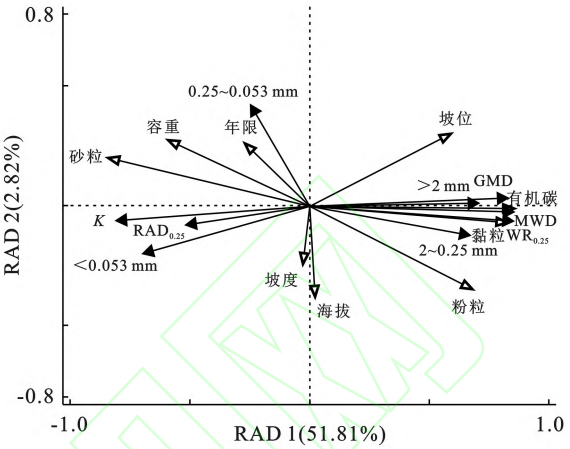


图 5　土壤团聚体稳定性与其影响因素的冗余分析

Fig.5　Redundancy analysis of soil aggregate stability and its influencing factors

3　讨论

$WR_{0.25}$,MWD 和 GMD 值越大,表明土壤团聚体稳定性越强,而可蚀性 K 值和 $PAD_{0.25}$ 越小则表明土壤抗侵蚀能力越强[17,18]。本研究中,$WR_{0.25}$,MWD 和 GMD 值表现为 N15>CK>N25>N35,而可蚀性 K 值和 $PAD_{0.25}$ 呈相反趋势。这说明坡地种植柠条 15 a,有利于增加土壤有机碳和黏粒含量,促进大团聚体的形成,降低容重和砂粒含量,从而提高了柠条土壤团聚体稳定性。张飞等[19]对黄土丘陵区柠条林的研究也发现,柠条种植对表层土壤物理性质有明显改善作用。此外,随着柠条种植年限的增加,植物叶片相对较大,可以减弱土壤表面受风和雨滴的影响[20],有助于保持和提升表层土壤结构稳定性。本研究中柠条种植年限大于 15 a 后,土壤团聚体稳定性表现出持续降低的趋势,柠条种植 25 a 和 35 a 样地甚至低于对照荒草坡地。朱志昊等[21]也有类似的研究结果,他们对不同年限柠条林地土壤团聚体稳定性研究发现,MWD 表现为荒草地>9 a 生柠条>35 a 生柠条>24 a 生柠条。长期种植柠条导致土壤团聚体稳定性下降,其原因可能与土壤水分消耗、细颗粒损失和有机质下降有关。相关研究表明[22],人工植被恢复早期,有利于土壤有机质积累和土壤水分保持,促进土壤大团聚体形成。但随着种植年限的增加,植被对水分的需求逐渐增加,这会对土壤养分的循环利用产生负面影响,导致土壤中的有机质转化减少,从而减弱了土壤团聚作用。

从坡面尺度来看,坡位的不同,可直接或间接地

影响土壤性质[23]。本研究人工柠条种植土壤的 $WR_{0.25}$，MWD 和 GMD 值均表现为坡下＞坡顶＞坡中＞坡上，可蚀性 K 值与 $PAD_{0.25}$ 呈相反趋势。可以看出，土壤团聚体稳定性在坡顶要高于坡中和坡上，低于坡下，这可能是由于坡顶植被覆盖较好，地形较为平坦，水流速度较慢，相较于坡中和坡上侵蚀力较弱，有助于大团聚体含量和有机碳含量的积累[24]。而样地的上中坡，坡度增大，水流速度加快，一般认为是侵蚀区，土壤有机质不易保持，土壤结构易受到外力作用而破坏，细颗粒易随水流而向下坡运移[25]。王子婷等[26]的研究也表明，半干旱黄土丘陵区坡面不同部位柠条生长状况和生境条件不同，其中下坡位柠条生长状况略好于中上坡位。下坡有较好的土壤团聚体稳定性和较弱的可蚀性，其原因可能是由于重力、降水、植被等多方面因素共同导致上、中坡位置的土壤水分、细颗粒、微团聚体、有机质等发生侵蚀和迁移，并在下坡位沉积和聚集[27]，有利于土壤养分积累、动物与微生物活动以及植物根系的生长[28]，这些都有利于促进土壤团聚作用，提升土壤团聚体的稳定性，降低土壤可蚀性。

本研究中，柠条种植 15 a 增加了各坡位土壤团聚体稳定性，而柠条种植 25 a 和 35 a 降低了各坡位（尤其是坡下位置）的土壤团聚体稳定性。柠条种植所形成的间隔荒草带土壤团聚体稳定性均低于柠条带，可蚀性均高于柠条带，随着坡位的下降和种植年限的增加，柠条带和间隔荒草带之间的团聚体稳定性差异增大。产生这种现象的原因可能是，间隔荒草带主要植被为多年生草本植物，根系不发达，大团聚体含量相对较少[29]，而柠条种植使地上生物量和枯落物积累增加，这些枯落物分解后增加了土壤有机质含量，促进团聚体的形成与稳定，从而提高土壤的抗侵蚀能力[30]。而柠条长期种植后，在不同坡位上形成了拦截作用，影响了土壤水分和养分在坡面上的流通与分配，导致柠条带的土壤团聚体稳定性虽然较高，但由于间隔荒草带的土壤团聚体稳定性较低，坡下位置的土壤团聚体稳定性出现了较为明显的下降。一些研究表明，坡面土壤团聚体稳定性和可蚀性是由地形、植被种植年限、密度和气候等多因子互馈作用所影响的[31-32]。本研究中，有机碳和坡位是柠条土壤团聚体稳定性和可蚀性的主要解释因子，年限和海拔次之。这表明，在坡面上种植柠条后，影响了不同坡位柠条的株高、根深和生物量等，改变了土壤有机碳在不同坡位的输入和分布[33]，进而影响了土壤团聚体稳定性和可蚀性。可见，坡面植被建设改变了原有的土壤侵蚀动态与养分循环过程，从而影响了土壤的物理和化学性质性变化。因此，在今后的人工植被建设中，要综合考虑坡面植被种植模式、年限和坡位对土壤团聚体稳定性和可蚀性的影响。

4 结 论

（1）土壤团聚体稳定性在样地间总体表现为15 a 柠条样地＞荒草地＞25 a 柠条样地＞35 a 柠条样地，在坡位间总体表现为：坡下＞坡顶＞坡中＞坡上，土壤可蚀性因子 K 值则有相反的趋势。

（2）相较于荒草地，各坡位柠条带土壤团聚体稳定性随着柠条种植年限的增加，先增加（15 a），后降低（大于 15 a），而间隔荒草带土壤团聚体稳定性持续降低。柠条带土壤团聚体稳定性均高于间隔荒草带，可蚀性均低于间隔荒草带，随着坡位的下降和种植年限的增加，两者之间的团聚体稳定性和可蚀性差异增大。

（3）土壤有机碳和坡位是影响坡面柠条土壤团聚体稳定性和可蚀性因子 K 值的主要因素，其对团聚体稳定性指标的解释方差分别为 38.0％和 4.1％，年限和海拔次之。

参考文献（References）

[1] 愚广灵，李凯辉，周建勤，等.长期围封对高寒草地土壤团聚体稳定性和可蚀性的影响[J].干旱区研究，2022，39(6)：1842-1851.
Yu Guangling, Li Kaihui, Zhou Jianqin, et al. Effects of long-term enclosure on soil aggregate stability and erodibility in Bayinbuluk alpine grassland [J]. Arid Zone Research, 2022,39(6):1842-1851.

[2] 刘亚龙，王萍，汪景宽.土壤团聚体的形成和稳定机制：研究进展与展望[J].土壤学报，2023，60(3)：627-643.
Liu Yalong, Wang Ping, Wang Jingkuan. Formation and stability mechanism of soil aggregates: Progress and prospect [J]. Acta Pedologica Sinica, 2023,60(3):627-643.

[3] 彭珏，陈家赢，王军光，等.中国典型地带性土壤团聚体稳定性与孔隙特征的定量关系[J].农业工程学报，2022，38(18)：113-121.
Peng Jue, Chen Jiaying, Wang Junguang, et al. Linking aggregate stability to the characteristics of pore structure in different soil types along a climatic gradient in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022,38(18):113-121.

[4] Erktan A, Cécillon L, Graf F, et al. Increase in soil aggregate stability along a Mediterranean successional gradient in severely eroded gully bed ecosystems: Combined effects of soil, root traits and plant community characteristics [J]. Plant and Soil, 2016,398(1):121-137.

[5] Vannoppen W, Vanmaercke M, De Baets S, et al. A

review of the mechanical effects of plant roots on concentrated flow erosion rates [J]. Earth-Science Reviews, 2015,150:666-678.

[6] Yang Lei, Chen Liding, Wei Wei. Effects of vegetation restoration on the spatial distribution of soil moisture at the hillslope scale in semi-arid regions [J]. CATENA, 2015,124:138-146.

[7] Wang Shengqiang, Li Tingxuan, Zheng Zicheng. Tea plantation age effects on soil aggregate-associated carbon and nitrogen in the hilly region of western Sichuan, China [J]. Soil and Tillage Research, 2018,180:91-98.

[8] 王心怡,周聪,冯文瀚,等.不同林龄杉木人工林土壤团聚体及其有机碳变化特征[J].水土保持学报,2019,33(5):126-131.
Wang Xinyi, Zhou Cong, Feng Wenhan, et al. Changes of soil aggregates and its organic carbon in Chinese fir plantations with different forest ages [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(5):126-131.

[9] 周萍,刘国彬,侯喜禄.黄土丘陵区侵蚀环境不同坡面及坡位土壤理化特征研究[J].水土保持学报,2008,22(1):7-12.
Zhou Ping, Liu Guobin, Hou Xilu. Study on soil physical and nutrients properties of different slope aspects and positions in eroded Loess Hilly Region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008,22(1):7-12.

[10] Fu Bojie, Wang Shuai, Liu Yu, et al. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2017,45(1):223-243.

[11] 陈美霖,韩海荣.黄土高原地区 4 种常见树种适宜区对气候变化响应[J].北京林业大学学报,2023,45(3):21-33.
Chen Meilin, Han Hairong. Response of four common tree species suitable areas to climate change in the Loess Plateau Region of Northern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023,45(3):21-33.

[12] 杜雨佳,赵勇钢,刘小芳,等.黄土丘陵区柠条种植带状结构对坡面土壤水分的影响[J].水土保持研究,2020,27(6):52-59.
Du Yujia, Zhao Yonggang, Liu Xiaofang, et al. Effects of strip caragana korshinskii plantation on soil moisture at hillslope scale in the Loess Hilly region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020,27(6):52-59.

[13] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2000.
Bao Shidan. Soil and Agricultural Chemistry Analysis [M]. 3rd ed. Beijing:China Agriculture Press, 2000.

[14] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated Soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1986,50(3):627-633.

[15] 石宗琳,王加旭,梁化学,等.渭北不同园龄苹果园土壤团聚体状况及演变趋势研究[J].土壤学报,2017,54(2):387-399.
Shi Zonglin, Wang Jiaxu, Liang Huaxue, et al. Status and evolution of soil aggregates in apple orchards different in age in Weibei [J]. Acta Pedologica Sinica, 2017,54(2):387-399.

[16] 李程程,曾全超,贾培龙,等.黄土高原土壤团聚体稳定性及抗蚀性能力经度变化特征[J].生态学报,2020,40(6):2039-2048.
Li Chengcheng, Zeng Quanchao, Jia Peilong, et al. Characteristics of soil aggregate stability and corrosion resistance longitude change in the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(6):2039-2048.

[17] 陈国靖,蔡进军,马璠,等.宁夏黄土丘陵区典型林草植被类型对土壤水稳性团聚体的影响[J].水土保持研究,2018,25(5):49-53.
Chen Guojing, Cai Jinjun, Ma Fan, et al. Effects of typical forest and grass vegetation structure on soil water-stable aggregates in hilly Loess Plateau of Ningxia Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018,25(5):49-53.

[18] Zhou Yao, Ma Hongbin, Xie Yingzhong, et al. Response of soil aggregate stability and erodibility to different treatments on typical steppe in the Loess Plateau, China [J]. Restoration Ecology, 2022,30(5):e13593.

[19] 张飞,陈云明,王耀凤,等.黄土丘陵半干旱区柠条林对土壤物理性质及有机质的影响[J].水土保持研究,2010,17(3):105-109.
Zhang Fei, Chen Yunming, Wang Yaofeng, et al. Effects of caragana korshinskii plantation on soil physical properties and organic matter in semi-arid Loess Hilly Region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010,17(3):105-109.

[20] Zuazo V H D, Pleguezuelo C R R. Soil-erosion and runoff prevention by plant covers: A review [M]// Sustainable Agriculture. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009:785-811.

[21] 朱志昊,孟晨,王兴,等.荒漠草原人工柠条引入后土壤团聚体几何分布及拓扑结构演变特征[J].草业学报,2023,32(11):53-64.
Zhu Zhihao, Meng Chen, Wang Xing, et al. Geometric distribution, formation, and topological structure of soil aggregates after introduction of Caragana korshinskii on the desert steppe [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023,32(11):53-64.

[22] 朱秋莲,程曼,安韶山,等.宁南山区植被恢复对土壤团

聚体特征及腐殖质分布的影响[J].水土保持学报，2013,27(4):247-251.

Zhu Qiulian, Cheng Man, An Shaoshan, et al. Effects of re-vegetation on characteristics of soil aggregates and humus in soil aggregate in Loess Hilly Region of southern Ningxia [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013,27(4):247-251.

[23] 雷斯越,郭晋伟,何亮,等.黄土丘陵区退耕坡面草地恢复与土壤物理性质空间分异特征[J].水土保持学报，2021,35(1):251-258.

Lei Siyue, Guo Jinwei, He Liang, et al. Spatial differentiation characteristics of grassland restoration and soil physical properties of slope in hilly-gully region of Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(1):251-258.

[24] Van Oost K, Van Muysen W, Govers G, et al. From water to tillage erosion dominated landform evolution [J]. Geomorphology, 2005,72(1/2/3/4):193-203.

[25] 张久飞,郭月峰,孙世贤,等.不同坡位对荒漠草原柠条灌木林地土壤组成分形维数的影响[J].绿色科技，2023,25(2):56-61.

Zhang Jiufei, Guo Yuefeng, Sun Shixian, et al. Mechanical composition of caragana korshinskii shrub land in desert steppe [J]. Journal of Green Science and Technology, 2023,25(2):56-61.

[26] 王子婷,杨磊,蔡国军,等.半干旱黄土区坡面尺度柠条生长状况及影响要素分析[J].生态学报,2017,37(23):7872-7881.

Wang Ziting, Yang Lei, Cai Guojun, et al. Spatial patterns of Caragana korshinskii growth on hillslope scale and influencing factors in the semi-arid Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37 (23): 7872-7881.

[27] 于洋,卫伟,陈利顶,等.黄土丘陵区坡面整地和植被耦合下的土壤水分特征[J].生态学报,2016,36(11):3441-3449.

Yu Yang, Wei Wei, Chen Liding, et al. Coupling effects of different land preparation and vegetation on soil moisture characteristics in a semi-arid Loess Hilly Region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(11):3441-3449.

[28] 李岩,王如岩,董智,等.徂徕山植被类型对不同坡位土壤团聚体特征的影响[J].水土保持通报,2022,42(6):82-87.

Li Yan, Wang Ruyan, Dong Zhi, et al. Effects of vegetation types on soil aggregate characteristics at different slope positions of culai mountain [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(6):82-87.

[29] 高冉,赵勇钢,刘小芳,等.黄土丘陵区人工柠条种植年限和坡位对土壤团聚体稳定性的影响[J].生态学报，2020,40(9):2964-2974.

Gao Ran, Zhao Yonggang, Liu Xiaofang, et al. Effects of stand age and slope position of Caragana korshinskii plantations on soil aggregate stability in the Loess Hilly region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(9): 2964-2974.

[30] Wang Baorong, Zhao Xiaodan, Liu Yang, et al. Using soil aggregate stability and erodibility to evaluate the sustainability of large-scale afforestation of Robinia pseudoacacia and Caragana korshinskii in the Loess Plateau [J]. Forest Ecology and Management, 2019, 450:117491.

[31] 程曼,朱秋莲,刘雷,等.宁南山区植被恢复对土壤团聚体水稳定及有机碳粒径分布的影响[J].生态学报，2013,33(9):2835-2844.

Cheng Man, Zhu Qiulian, Liu Lei, et al. Effects of vegetation on soil aggregate stability and organic carbon sequestration in the Ningxia Loess Hilly Region of Northwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(9):2835-2844.

[32] 刘婧,缑倩倩,王国华,等.晋西北丘陵风沙区 50 年林龄人工柠条林植被群落及其土壤特性变化[J].水土保持学报,2022,36(1):219-230.

Liu Jing, Gou Qianqian, Wang Guohua, et al. Changes of vegetation community and soil characteristics of 50 years old artificial caragana korshinskii in sandy-hilly region of northwest Shanxi Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(1):219-230.

[33] 赵艳云,程积民,王延平,等.半干旱区环境因子对柠条灌木林结构的影响[J].水土保持通报,2005,25(3):10-14.

Zhao Yanyun, Cheng Jimin, Wang Yanping, et al. Influence of environmental factors on formation of morphological structure of caragana korshiskii. in semi-arid region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2005,25(3):10-14.