

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.014.

欧阳田甜, 段旭, 赵洋毅, 等. 元江干热河谷典型林草地优先流区和基质流区土壤团聚体特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 146-153.

OUYang Tiantian, DUAN Xu, ZHAO Yangyi, et al. Characteristics of Soil Aggregates in the Preferential Flow Area and Matrix Flow Area of Typical Forest-Grassland in Yuanjiang Dry-Hot Valley[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 146-153.

元江干热河谷典型林草地优先流区和 基质流区土壤团聚体特征

欧阳田甜¹, 段旭^{1,2}, 赵洋毅^{1,2}, 卢华兴¹, 朱梦雪¹

(1.西南林业大学 林学院, 昆明 650224; 2.国家林业和草原局 云南玉溪森林生态系统国家定位观测研究站, 昆明 650224)

摘要: [目的]明晰干热河谷区土壤优先流对红壤团聚体特征及其稳定性的影响,为该区植被恢复和水土流失防治提供理论依据。[方法]以元江干热河谷典型地段龙潭箐流域内的银合欢林地、扭黄茅荒草地为研究对象,基于染色示踪试验区分样地土壤优先流区和基质流区,利用干湿筛法结合分形理论分析两区内0—50 cm土层团聚体特征差异,并借助通径分析法表征各土壤理化因子对团聚体稳定性的影响。[结果]干湿筛后 $R_{0.25}$ 团聚体含量从大到小顺序为林地优先流区>林地基质流区>荒草地优先流区>荒草地基质流区,平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)与 $R_{0.25}$ 排序相同且呈现出随土层深度增加而减小的趋势,分形维数(D)与团聚体破坏率(PAD)则为相反规律并随土层加深 D 和PAD的值逐渐增大。对两区土壤团聚体稳定性影响较大的理化因子是土壤容重和黏粒含量,其决策系数分别为0.474和-0.644。[结论]荒草地土壤团聚体破坏率更高,土壤优先流区团聚体稳定性优于基质流区;土壤团聚体稳定性主要受黏粒含量、容重、有机质等因子影响。

关键词: 干热河谷; 土壤团聚体; 优先流区; 基质流区

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)03-0146-08

Characteristics of Soil Aggregates in the Preferential Flow Area and Matrix Flow Area of Typical Forest-Grassland in Yuanjiang Dry-Hot Valley

OUYang Tiantian¹, DUAN Xu^{1,2}, ZHAO Yangyi^{1,2}, LU Huaxing¹, ZHU Mengxue¹

(1.College of Forestry, Southwest Forestry University 650224, China; 2.Yuxi Forestry Ecosystem Research Station, National Forestry and Grassland Administration, Kunming 650224, China)

Abstract: [Objective] The influence of soil priority flow on the characteristics and stability of red soil aggregates in the dry and hot valley area was clarified to provide a theoretical basis for vegetation restoration and soil erosion prevention and control in this area. [Methods] Based on the dyeing tracing experiment, the soil preferential flow area and the matrix flow area were distinguished, and the characteristics of the aggregates of 0—50 cm soil layer in the two areas were analyzed by dry and wet sieving method combined with fractal theory, and the effects of the physical and chemical factors of each soil on the stability of the aggregates were characterized by the path analysis method. [Results] After dry and wet sieves, the $R_{0.25}$ aggregate contents decreased in the order: woodland priority flow area>woodland matrix flow area>barren grassland priority flow area>barren grassland matrix flow area, the change trends of average weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) were the same as those of $R_{0.25}$, and showed a decreasing tendency with the

收稿日期: 2022-03-22

修回日期: 2022-04-18

资助项目: 国家自然科学基金项目(42067005); 云南省基础研究计划面上项目(202001AT070136); 云南省万人计划青年拔尖人才专项(YN-WR-QNBJ-2019-226, YNWR-QNBJ-2019-215); 云南省自然生态监测网络项目(2022-YN-13); 国家林草局林业科技创新平台运行项目“云南玉溪森林生态系统国家定位观测研究站”(2020132078); 云南玉溪森林生态系统国家长期科研基地(2020132550)

第一作者: 欧阳田甜(1996—), 女, 云南昆明人, 在读硕士研究生, 主要从事森林土壤学研究。E-mail: 2294724146@qq.com

通信作者: 段旭(1983—), 女, 山西沁源人, 副教授, 博士, 主要从事森林培育和生态水文研究。E-mail: feixue20012360@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

increase of soil depth, and the fractal dimension (D) and the agglomeration failure rate (PAD) were the opposite patterns and gradually increased with the depth of the soil layer. The physicochemical factors impacting the stability of soil aggregates in the two regions were soil bulk density and clay content, and their decision coefficients were 0.474 and -0.644 , respectively. [Conclusion] The soil aggregate failure rate is higher in barren grassland, and the stability of the aggregate in the soil priority flow area is better than that in the matrix flow area. The stability of soil aggregates is mainly affected by factors such as clay content, bulk density, and organic matter.

Keywords: dry-hot valley; soil aggregates; preferential flow area; matrix flow area

干热河谷区因气候干热、干湿交替显著和土壤干化且构型复杂造成区域内植被稀疏、水土流失严重,是我国典型的生态脆弱区^[1-3]。优先流是土壤中常见且重要的水流运动和溶质运移形式,其在土壤水分运移和侵蚀的发生发展过程中起到重要作用^[4-6]。已有研究表明气候条件、土壤结构均是土壤水分运动和优先流及优先路径形成的重要影响因素^[7-8]。因此,摸清具有特殊自然地理环境条件的干热河谷区内优先流影响下土壤结构差异,是解决该区生态修复及重建的关键所在。

导致优先流发生的众多因素中,土壤结构最为本质,直接影响了优先流区和基质流区的分布。土壤团聚体作为土壤结构的基本单位,与水分运输和土壤肥力息息相关^[7],土壤结构与优先流的关系研究是生态水文过程的重要组成部分,定量研究土壤优先流对土壤因子的影响有利于改善水资源短缺和生态脆弱等问题。针对土壤团聚体的组成、大小、稳定性等问题多年来受到国内外学者的广泛关注^[9-11],研究表明,气候条件^[12]、土壤性质^[9]、土地利用方式等^[10-11]均对土壤团聚体的形成与稳定性有直接或间接影响。已有学者对不同海拔^[12]、不同地类等^[13]土壤团聚体开展研究,如:Kalhor等^[14]在黄土高原选取了6种地类进行对比试验,分析了土壤团聚体与土壤有机质的关系;王冰等^[15]通过探究不同时期针叶林土壤大团聚体和有机碳含量,指出不同林龄下土壤有机质变化规律并表明分形维数能一定程度上表征土壤结构变化情况。随着研究的深入,少量学者也开始针对优先流与土壤特性关系展开探讨,王赵男等^[16]就两区土壤孔隙度、持水特征和入渗特性进行比较,指出土壤特性差异直接影响了优先流的发育;武亚楠等^[17]研究发现了优先流区土壤养分含量显著高于基质流区,两区各土壤理化性质差异与土层深度变化存在规律等。在以往的探究中,针对土壤团聚体研究大多集中于不同土地利用方式或不同类型土壤,但干热河谷这一特殊气候尤其是优先流区与基质流区团聚体差异还鲜有报道。同时,对于土壤特性与优先流关系的研

究以比较两区土壤孔隙度、含水率和养分含量的差异颇多,土壤团聚体作为土壤结构的基本单位,对优先流的发生有着重要影响,但有关土壤团聚体在优先流区与基质流区分布特征却少有提及。

干热河谷地区缺水严重,生态脆弱,土地利用困难,其土壤及其构型等也与以往研究区差异较大^[1-2]。近年来,针对本区域围绕土壤优先流形成特征及其影响因子^[18]、根系与土壤大孔隙关系等^[19]方面已开展了初步研究,而关于土壤结构与优先流的关系研究还未开展。因此,本文选取元江干热河谷区典型林草地为研究对象,基于染色示踪试验和干湿筛法并结合分形分析理论,探明优先流区与基质流区的土壤团聚体结构及其稳定性特征差异,以揭示区域土壤团聚体对优先流形成的影响,以期为本地区及其他类似区域的生态修复工作提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地位于云南省玉溪市新平彝族傣族自治县平甸乡元江一级支流峨德河的龙潭箐流域($101^{\circ}50'-101^{\circ}51'E, 24^{\circ}01'-24^{\circ}03'N$)。属典型南亚热带季风河谷干热气候,干湿两季分明,冬春干旱多风,夏秋酷热多雨。年平均气温 $23.5^{\circ}C$, 最高气温 $45.0^{\circ}C$, 无霜期 248 d。研究区以红壤为主,易侵蚀,成土母岩以砂岩为主。流域内为常绿阔叶林,主要乔木有银合欢(*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit)、云南松(*Pinus yunnanensis* Franch.)、华山松(*Pinus armandii* Franch.)等,灌木以余甘子(*Phyllanthus emblica* Linn.)、悬钩子(*Rubus idaeus* Linn.)为主,草本植物以扭黄茅(*Heteropogon contortus* (Linn.) P.Beauv. ex Roem. et Schult.)、龙须草(*Eulaliopsis binate* (Retz.) C.E. Hubb.)等为优势种。

1.2 样地布设

在全面踏查林区和充分考虑本地区土壤类型和地形的基础上,采用典型选样法选择2种典型地类,即银合欢林地、扭黄茅荒草地为研究对象(表1),选

取坡位、坡度等立地因子较相似的地块,在2种植被类型下分别设置4块10 m×10 m或10 m×15 m的固定样地,每块样方内分别设置1 m×1 m的区域进行染色示踪试验,共计8块。

1.3 染色示踪试验和土样采集

染色示踪区域布设于地势平坦处,试验前先清理样地表面的枯枝落叶和较大块砾石,后将一个70 cm×70 cm×50 cm的铁框置入土深50 cm,并夯实铁框边缘处土壤,以防止染色溶液沿铁框内壁下渗对观测结果造成误差。本研究以当地多年降雨资料为依据,使用模拟降雨器将配制好浓度为4 g/L的亮蓝溶液19 L均匀喷洒在矩形框内,后用塑料薄膜覆盖,四周密封,避免静置过程中降雨、人为干扰等外因对染

色结果的影响。待24 h后,除去塑料薄膜和铁框。根据Bundt等^[20]的试验,可判定剖面被染色的区域是优先流区,未染色区域是基质流区。

供试土壤于2020年6月取自研究地。以10 cm每层挖开土壤垂直剖面,每个样点自上而下按0—10,10—20,20—30,30—40,40—50 cm土层深度采集原状土样,各土层染色区域和未染色区域分别选3个取样点,2种地类各120个土样,共计240个。将采集好的土样装入方形铝盒中,密封保存带回实验室,去除植物残根和杂质后置于室内通风处自然风干,用于测定土壤机械稳定性和水稳定性团聚体,同时用100 cm³环刀以相同方法采集原状土以测定土壤理化性质。

表1 样地基本情况

样地类型	地理坐标	坡度/(°)	坡向	坡位	海拔/m	植被类型	优势种	覆盖度/%	土壤容重/(g·cm ⁻³)	土壤质地/%			石砾体积含量/%
										砂粒	粉粒	黏粒	
林地	101°84'22.07"E, 24°01'21.51"N	8	东南	坡中部	1204	银合欢	银合欢、云南松、华山松,等	85	1.07	4.45	61.68	53.81	20.56
荒草地	101°84'22.71"E, 24°02'23.60"N	7	东南	坡上部	1215	扭黄茅	扭黄茅、龙须草、紫荆泽兰,等	95	1.28	8.32	61.87	49.76	6.31

1.4 测定方法

土壤团聚体分为机械稳定性团聚体和水稳定性团聚体,本研究采用沙维诺夫干筛法与湿筛法^[13]相结合以测定土壤团聚体,径级分为>2 mm,2~1 mm,1~0.5 mm,0.5~0.25 mm,<0.25 mm 5个径级;土壤理化性质测定参照土壤分析^[21],采用激光粒度仪测定机械组成(黏粒、粉粒、砂粒),重铬酸钾外原加热、硫酸亚铁滴定法测定土壤有机质,火焰光度法测定速效钾,扩散吸收法测定速效氮,分光光度计法测定速效磷,环刀法测定土壤容重。

1.5 指标计算与分析

团聚体各指标计算公式如下:

(1) 平均重量直径^[22](MWD)表示为:

$$MWD = \sum_{i=1}^n (\bar{X}_i \times W_i)$$

(2) 几何平均直径^[22](GMD)表示为:

$$GMD = \exp\left(\sum_{i=1}^n W_i \ln \bar{X}_i\right)$$

式中: W_i 表示为某一径级团聚体的重量百分比; \bar{X}_i 为某一径级团聚体的平均直径。

(3) 以>0.25 mm的团聚体为大团聚体,用 $R_{>0.25}$ ^[22]表示。计算公式为:

$$R_{>0.25} = \frac{M_{>0.25}}{M_T}$$

式中: $M_{>0.25}$ 表示土壤>0.25 mm径级所有土粒重量之和; M_T 表示土壤总重量。

(4) 土壤团聚体破坏率^[22](PAD)计算公式为:

$$PAD = \frac{DR_{>0.25} - WR_{>0.25}}{DR_{>0.25}} \times 100\%$$

式中 $DR_{>0.25}$ 为>0.25 mm机械稳定性团聚体含量; $WR_{>0.25}$ 为>0.25 mm水稳性团聚体含量。

(5) 土壤分形维数 D ^[23]计算公式为:

$$D = 3 - \frac{\lg(W_i/W_o)}{\lg(\bar{d}_i/\bar{d}_{\max})}$$

式中: \bar{d}_{\max} 为最大径级土粒的平均直径; \bar{d}_i 是两筛分粒间径级的平均值; W_i 是直径小于 d_i 土粒重量之和; W_o 是全部径级土粒重量之和。

通径分析各指标计算如下^[24]:

(1) X_i 通过 X_j 对 Y 的间接通径系数(P_{ij})计算公式为:

$$P_{ij} = r_{ij} \times P_{jy}$$

(2) 决策系数($R_{(i)}^2$)计算公式为:

$$R_{(i)}^2 = P_{iy}^2 + 2P_{iy} \sum P_{ij}$$

式中: r_{ij} 为 X_i 与 X_j 相关系数; P_{jy} 为 X_j 对 Y 的直接通径系数; P_{iy} 为 X_i 与 Y 的直接通径系数; P_{ij} 为 X_i 与 Y 相关系数。

利用Microsoft Excel 2019软件完成试验数据预处理。运用SPSS 22.0软件进行数据间多重比较、Pearson相关性分析和通径分析等。采用Origin 2021软件制图,图表中数据为平均值±标准差。

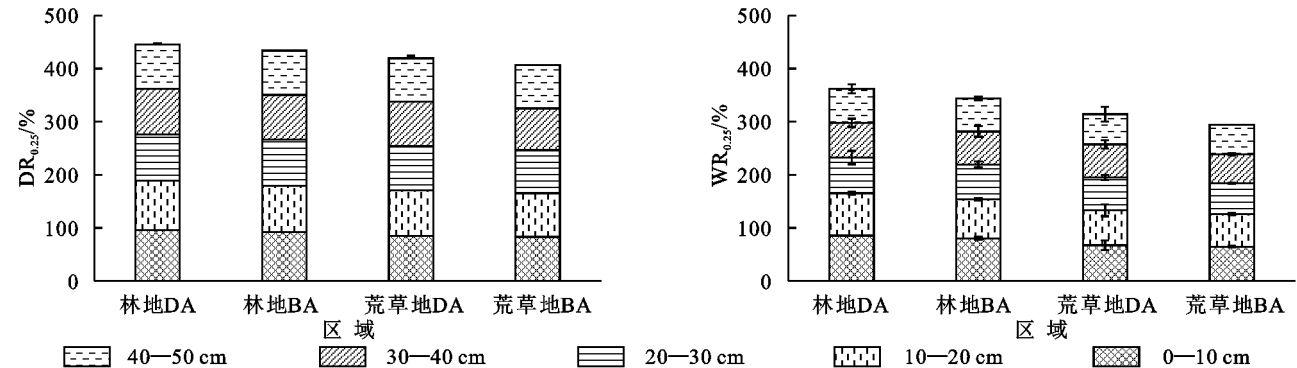
2 结果与分析

2.1 优先流区与基质流区土壤团聚体组成

2.1.1 土壤团聚体数量 由图1可知,各区域的机械稳定性大团聚体含量($DR_{0.25}$)总和顺序为:林地优先流区>林地基质流区>荒草地优先流区>荒草地基质流

区,分别计算 4 个区域 $DR_{0.25}$ 均值可得:林地(87.95%)高于荒草地(82.65%),同一土层不同区域内,林地优先流区 $DR_{0.25}$ 均值高于基质流区 2.30%,荒草地高于 0.60%。各区域的水稳定性团聚体含量($WR_{0.25}$),可以看出湿筛法得到的大团聚体含量低于干筛法得到的值,说明研究区内土壤团聚体大部分为机械稳定性团聚体。

$WR_{0.25}$ 均值以林地优先流区(72.40%)最高,林地基质流区次之(68.80%),荒草地基质流区(58.90%)最低。在 0—50 cm 土层内林地优先流区高于基质流区 3.60%,荒草地高于 3.90%。分析表明:林地与荒草地大团聚体含量差异显著,林地土壤优先流区显著高于基质流区,荒草地两区无显著性差异。



注:DA 为染色区域;BA 为未染色区域,下同。

图 1 林草地两区土壤机械稳定性、水稳定性团聚体含量

2.1.2 土壤团聚体大小 MWD 和 GMD 可描述土壤团聚体的大小,其值越大,表明土壤抗侵蚀能力越强^[25]。干湿筛下两区土壤团聚体大小分别见表 2,表 3。由表可知干筛法下各区域的 MWD 和 GMD 的值介于 1.84~2.90 mm,林地 MWD 较荒草地平均增加 12.70%,GMD 平均增加 9.23%,各土层优先流区 MWD 平均高于基质流区 6.73%,GMD 平均高于 3.22%。湿筛法下林地

MWD 平均增加 29.01%,GMD 平均增加 13.50%,优先流区 MWD,GMD 的值分别高于基质流区 11.77%,4.57%。从土层深度来看,林地表层 MWD 和 GMD 显著大于中下土层,荒草地土层间无显著性差异。0—50 cm 土层土壤机械稳定性团聚体与水稳定性团聚体 MWD 和 GMD 均呈现随土层深度的增加而减小的趋势,表明随土层加深,团聚体稳定性逐渐降低。

表 2 林草地两区机械稳定性土壤团聚体 MWD 和 GMD

指标	地类	区域	土层深度/cm				
			0—10	10—20	20—30	30—40	40—50
MWD	林地	DA	2.90±0.24A	2.72±0.02AB	2.41±0.18BC	2.29±0.13C	2.25±0.10C
		BA	2.54±0.24A	2.51±0.24A	2.18±0.10A	2.25±0.21A	2.28±0.38A
	荒草地	DA	2.24±0.61A	2.00±0.29A	2.21±0.71A	2.11±0.49A	2.22±0.47A
		BA	2.15±0.49A	2.23±0.19A	2.22±0.15A	1.84±0.01A	2.38±0.06A
GMD	林地	DA	1.48±0.11A	1.39±0.04AB	1.25±0.06BC	1.22±0.06BC	1.20±0.04C
		BA	1.32±0.06A	1.29±0.09A	1.20±0.04A	1.20±0.08A	1.20±0.14A
	荒草地	DA	1.20±0.23A	1.14±0.11A	1.19±0.23A	1.16±0.15A	1.18±0.16A
		BA	1.17±0.16A	1.18±0.08A	1.17±0.06A	1.06±0.01A	1.22±0.03A

表 3 林草地两区水稳定性土壤团聚体 MWD 和 GMD

指标	地类	区域	土层深度/cm				
			0—10	10—20	20—30	30—40	40—50
MWD	林地	DA	2.08±0.23A	1.93±0.21AB	1.35±0.16BC	1.32±0.38BC	1.23±0.26C
		BA	2.08±0.36A	1.60±0.25AB	1.45±0.18B	1.37±0.03B	1.27±0.23B
	荒草地	DA	1.46±0.07A	1.41±0.06A	1.19±0.35A	1.27±0.04A	1.40±0.08A
		BA	1.11±0.80A	1.19±0.33A	1.09±0.29A	0.95±0.09A	1.19±0.12A
GMD	林地	DA	1.14±0.04A	1.10±0.08A	0.90±0.10B	0.89±0.07B	0.86±0.03B
		BA	1.14±0.13A	0.97±0.07B	0.93±0.05B	0.89±0.01B	0.87±0.06B
	荒草地	DA	0.92±0.01A	0.91±0.08A	0.85±0.03A	0.87±0.01A	0.87±0.11A
		BA	0.85±0.02A	0.84±0.04A	0.81±0.06A	0.78±0.01A	0.83±0.03A

注:不同大写字母表示同一区域不同土层间差异显著($p<0.05$)。

2.2 土壤团聚体稳定性

2.2.1 土壤团聚体分形维数 利用公式(5)对土壤团聚体干湿筛法数据进行拟合计算,得出分形维数 D 。图2显示,干筛法处理后,0—50 cm 土层内团聚体分形维数均值介于 1.86~2.50,随土层深度的增加,部分土层出现波动但总体呈现随土层加深而增大的趋势,各区域均值以林地优先流区分形维数最小(2.22),其次为林地基质流区(2.32),荒草地基质流

区最高(2.47)。湿筛法得到的 D 值高于干筛法,土层变化规律与干筛法保持一致。2 种地类土壤团聚体 D 值优先流区均低于基质流区,干筛后分别低 4.18%,3.08%;湿筛后降低幅度分别为 5.28%,1.74%,说明土壤优先流区土壤结构形状相对松散、透气性更好,具有良好的结构和稳定性,而基质流区土壤 MWD 和 GMD 相对较低, D 值较高,故稳定性和土壤结构相对较弱。

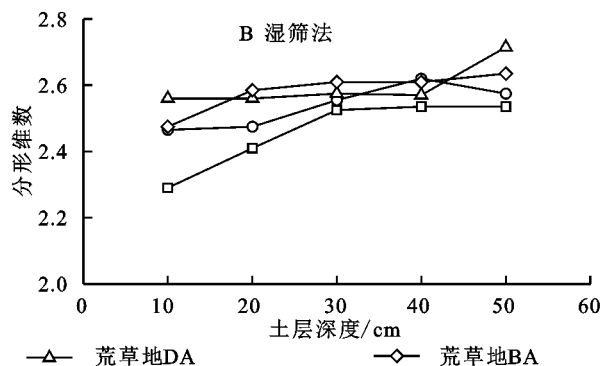
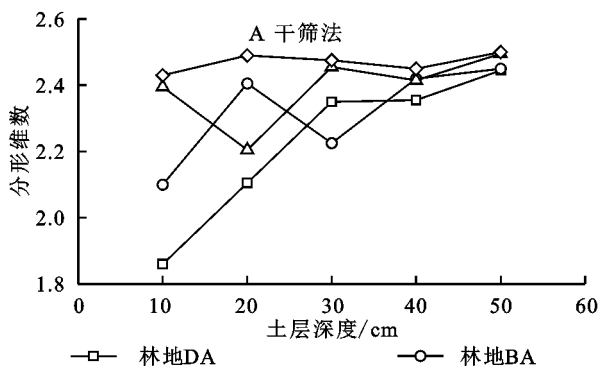


图2 林草地两区土壤团聚体分形维数

2.2.2 土壤团聚体破坏率 土壤团聚体破坏率(PAD)可量化土壤结构的稳定性,能对土壤团聚体进行更全面的评价。研究表明:PAD 值越小,说明团聚体结构越稳定^[26]。各区域 PAD 在 0—50 cm 土层变化情况见图3。由图可知林草地两区土壤(PAD)在 30—50 cm 土层有所波动,但总体呈现随土层深度增加的趋势。荒草地 PAD 显著高于林地,平均值为 3.1%。土壤优先流区与基质流区林地差异显著,荒草地两区无显著性差异,土壤 PDA 均值以荒草地基质流区最大(17.7%),林地基质流区次之(15.3%),林地优先流区最小(13.9%)。

2.3 土壤团聚体稳定性影响因子通径分析

应用通径分析法明确典型林草地土壤团聚体破坏率(PAD)与其影响因子的关系,以有机质(X_1)、黏粒(X_2)、粉粒(X_3)、砂粒(X_4)、速效钾(X_5)、速效氮(X_6)、速效磷(X_7)、容重(X_8)作为影响 PAD(Y)的影

响因子,利用通径分析理论得出团聚体破坏率与其影响因子的相关性、通径系数与决策系数,以明确土壤理化性质对土壤团聚体稳定性的综合作用,表4为各土壤因子与团聚体破坏率相关性分析,表5为团聚体破坏率影响因子的通径分析,表中,用 r_{ij} , P_{iy} , P_{ij} , $\sum P_{ij}$, $R^2_{(i)}$ 分别表示相关系数、直接通径系数、间接通径系数、间接通径系数之和决策系数。

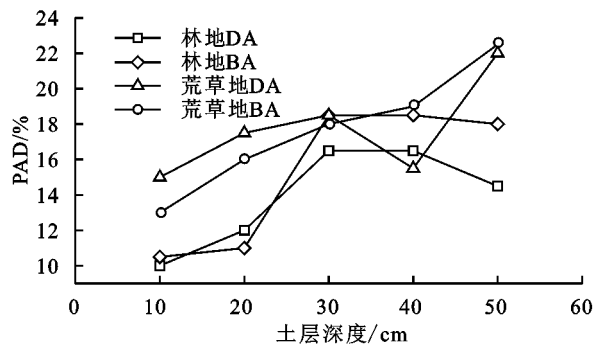


图3 林草地两区土壤团聚体破坏率

表4 各指标间相关性分析

变量	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	Y
X_1	1	-0.125	0.056	0.046	0.100	0.210	-0.030	-0.611**	-0.366
X_2		1	-0.476*	-0.753**	-0.421	0.501*	0.054	-0.207	-0.560*
X_3			1	-0.207	-0.058	-0.135	0.078	0.209	0.505*
X_4				1	0.506*	-0.457*	-0.098	0.096	0.276
X_5					1	-0.367	-0.255	-0.042	0.226
X_6						1	0.396	-0.405	-0.384
X_7							1	-0.069	0.080
X_8								1	0.698**
Y									1

注:**表示在 0.01 水平(双尾)上显著相关;*表示在 0.05 水平(双尾)上显著相关。

表 5 破坏率影响因子的通径分析

因子	r_{ij}	P_{iy}	P_{ij}									$R^2_{(i)}$
			ΣP_{ij}	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	
X_1	-0.366	-0.060	-0.306		-0.052	0.041	0.029	0.022	0.013	-0.004	-0.355	0.040
X_2	-0.560	0.419	-0.978	0.007		-0.346	-0.467	-0.091	0.032	0.007	-0.120	-0.644
X_3	0.505	0.726	-0.221	-0.003	-0.199		-0.128	-0.013	-0.009	0.010	0.121	0.207
X_4	0.276	0.621	-0.345	-0.003	-0.315	-0.150		0.110	-0.029	-0.013	0.056	-0.043
X_5	0.226	0.217	0.009	-0.006	-0.176	-0.042	0.314		-0.023	-0.033	-0.024	0.051
X_6	-0.384	0.064	-0.448	-0.013	0.210	-0.098	-0.284	-0.080		0.052	-0.235	-0.053
X_7	0.080	0.130	-0.050	0.002	0.023	0.057	-0.061	-0.055	0.025		-0.040	0.004
X_8	0.698	0.581	0.117	0.037	-0.087	0.152	0.059	-0.009	-0.026	-0.009		0.474

由各变量间多元回归分析可得,各因子(X_1-X_8)与团聚体破坏率(Y)的线性回归方程为: $Y=-0.726-0.421X_1+0.321X_2+0.848X_3+0.547X_4+0.044X_5+0.028X_6+0.031X_7+0.093X_8$, $F=4.514$, $p<0.05$ 达到显著水平,说明各土壤因子对团聚体破坏率的线性影响显著,通径分析有意义。各因子与 PAD 相关性排序依次为 $X_8,X_2,X_3,X_6,X_1,X_4,X_5,X_7$;其中,土壤有机质、黏粒含量和速效氮与 PDA 呈负相关,决策系数可确定各影响因子对土壤团聚体破坏率贡献度大小, $R^2_{(i)}$ 排列依次为 $X_2,X_8,X_3,X_6,X_5,X_4,X_1,X_7$;总体来看,土壤容重和黏粒含量对团聚体破坏率影响最为显著,土壤容重越小,黏粒含量越高,则土壤质地越疏松,透水性更好,制约土壤团聚体破坏率增大。经计算剩余因子为 0.234,表明回归方程中对团聚体破坏率影响较大的部分指标未被考虑,需进一步深入研究。

2.4 土壤团聚体稳定性影响因子主成分分析

运用主成分分析方法,可以在损失少量信息的前提下筛选出若干个综合指标来反映原来全部指标的大部分信息,进而更客观地表明各因子与因变量的相关性。为进一步探讨植被类型、侵蚀区类型和土层深度对团聚体稳定性的影响,对于干湿筛下的大团聚体含量($R_{0.25}$)、平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、分形维数(D)和土壤团聚体破坏率(PAD)9个团聚体指标与植被类型、侵蚀区类型、土层深度分别进行主成分分析(表 6),根据特征值大于 1 的原则,分别提取了 1 个主成分。3 个驱动因子的累计贡献率分别为 90.198%,89.969%,91.308%,损失信息较低,说明提取到的主成分能较好地表达原有变量的大部分信息,因此对元江干热河谷区植被类型、侵蚀区类型、土层深度与其土壤团聚体稳定性指标进行主成分分析。

图 4 表明:植被类型、侵蚀区类型、土层深度与土壤各结构指标的联系,各指标与 3 个驱动因子所形成

的夹角余弦值代表两者之间的相关性,夹角越小,表明其相关性越高,反之则越低。由图 4 可以看出,植被类型和侵蚀区类型与 DMWD,DGMD,WMWD, $DR_{0.25}$,WGMD 均位于第一象限且所形成的夹角较小,说明大团聚体含量与团聚体直径与植被、侵蚀区类型的相关性较强,植被类型和侵蚀区的差异对土壤团聚体直径变化最为敏感。团聚体破坏率(PAD)、分形维数(WD,DD)位于第二象限与团聚体直径和 $R_{0.25}$ 方向相反且所形成夹角接近 180° ,表明这两组指标间此消彼长,为负相关。土层深度特征向量位于第四象限与团聚体直径和 $R_{0.25}$ 夹角稍大对土壤结构影响次之。综上所述,主成分分析进一步证明了 3 个驱动因子均能在一定程度上影响土壤团聚体稳定性,与前文的研究结果一致。

表 6 各主成分特征及贡献率

驱动因子	主成分	特征值	贡献率/%
植被类型	F_1	8.118	90.198
侵蚀区类型	F_2	8.097	89.969
土层深度	F_3	8.218	91.308

注: F_1,F_2,F_3 分别表示 3 个驱动因子的主成分。

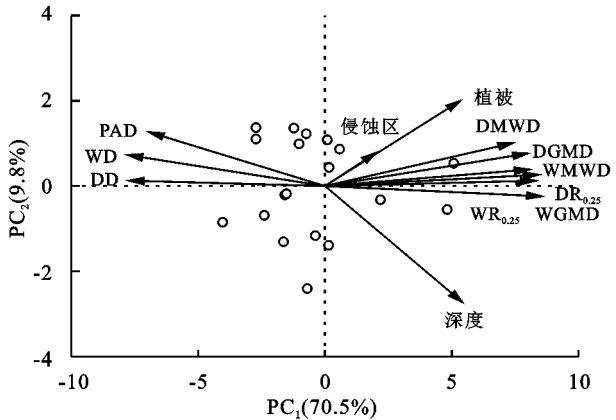


图 4 各结构指标与 3 个驱动因素的主成分分析

3 讨论

土壤团聚体作为土壤结构的基本单元,是土壤养

分的存储库^[25]。干筛法和湿筛法都被广泛应用于土壤团聚体评估,通过这种方法可以充分反映团聚体稳定性和土壤肥力状况^[13],一般用 $R_{0.25}$, MWD, GMD, D , PAD 等指标来表征土壤团聚体稳定性。研究发现:林草地团聚体大小随土层加深而减小,分形维数和破坏率则相反,说明上层土壤团聚体稳定性高于中下土层,此结论与很多研究是相同的^[27]。因为土壤表层有大量凋落物覆盖,凋落物是土壤有机质的重要来源,枯枝落叶保护了土壤结构的完整性,同时分解归还的养分主要集中于表层土壤,使表层土壤土粒间胶结能力增强,促进了大团聚体的形成,所以上层的稳定性高于中下层,然而随着土层加深,土壤养分逐渐降低而导致了团聚体稳定性减弱。因此,林草地团聚体稳定性均呈现随土层加深而降低的规律。

龙潭箐流域土壤团聚体稳定性与植被类型关系密切。综合各指标发现研究区内林地土壤团聚体稳定性显著高于荒草地,其主要机制是林地枝叶繁茂,较高的郁闭度通过林冠截流降低雨水对土壤的直接冲刷,减少了对大团聚体的冲击和破坏。林地植被根系发达,植物根系通过缠绕和联结土壤颗粒并释放出分泌物能促进土壤大团聚体的形成与稳定。反之,荒草地表面土壤比较贫瘠,根系相对不发达,胶连作用不明显,受人为因素干扰使土壤颗粒保护作用降低,加剧了土壤结构的破坏程度。相比之下林地土壤团聚体能得到更大程度的保存,稳定性也更好。这与李娟等^[22]研究结果一致。

优先流的发生受众多因素的影响,它的存在改变了土壤内部水分运动从而影响土壤结构,反之,土壤结构也同样影响优先流区与基质流区的分布^[27-28]。本研究发现,土壤优先流区 $R_{0.25}$ 均值为 72.40%,基质流区仅为 68.80%,不同植被类型 MWD, GMD 的最大值均出现在优先流区, D , PAD 的最大值则在基质流区出现,林草地优先流区土壤团聚体破坏率均值分别低于基质流区 0.84%, 2.52%, 以上结果可能是由于土壤通过各种外力或植物根系挤压、默结,凝聚而形成团聚体,优先流区植物根系相对丰富,根系活性相对较强,根系在生长过程中分解的有机质、多糖等物质是土壤胶连作用的主要来源^[29]。另外,土壤水下渗过程中会随之携带大量腐殖质等有机质在优先流区域扩散,可能会在优先流路径的管壁滞留,从而促进了团聚体的形成,使土壤团粒大小分布更均匀,因此土壤优先流区团聚体破坏率更低,土壤结构稳定性更强。优先流区和基质流区土壤团聚体差异也证明了优先流是影响本流域土壤结构差异的重要因素。

通径分析可以准确地展示各影响因子对因变量直

接或间接的响应程度。本研究在进行相关性分析的基础上结合通径分析方法,全面研究了土壤各理化性质对团聚体稳定性的影响。结果表明,多个土壤因子比较后,黏粒的决策系数最大,影响为负效应,土壤容重次之为正效应。出现以上结果的原因是:有研究证实,土壤中黏粒含量高会增加土壤物理和化学保护,有利于有机质的积累^[30]。有机质在土壤团聚体的形成中起到重要作用,能促进形成稳定的大团聚体。黏粒含量的高低也直接影响了土壤中微生物的数量和活性,微生物在土壤团聚体的形成和稳定中发挥着重要作用。此外,土壤容重越小,表明孔隙度越大,则土壤结构越疏松,加快土壤水分向下运移为植物根系生长创造良好条件从而提高了土壤颗粒连结和凝聚。两者共同作用下,土壤团聚体破坏率得以降低。本研究还利用主成分分析法探究了植被类型、优先流影响和土层深度与土壤团聚体稳定性的关系,结果显示 3 个驱动因子均是影响林草地土壤团聚体的关键因素。

4 结论

(1) 综合土壤团聚体 $R_{0.25}$, MWD, GMD, D , PAD 等指标发现,林地与荒草地土壤团聚体稳定性存在显著差异,林地团聚体水平、土壤稳定性显著高于荒草地;优先流区土壤团聚体破坏率较基质流区更低,土壤结构更为稳定。

(2) 土壤团聚体稳定性指标与土层深度变化有关:MWD, GMD 随土层加深呈减小趋势,而 D , PAD 则相反,证明表层土壤较中下层土壤更为松散,透气性更强。土层深度增加,团聚体稳定性逐渐降低。

(3) 通过选取有机质、容重等土壤理化因子,对土壤团聚体稳定性进行通径分析发现,黏粒含量对团聚体破坏率影响最大,其次是土壤容重,表明土壤疏松能加快水分下渗并促进根系生长以增大胶连作用,最终提高团聚体稳定性。

(4) 植被类型、侵蚀区类型和土层深度均是影响团聚体稳定性的关键因素。土壤团聚体抗侵蚀力降低、土壤退化会对生态系统造成严重威胁,因此,合理利用资源、防止水土流失应是该区生态保护的重点。

参考文献:

- [1] Ran H, Deng Q, Zhang B, et al. Morphology and influencing factors of rills in the steep slope in Yuanmou Dry-Hot Valley (SW China)[J]. Catena, 2018, 165: 54-62.
- [2] 范建容, 杨超, 包维楷, 等. 西南地区干旱河谷分布范围及分区统计分析[J]. 山地学报, 2020, 38(2): 303-313.
- [3] Dong Y, Xiong D, Li J, et al. The distribution of and

- factors influencing the vegetation in a gully in the Dry-hot Valley of southwest China[J]. *Catena*, 2014, 116: 60-67.
- [4] Yan J, Chen X, Cheng F, et al. Effect of soil fracture priority flow on soil ammonium nitrogen transfer and soil structure in mining area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(2):120-126.
- [5] Jarvis N J. A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling factors and consequences for water quality[J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, 58(3):523-546.
- [6] 张中彬,彭新华.土壤裂隙及其优先流研究进展[J].*土壤学报*, 2015, 52(3):477-488.
- [7] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between(micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 79(1):7-31.
- [8] Grant K N, Macrae M L, Ali G A. Differences in preferential flow with antecedent moisture conditions and soil texture: Implications for subsurface P transport[J]. *Hydrological Processes*, 2019, 33(15):2068-2079.
- [9] Zhang Q, Shao M, Jia X, et al. Understory vegetation and drought effects on soil aggregate stability and aggregate-associated carbon on the Loess Plateau in China[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2018, 82(1): 106-114.
- [10] Spaccini R, Piccolo A. Effects of field managements for soil organic matter stabilization on water-stable aggregate distribution and aggregate stability in three agricultural soils[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, 129:45-51.
- [11] Nath A J, Rattan L A L. Effects of tillage practices and land use management on soil aggregates and soil organic carbon in the north Appalachian region, USA [J]. *Pedosphere*, 2017, 27(1):172-176.
- [12] 苟天雄,刘韩,帅伟,等.川西高寒山地不同海拔高度土壤团聚体特征[J].*水土保持研究*, 2020, 138(1):53-59.
- [13] 姜敏,刘毅,刘闯,等.丹江口库区不同土地利用方式土壤团聚体稳定性及分形特征[J].*水土保持学报*, 2016, 30(6):265-270.
- [14] Kalhor S, Xu X, Chen W, et al. Effects of different land-use systems on soil aggregates: A case study of the Loess Plateau(Northern China)[J]. *Sustainability*, 2017, 9(8):1-16.
- [15] 王冰,张鹏杰,张秋良.寒温带兴安落叶松林土壤团聚体特征及其影响因素研究[J].*生态环境学报*, 2021, 30(1):44-52.
- [16] 王赵男,辛颖,赵雨森.黑龙江省水源地优先流区与基质流区土壤特性分析[J].*水土保持学报*, 2017, 31(1): 49-54.
- [17] 武亚楠,张英虎,张振明,等.黄河三角洲湿地植物根区优先流区和基质流区土壤特性分布差异[J].*北京师范大学学报:自然科学版*, 2021, 57(1):69-75.
- [18] 万艳萍,赵洋毅,段旭,等.干湿交替对于旱河谷区土壤优先流形成特征的影响[J].*应用生态学报*, 2021, 32(7):2397-2406.
- [19] 陈婷婷,段旭,赵洋毅,等.红河干旱河谷区典型地类植物根系特征对土壤大孔隙的影响[J].*水土保持研究*, 2020, 143(6):113-121.
- [20] Bundt M, Jaggi M, Blaser P, et al. Carbon and nitrogen dynamics in preferential flow paths and matrix of a forest soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(5):1529-1538.
- [21] 聂立水,王登之.土壤分析[M].北京:中国林业出版社, 2019.
- [22] 李娟,韩霁昌,陈超,等.黄土高原丘陵沟壑区土地利用方式对土壤团聚体特征的影响[J].*水土保持学报*, 2017, 31(1):251-256, 262.
- [23] 杨培岭,罗远培.用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J].*科学通报*, 1993, 38(20):1896-1899.
- [24] 胡磊,余东立,杨震.晋西北黄土丘陵区小流域土壤团聚体稳定性及其分形特征[J].*水土保持研究*, 2022, 29(1):72-77.
- [25] 林立文,邓羽松,王金悦,等.亚热带人工林种植对赤红壤团聚体分布及稳定性的影响[J].*应用生态学报*, 2020, 31(11):53-62.
- [26] 唐贤,黄伟濠,卢瑛,等.广东省赤红壤区土壤团聚体有机碳和铁氧化物特征及稳定性[J].*水土保持学报*, 2021, 35(2):200-209.
- [27] 杜晓晴,牛健植,侯琨,等.华北土石山区优先流区与基质流区土壤特性分析[J].*中国水土保持科学*, 2015, 13(3):51-57.
- [28] 孙龙,张洪江,程金花,等.重庆江津区柑橘地土壤大孔隙特征[J].*水土保持学报*, 2012, 26(3):194-198.
- [29] Hong Y, Zhao D, Zhang F, et al. Soil water-stable aggregates and microbial community under long-term tillage in black soil of Northern China[J]. *Ecotoxicology*, 2021, 30(8):1754-1768.
- [30] 赵明松,张甘霖,王德彩,等.徐淮黄泛平原土壤有机质空间变异特征及主控因素分析[J].*土壤学报*, 2013, 50(1):1-11.