

刘福君,胡玉洁,郭忠录,等.丹江口库区典型小流域不同土地利用方式对土壤团聚体稳定性的影响[J].华中农业大学学报,2025,44(4):113-121.DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.04.011

丹江口库区典型小流域不同土地利用方式 对土壤团聚体稳定性的影响

刘福君,胡玉洁,郭忠录,曾建辉,李东耀,肖智远

华中农业大学资源与环境学院,武汉 430070

摘要 为探讨不同土地利用方式和不同破碎机制对土壤团聚体稳定性差异的影响,以丹江口库区五龙池流域为例,通过野外调查、实地采样和室内分析,探讨不同土地利用方式(林地、灌木林、坡耕地和梯田)对土壤理化性质和团聚体稳定性的影响。结果显示:土壤有机质(SOM)、全氮(TN)、黏粒(clay)、粉粒(silt)和孔隙度(porosity)在不同土地利用方式上具有显著差异,坡耕地土壤有机质和全氮含量均高于梯田土壤;林地有机质含量最高,全氮含量最低,灌木林与之相反;坡耕地和梯田土壤黏粒与粉粒含量大于林地和灌木林土壤;有机质、容重和孔隙度在不同土壤深度上有显著差异,坡耕地和梯田土壤孔隙度小于灌木林土壤。随着土壤深度的增加,土壤有机质含量和孔隙度降低,容重增加。土壤团聚体平均质量直径(MWD)和土壤结构稳定性指数(SSI)受土地利用方式的显著影响。SSI表现为林地>灌木林>坡耕地>梯田,SSI值均大于7%,土壤结构退化风险较低。所有样品的快速湿润(MWD_{fw})、预湿润振荡(MWD_{ws})和慢速湿润(MWD_{sw})分别为0.28~2.20、0.83~2.44、0.41~2.30 mm。林地土壤团聚体稳定性最高,梯田土壤团聚体稳定性最差。4种土地利用方式团聚体的平均质量直径从大到小均为MWD_{ws}、MWD_{sw}、MWD_{fw},表明研究区土壤团聚体的破坏主要是由消散作用导致的。路径分析结果显示,有机质对团聚体稳定性呈显著正向影响,且路径系数最大。而全氮与团聚体稳定性呈显著负向影响作用。结果表明,土地利用主要通过影响有机质、全氮、黏粒、孔隙度和粉粒间接影响土壤团聚体稳定性。

关键词 土地利用方式; Le Bissonnais法; 团聚体稳定性; 路径分析

中图分类号 S152;S153.6 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)04-0113-09

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,是评价土壤质量和土体安全的重要指标^[1],同时,土壤团聚体的稳定性也是衡量土壤可蚀性的重要指标^[2]。土壤团聚体稳定性受诸多方面的影响。程谅等^[3]研究表明,土壤有机质可通过胶结其他矿物颗粒形成微团聚体来增加土壤团聚体稳定性。土壤有机质和水分等土壤理化性质能直接影响团聚体的形成和稳定,而土地利用方式和植被类型等土地管理措施则是间接影响团聚体稳定性^[4-5]。土地利用是人为干预和自然作用相结合的过程,不同土地利用方式使得土壤的结构、肥力状况和粒径组成等发生变化,并在土壤团聚体形成和土壤粒径组成结构2个方面间接影响土壤团聚体稳定性^[6]。安娟等^[7]测定了北方土石山区不同土地利用方式下褐土的团聚体水稳性,研究了土地利用方式对土壤团聚体的影响,发现不同

土地利用方式间2~5 mm团聚体差异最大。Li等^[8]研究表明土地利用方式对团聚体稳定性有显著影响,其中森林的团聚体稳定性最好。然而,大多数的研究更专注于个别因子的影响^[9-10]。因此深入了解土壤性质和土地利用方式对土壤团聚体稳定性的影响,对于了解丹江口库区土壤质量和抗蚀性,治理和控制水土流失至关重要。

相较于常用的测定土壤团聚体水稳性的湿筛法,Le Bissonnais法采用快速湿润、慢速湿润和预湿润后振荡3种处理,分别代表了不同的团聚体分散机制^[11],可以准确且全面地从团聚体崩解机制方面对土壤团聚体稳定性进行评价,揭示土壤团聚体破碎的主要机制。Lin等^[12]采用Le Bissonnais法研究了人工林土壤团聚体的稳定性及其影响机制。

收稿日期:2024-07-14

基金项目:国家自然科学基金项目(42077066;41671273)

刘福君,E-mail:fliu2023@163.com

通信作者:郭忠录,E-mail:zlguo@hau.edu.cn

丹江口水库是我国南水北调中线工程的水源地。该地区为典型的浅山丘陵地貌,在长期的农耕和自然环境的共同作用下,水土流失和土地退化较为严重^[13]。本研究使用Le Bissonnais法对丹江口库区五龙池小流域4种土地利用方式下的土壤团聚体进行测定,探讨不同土地利用方式和不同破碎机制的土壤团聚体稳定性差异,考察几种环境因子对土壤团聚体稳定性的影响,旨在为丹江口库区水土保持工作提供参考,保障南水北调水源区生态和水质安全。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于湖北省丹江口市习家店镇五龙池小流域(111°13′09″~111°13′31″E, 32°40′33″~32°46′13″N),流域面积为1.92 km²。五龙池小流域是青塘河流域位于汉江北岸的二级子流域,是丹江口库区小流域综合治理的典型示范小流域。流域属于典型的北亚热带半湿润季风气候特征,多年平均气温均值为16.1℃,年气温最高值达到41.5℃,最低气温低至-12.4℃,全年无霜期为250 d。年均降雨量为797.6 mm,年内降雨分配不均且主要集中在4—10月份,多年最大降雨量为1360.6 mm,多年最小降雨量为503.5 mm,汛期内的降雨,雨强大、径流汇集时间短。流域内地势呈现出北高南低的分布,存在较为发育的褶皱断裂带,岩体以石灰岩、红砂岩和泥沙岩为主,土壤类型主要以黄棕壤和紫色土为主。水土流失形式主要为水力侵蚀,五龙池小流域属“丹治”一期工程水土流失综合治理小流域,截至2008年,流域水土保持综合治理基本完成。

1.2 土样采集

本研究采样时间为2020年8月初,考虑了不同土地利用方式和现场调查因素,共选取92个采样点,涉及林地、坡耕地、梯田、灌木林4种土地利用方式。采用五点混合采样法,其中,林地处于小流域上游,共选取28块样地,梯田共选择28块样地,坡耕地选取18个样地。由于灌木林在流域内较为分散,因此随机选取了18个样点进行采样。在每个采样点坡面分别取0~10 cm和10~20 cm两层土样并用密封袋保存,用于测定土壤理化性质,分层采取1 kg原状土样用于团聚体测定,使用100 cm³环刀取样,用于测定孔隙度和容重。

1.3 实验室分析

土壤理化性质指标主要包括粉粒(silt)、黏粒(clay)、砂粒(sand)、有机质(SOM)、pH、全氮(TN)、容重(BD)、孔隙度(porosity)。其中,容重和孔隙度采用环刀法测量;土壤质地采用吸管法测定;土壤pH采用电位法(土、水质量比为1:2.5);有机质采用重铬酸钾外加热法测定;全氮采用湿烧法+流动注射分析法测定^[14]。

1.4 土壤团聚体稳定性的测定与计算

使用Le Bissonnais法测定土壤团聚体稳定性^[11],将过筛得到的3~5 mm团聚体在40℃下烘干24 h,然后分别进行:①快速湿润(fast wetting, FW):模拟暴雨或灌溉对团聚体的破坏;②预湿润振荡(wet stirring, WS):模拟机械外力(雨滴打击、径流冲刷)作用对土壤团聚体的破坏作用;③慢速湿润(slow wetting, SW):模拟土壤借助毛管引力慢速吸水过程对团聚体的破坏。然后利用3种处理下的团聚体平均质量直径(mean weight diameter, MWD;公式中用 M_{WD} 表示)表征团聚体的稳定性。

$$M_{WD} = \sum_{i=1}^n \frac{r_{i-1} + r_i}{2} m_i \quad (1)$$

式(1)中: r_i 表示第*i*个筛子的孔径,mm,; m_i 表示第*i*个筛子上的破碎团聚体的百分含量; n 表示筛子的数量。 MWD_{fw} 、 MWD_{ws} 、 MWD_{sw} 分别代表3种处理(快速湿润、预湿润振荡、慢速湿润)下的水稳性团聚体的平均质量直径。

土壤结构稳定指数(soil structure stability index, SSI)通常用来评价土壤有机质含量是否能有效地保持土壤结构稳定,是反映土壤结构弹性的指标^[15]。SSI(公式中用 S_{si} 表示)的计算方法如下:

$$S_{si} = \frac{C_{SOM}}{C_{CLAY} + C_{SILT}} \times 100\% \quad (2)$$

式(2)中, C_{SOM} 、 C_{CLAY} 、 C_{SILT} 分别表示土壤有机质、黏粒、粉粒的含量。当 $SSI < 5\%$ 时,表明土壤有机碳损失严重,导致土壤结构退化;当 $5\% < SSI < 7\%$ 时,土壤结构退化风险较高;当 $SSI > 7\%$ 时,表明土壤结构退化的风险较低^[16]。

1.5 数据统计与分析

利用Excel进行数据整理,利用IBM SPSS Statistics 25对所有数据进行描述性统计分析、逐步回归分析以及方差分析,使用Origin 2024分析各指标间的相关性,土壤理化性质图和团聚体稳定性图的制作、冗余分析图的制作,使用R Studio中Lavaan包进行路径分析,使用Microsoft Office PowerPoint制作

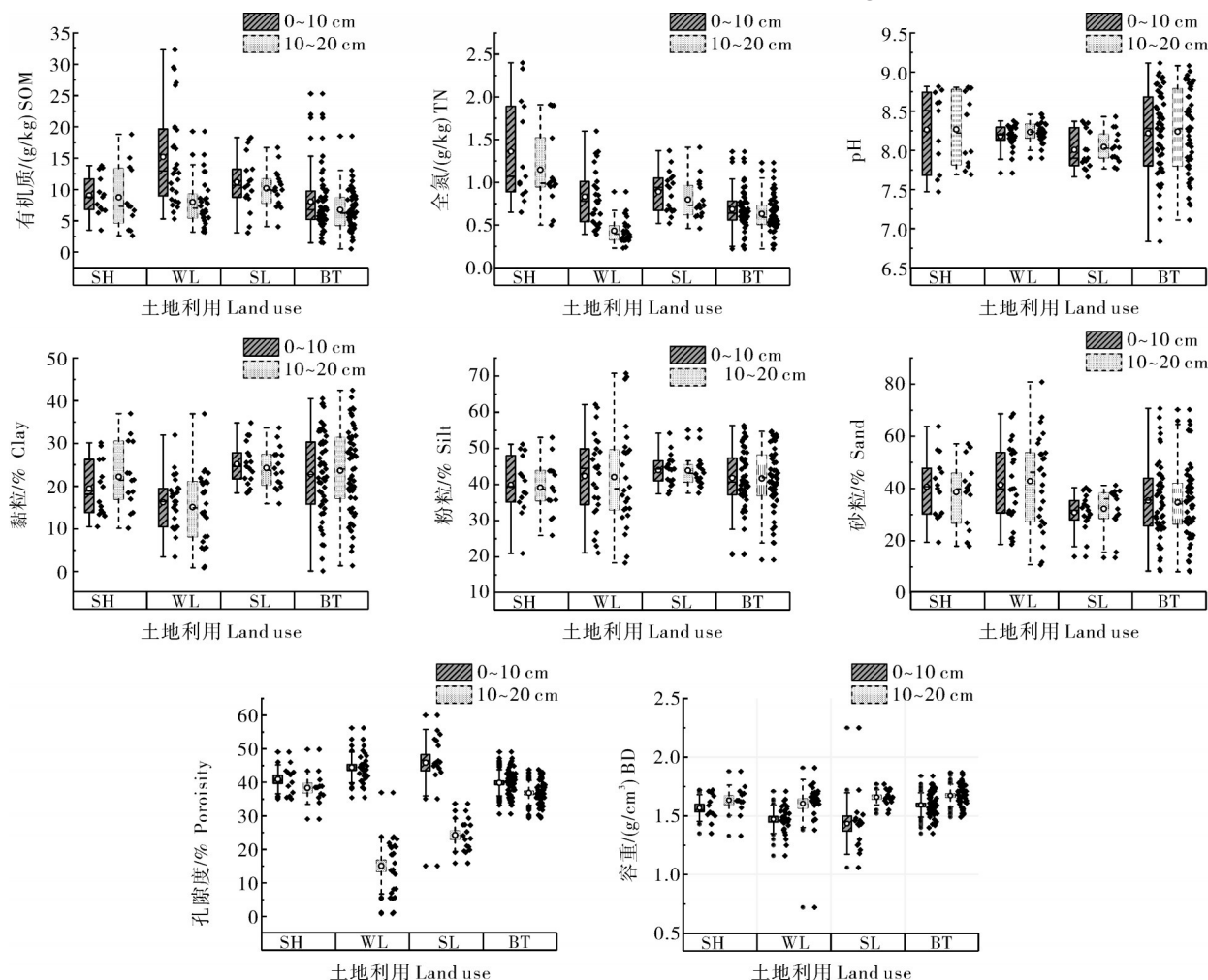
路径分析结果图。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式下土壤理化性质特征

不同土地利用方式下的土壤理化性质如图1所示。在本研究中,土地利用方式对土壤有机质、全氮、黏粒、粉粒和孔隙度具有显著影响($P<0.05$)。有机质、容重和孔隙度在不同土壤深度上有显著差异($P<0.05$)。pH和土壤砂粒含量在不同土地利用方式和土壤深度上均不显著。在不同土地利用方式上,林地土壤有机质含量最高,平均值为11.41 g/kg,灌木林和坡耕地土壤有机质含量接近,坡耕地土壤有机质含量是梯田的1.32倍,0~10 cm土壤有机质

含量普遍高于10~20 cm土壤。灌木林的土壤全氮含量最高,为1.03 g/kg,与有机质相同,坡耕地土壤全氮含量也高于梯田土壤,林地土壤全氮含量最低,为0.62 g/kg。坡耕地和梯田土壤黏粒含量相近,分别为26.29%和26.13%;林地和灌木林土壤黏粒含量相近,分别为16.55%和16.46%,坡耕地和梯田土壤黏粒显著大于林地和灌木林土壤。与土壤黏粒含量相似,土壤粉粒含量也表现出坡耕地和梯田土壤大于林地和灌木林土壤。坡耕地和梯田土壤孔隙度小于灌木林土壤,在相同的土地利用下,0~10 cm土壤孔隙度均要大于10~20 cm土壤。与土壤孔隙度相反,0~10 cm土层的土壤容重(1.54 g/cm³)均小于10~20 cm土层(1.65 g/cm³)。



SH:灌木林 Shrubbery; WL:林地 Woodland; SL:坡耕地 Slope land; BT:梯田 Bench terrace; 下图同 The same as Fig.2.

图1 不同土地利用方式下不同土层土壤理化性质

Fig.1 Physicochemical properties of different soil layers under different land use

2.2 不同土地利用方式下土壤团聚体稳定性差异

团聚体稳定性和SSI受土地利用方式的影响明显($P<0.05$),如图2所示。在团聚体稳定性方面,所

有样品的MWD_{fw}、MWD_{ws}和MWD_{sw}分别为0.28~2.20、0.83~2.44、0.41~2.30 mm。在快速湿润条件下,团聚体的平均质量直径在土地利用方式和土壤

深度的影响均显著(表1)。林地的 MWD_{fw} 最大,平均值为1.60 mm,坡耕地土壤的 MWD_{fw} 大于梯田土壤。在预湿润振荡条件下,土壤团聚体平均质量直径(MWD_{ws}),在不同土地利用方式上,表现为林地>坡耕地>灌木林>梯田。在慢速湿润处理下, MWD_{sw} 的结果显示:林地>坡耕地>梯田>灌木林。与土壤团聚体稳定性相似,林地的土壤结构稳定性指数(SSI)最大,0~10 cm和10~20 cm平均值分别

为31.33%和16.72%,其次是灌木林、坡耕地、梯田。相同土地利用方式下,0~10 cm土层SSI均高于10~20 cm。各土地利用方式下的SSI均大于7%,土壤结构退化风险较低。综合 MWD_{fw} 、 MWD_{ws} 和 MWD_{sw} 的结果来看,林地的土壤团聚体稳定性最好,梯田土壤团聚体稳定性最差。Le Bissonnais法的3种处理方式中,不同土地利用方式团聚体的平均质量直径从大到小依次为预湿润振荡、慢速湿润、快速湿润。

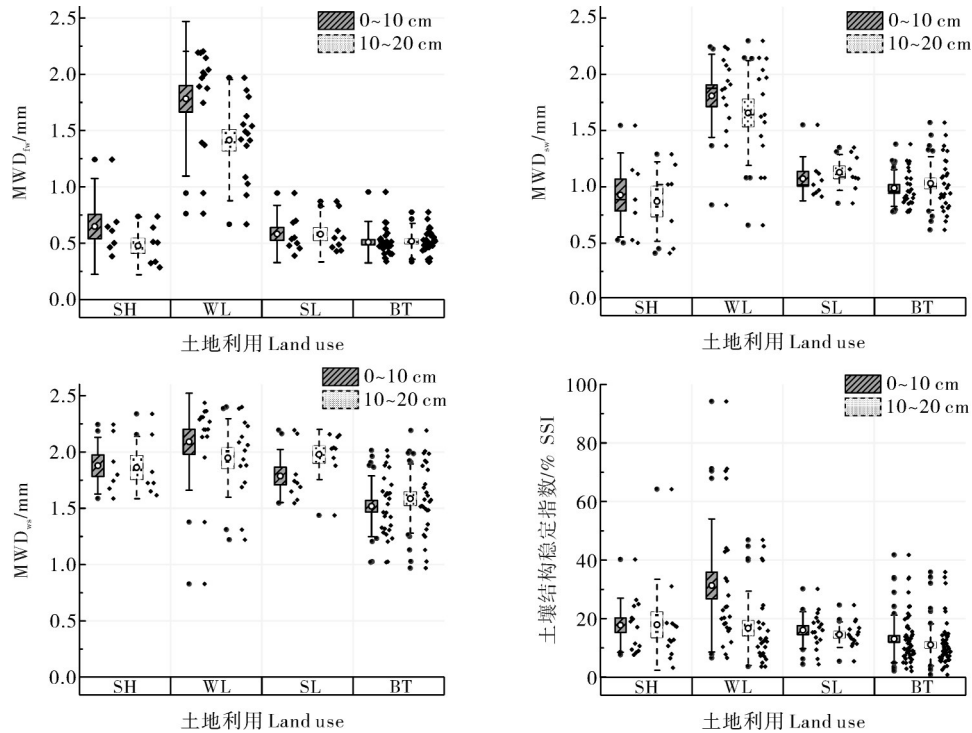


图2 土壤团聚体平均质量直径及土壤结构稳定性指数

Fig.2 Mean weight diameter of soil aggregates and soil structure stability index

2.3 表征土壤团聚体稳定性的关键因子分析

对不同土地利用方式和土壤深度团聚体稳定性进行方差分析(表1),结果显示,土地利用方式对 MWD_{ws} 、 MWD_{fw} 、 MWD_{sw} 和SSI均有极显著影响($P<0.01$),土壤深度对 MWD_{fw} 的影响显著($P<0.05$)。另外,土壤深度与土地利用方式的交互作用对 MWD_{fw} 的影响显著($P<0.05$)。

土壤理化性质和团聚体稳定性的RDA结果如图3所示。RDA1占累积解释率的91.19%。前2个轴(RDA1和RDA2)可以解释总变异的97.11%。因此,RDA1和RDA2能够反映土壤性质对土壤可蚀性和团聚体稳定性的大部分影响,其中有机质、全氮、砂粒、粉粒、黏粒和孔隙度的向量值较高。容重、黏粒、pH和孔隙度对 MWD_{ws} 、 MWD_{sw} 和 MWD_{fw} 呈负向影响。有机质和砂粒对 MWD_{ws} 、 MWD_{sw} 和

MWD_{fw} 呈正向影响。全氮对 MWD_{fw} 和 MWD_{sw} 、 MWD_{ws} 呈负向影响。粉粒对 MWD_{fw} 和 MWD_{sw} 有正向影响,对 MWD_{ws} 呈负向影响。

经过逐步回归分析,最终确定有机质、粉粒、全氮、孔隙度是影响 MWD_{sw} 的主要影响因素。路径分析结果如图4所示。有机质、黏粒和全氮显著影响 MWD_{fw} ,有机质、黏粒和孔隙度是影响 MWD_{ws} 的主要因子。有机质对 MWD_{sw} 、 MWD_{fw} 和 MWD_{ws} 均呈正向影响,且路径系数均要高于其他因子。孔隙度对 MWD_{ws} 和 MWD_{sw} 呈负向影响作用(直接路径系数分别为-0.25和-0.30)。黏粒对 MWD_{fw} 和 MWD_{ws} 均呈现出负向影响作用。粉粒与 MWD_{sw} 正向影响作用(直接路径系数为0.24)。全氮对 MWD_{sw} 和 MWD_{fw} 均表现出负向影响作用(直接路径系数分别为-0.31和-0.41)。

表1 不同土地利用方式和土壤深度团聚体稳定性的方差分析

Table 1 Analysis of variance for aggregate stability of different land use and soil depths

变异来源 Source of variation	因变量 Dependent variable	自由度 Degree of freedom	F	P
土地利用方式 Land use	MWD _{ws}	3	17.069	<0.001
	MWD _{fw}	3	141.711	<0.001
	MWD _{sw}	3	47.334	<0.001
	SSI	3	9.670	<0.001
土壤深度 Soil depth	MWD _{ws}	1	0.143	0.706
	MWD _{fw}	1	6.623	0.011
	MWD _{sw}	1	0.200	0.656
	SSI	1	0.083	0.774
土地利用方式×土壤深度 Land use×soil depth	MWD _{ws}	3	1.299	0.279
	MWD _{fw}	3	4.220	0.007
	MWD _{sw}	3	0.849	0.470
	SSI	3	1.877	0.134

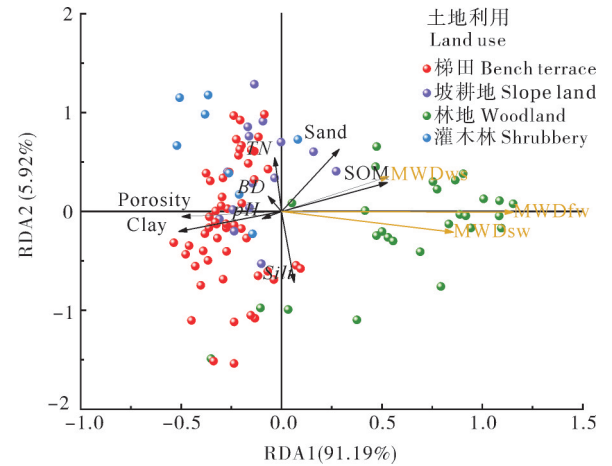


图3 影响团聚体平均质量直径的土壤理化性质冗余分析(RDA)

Fig.3 Redundancy analysis of soil physicochemical properties affecting the mean weight dameter of soil aggregates

3 讨论

3.1 不同土地利用方式下土壤理化性质的差异

研究结果表明,土壤有机质、全氮、黏粒、粉粒和孔隙度在不同土地利用方式上均呈现出显著差异($P<0.05$)。0~10 cm 土壤的有机质含量显著高于10~20 cm 土壤,可能是受到施肥和秸秆还田的影响^[16],坡耕地土壤有机质和全氮含量高于梯田,可能与梯田的修建年限较短有关^[17]。灌木林全氮含量要显著高于林地,可能是“退耕还林”项目植被恢复措

施和种植物种类引起的^[18]。相较于10~20 cm 土层,表层0~10 cm 土壤容重较低,孔隙度较高,这一结果与现有研究结果一致^[19],这与土壤有机质含量有关,表层土壤有机质含量较高,土壤植物残体和根系较多,质地疏松。坡耕地和梯田的土壤孔隙度低于灌木林土壤,这是因为灌木林中植被根系较为发达,土壤相对疏松,且农田和坡耕地土壤经过人为扰动导致土壤压实。坡耕地和梯田土壤的黏粒和粉粒含量高于林地和灌木林土壤,主要是由于坡耕地和梯田受人为扰动较多,包括耕作、施肥等,大颗粒不断被细化,导致其黏粒和粉粒含量相对较高^[20]。

3.2 不同土地利用方式下土壤团聚体结构稳定性差异

本研究中土壤团聚体平均质量直径在不同土地利用方式上有极显著差异($P<0.01$),与赵云鹤等^[21]的研究结果一致。土地利用方式不同会影响土壤团聚体的稳定性^[22],无论是团聚体的MWD,还是土壤SSI,林地均要高于其他土地利用方式,可能是林地具有较高的有机质含量,在土壤团聚体形成中具有重要作用^[23],且林地植被根系更加发达,植物根系通过缠绕和联结土壤颗粒并释放分泌物,促进土壤大团聚体的形成^[24],进而提高团聚体稳定性和土壤结构稳定性。本研究中,梯田土壤在快速湿润、预湿润振荡和慢速湿润下的团聚体平均质量直径均要低于坡耕地,这与梯田修建时间以及施工有一定的联系。研究表明,坡改梯过程中的翻耕扰动以及施工措施不规范等问题,使得梯田修筑后的初期阶段,梯田土壤养分与坡耕地没有显著变化,甚至低于坡耕地土壤^[17,25]。

Le Bissonnais法的3种处理方式中,不同土地利用方式团聚体的平均质量直径从大到小依次为预湿润振荡、慢速湿润、快速湿润,与张孝存等^[26]、卢升高等^[27]研究结果一致。快速湿润处理下的团聚体稳定性最差,土壤团聚体结构破坏较为严重。由于快速湿润处理时模拟暴雨或者灌溉下团聚体的崩解作用,将土壤快速置于水中,从而导致团聚体中的闭塞空气爆破的消散作用^[28],表明在本研究区域内,土壤团聚体的破坏主要是由暴雨或灌溉引起的消散作用所导致。

3.3 表征土壤团聚体稳定性的因子分析

有机质对MWD_{sw}、MWD_{fw}和MWD_{ws}均呈正向影响,且路径系数均要高于其他因子。土壤有机质是土壤团聚体形成过程中重要的粘结物质^[29],有机质的胶结作用通过增加土壤斥水性和粘聚力提高团

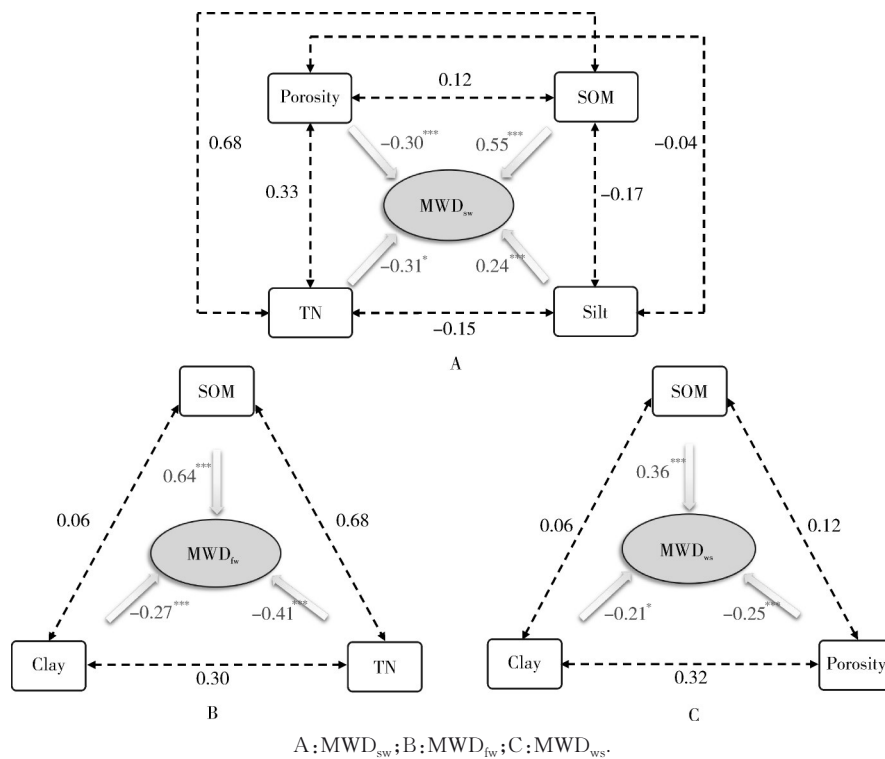


图4 3种处理下水稳性土壤团聚体平均质量直径的路径分析

Fig.4 Path analysis of the average weight diameter of water-stabilized soil aggregates under three treatments

聚体稳定性^[26]。土壤团聚体的稳定性取决于孔隙结构发育特征^[30], 本研究中土壤孔隙度对MWD_{ws}和MWD_{sw}呈负向影响, 同样, 梁春林等^[31]研究表明, 土壤孔隙度与MWD_{fw}、MWD_{sw}和MWD_{ws}均呈负相关关系, 其主要原因是不同类型土壤在不同的外界环境下孔隙的结构不同^[30]。粉粒与MWD_{sw}呈现正向影响, 研究表明, 粉粒和黏粒通常与土壤中的胶结物质或植物的根系、菌丝缠绕形成较大的团聚体^[32]。土壤黏粒含量与MWD_{fw}和MWD_{ws}均呈现出负向影响。这可以用王彬^[33]的研究结果来解释, 证明了黏粒对土壤团聚体稳定性具有双重效应, 一方面作为胶结物质增强团聚体稳定性, 另一方面增强黏粒膨胀作用以降低团聚体稳定性。另外, Lado等^[34]的研究结果也解释了这一点, 在FW处理中, 毛细孔隙内“闭蓄”空气的含量随黏粒含量的增加而增加, 消散作用随之增强, 导致团聚体稳定性下降。对于土壤全氮, 其对MWD_{sw}和MWD_{fw}均表现出负向影响, 另外, 冗余分析结果显示其与全氮及MWD_{ws}呈现正向影响。可能是不同处理下微团聚体的含量不同导致的。FW、SW、WS处理的微团聚体含量平均值分别为32.57%、21.34%、9.08%。有研究表明, 微团聚体对土壤全氮储量变化的贡献为负值^[35]。

本研究在丹江口库区五龙池典型小流域, 选取

林地、灌木林、坡耕地和梯田4种土地利用方式下的土壤, 研究不同土地利用方式下的土壤理化性质和土壤团聚体稳定性差异, 结果表明: 土壤有机质、全氮、黏粒、粉粒和孔隙度在不同土地利用方式上具有显著差异($P < 0.05$)。有机质、容重和孔隙度在不同土壤深度上有显著差异($P < 0.05$)。相同土地利用方式下, 随着土壤深度增加, 土壤有机质含量和孔隙度降低, 容重增加。相同土层深度下, 土地利用方式和土壤理化性质规律不明显。土壤团聚体稳定性和SSI受土地利用方式的显著影响($P < 0.05$)。林地土壤SSI最大, 其次是灌木林、坡耕地和梯田, 各土地利用方式下的土壤SSI均大于7%, 土壤结构退化风险较低。Le Bissonnais法的3种处理方式中, 4种土地利用方式团聚体的平均质量直径从大到小均为预湿润振荡、慢速湿润、快速湿润, 土壤团聚体多因消散作用而破碎。土壤有机质和粉粒含量与团聚体稳定性呈正向影响, 有机质路径系数最大。土壤全氮含量与团聚体稳定性呈负向影响。土地利用通过对有机质、全氮、黏粒、孔隙度和粉粒间接影响土壤团聚体稳定性。

参考文献 References

[1] 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):248-253.LI J, HAN J C, CHEN C, et al. Effects of land use types on soil aggregate characteristics in hilly-gully region of Loess Plateau[J]. Journal of soil and water conservation, 2017, 31(1):248-253(in Chinese with English abstract).
- [2] 郭曼,郑粉莉,安韶山,等.应用Le Bissonnais法研究黄土丘陵区土壤团聚体稳定性[J].中国水土保持科学,2010,8(2):68-73. GUO M, ZHENG F L, AN S S, et al. Application of Le Bissonnais method to study soil aggregate stability in the Hilly-gully region[J]. Science of soil and water conservation, 2010, 8(2):68-73(in Chinese with English abstract).
- [3] 程谅,秦嘉惠,张利超,等.应用Le Bissonnais法研究不同植被类型下红壤团聚体稳定性[J].土壤学报,2020,57(4):855-866. CHENG L, QIN J H, ZHANG L C, et al. Application of Le Bissonnais method to study soil aggregate stability in red soils under different types of vegetation[J]. Acta pedologica sinica, 2020, 57(4):855-866(in Chinese with English abstract).
- [4] 李娅芸,刘雷,安韶山,等.应用Le Bissonnais法研究黄土丘陵区不同植被区及坡向对土壤团聚体稳定性和可蚀性的影响[J].自然资源学报,2016,31(2):287-298. LI Y Y, LIU L, AN S S, et al. Research on the effect of vegetation and slope aspect on the stability and erodibility of soil aggregate in Loess Hilly Region based on Le Bissonnais method[J]. Journal of natural resources, 2016, 31(2):287-298(in Chinese with English abstract).
- [5] 李天齐,周明涛,许文年,等.基于Le Bissonnais法的植被混凝土团聚体稳定性研究[J].水利科学与寒区工程,2018,1(12):32-36. LI T Q, ZHOU M T, XU W N, et al. Application of Le Bissonnais method to study the stability of vegetation concrete aggregates[J]. Hydro science and cold zone engineering, 2018, 1(12):32-36(in Chinese with English abstract).
- [6] 丁俊男,于少鹏,史传奇,等.寒区湿地不同土地利用方式对土壤理化性质和团聚体稳定性的影响[J].生态学杂志,2021,40(11):3543-3551. DING J N, YU S P, SHI C Q, et al. Effects of land use types on soil physicochemical properties and aggregates stability in cold region wetland[J]. Chinese journal of ecology, 2021, 40(11):3543-3551(in Chinese with English abstract).
- [7] 安娟,王富,吴元芝,等.北方土石山区土地利用方式对褐土团聚体稳定性的影响[J].水土保持研究,2020,27(5):10-16. AN J, WANG F, WU Y Z, et al. Effect of land use types on aggregate stability for cinnamon soil in earth-rocky mountainous area of northern China[J]. Research of soil and water conservation, 2020, 27(5):10-16(in Chinese with English abstract).
- [8] LI H Y, CHANG L, WEI Y Y, et al. Interacting effects of land use type, soil attributes, and environmental factors on aggregate stability[J/OL]. Land, 2023, 12(7):1286[2024-07-14]. <https://doi.org/10.3390/land12071286>.
- [9] DAMENI H, WANG J G, QIN L. Soil aggregate and organic carbon stability under different land uses in the North China plain[J]. Communications in soil science and plant analysis, 2010, 41(9):1144-1157.
- [10] TANG X, QIU J C, XU Y Q, et al. Responses of soil aggregate stability to organic C and total N as controlled by land-use type in a region of South China affected by sheet erosion[J/OL]. CATENA, 2022, 218:106543[2024-07-14]. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106543>.
- [11] LE BISSONNAIS Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. theory and methodology[J]. European journal of soil science, 1996, 47(4):425-437.
- [12] LIN L W, DENG Y S, YANG G R, et al. Using Le Bissonnais method to study the stability of soil aggregates in plantations and its influence mechanism[J]. Archives of agronomy and soil science, 2022, 68(2):209-225.
- [13] ZHU M Y. Soil erosion assessment using USLE in the GIS environment: a case study in the Danjiangkou Reservoir Region, China[J]. Environmental earth sciences, 2015, 73(12):7899-7908.
- [14] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科学技术出版社,2000. LU R K. Methods of soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000(in Chinese).
- [15] PIERI C J M G. Fertility of soils: a future for farming in the West African Savannah [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1992:348.
- [16] 徐娜,党廷辉,刘文兆.黄土高原沟壑区农田土壤养分与作物产量变化的长期监测[J].植物营养与肥料学报,2016,22(5):1240-1248. XU N, DANG T H, LIU W Z. Soil nutrient balance and crop yields after 10-years' fertilization in the gully area of the Loess Plateau[J]. Journal of plant nutrition and fertilizer, 2016, 22(5):1240-1248(in Chinese with English abstract).
- [17] 刘绪军,刘丙友,景国臣,等.新修梯田对土壤理化性质及作物产量的影响[J].水土保持研究,2007,14(1):276-277. LIU X J, LIU B Y, JING G C, et al. Effect of newly built terrace on the physicochemical properties of soil and the crop yield[J]. Research of soil and water conservation, 2007, 14(1):276-277(in Chinese with English abstract).
- [18] LI Y Y, SHAO M A. Change of soil physical properties under long-term natural vegetation restoration in the Loess Plateau of China[J]. Journal of arid environments, 2006, 64(1):77-96.
- [19] 王响玲,夏浩,李宇轩,等.施用生物炭对2种典型土壤养分有效性及肥力特征的影响[J].华中农业大学学报,2023,42(5):158-167. WANG X L, XIA H, LI Y X, et al. Effects of biochar application on nutrient availability and fertility characteristics of two typical soils[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42(5):158-167(in Chinese with English abstract).
- [20] 任婷婷,王瑄,孙雪彤,等.不同土地利用方式土壤物理性质特征分析[J].水土保持学报,2014,28(2):123-126. REN T

- T, WANG X, SUN X T, et al. Characterization of soil physical properties under different land use types[J]. Journal of soil and water conservation, 2014, 28 (2) : 123-126 (in Chinese with English abstract).
- [21] 赵云鹤, 钟鹏, 高晗, 等. 土地利用类型对典型黑土团聚体稳定性和抗蚀性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2023, 51(9) : 112-119. ZHAO Y H, ZHONG P, GAO H, et al. Effects of land use types on stability and anti-erodibility of typical black soil aggregates[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2023, 51(9) : 112-119 (in Chinese with English abstract).
- [22] 李鉴霖, 江长胜, 郝庆菊. 土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(12) : 4695-4704. LI J L, JIANG C S, HAO Q J. Impact of land use type on stability and organic carbon of soil aggregates in Jinyun Mountain[J]. Environmental science, 2014, 35(12) : 4695-4704 (in Chinese with English abstract).
- [23] 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 Q L, CHENG M, AN S S, 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 (in Chinese with English abstract).
- [24] 苑亚茹, 李娜, 邹文秀, 等. 典型黑土区不同生态系统土壤团聚体有机碳分布特征[J]. 生态学报, 2018, 38(17) : 6025-6032. YUAN Y R, LI N, ZOU W X, et al. Distribution characteristics of organic carbon in aggregates of soils of three ecosystems in typical Mollisols of Northeast China[J]. Acta ecologica sinica, 2018, 38(17) : 6025-6032 (in Chinese with English abstract).
- [25] 肖理, 王章文, 殷庆元, 等. 金沙江干热河谷坡改梯对水土保持的影响[J]. 西南农业学报, 2019, 32(12) : 2856-2861. XIAO L, WANG Z W, YIN Q Y, et al. Effect of terracing slope cropland on soil and water conservation in dry-hot valley of Jinsha River Basin, southwest China[J]. Southwest China journal of agricultural sciences, 2019, 32 (12) : 2856-2861 (in Chinese with English abstract).
- [26] 张孝存, 郑粉莉. 基于 Le Bissonnais 法的东北黑土区土壤团聚体稳定性研究[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2009, 37(5) : 82-86. ZHANG X C, ZHENG F L. Study on soil aggregate stability of farmland based on Le Bissonnais method in the black soil region, Northeast China[J]. Journal of Shaanxi Normal University (natural science edition), 2009, 37 (5) : 82-86 (in Chinese with English abstract).
- [27] 卢升高, 竹蕾, 郑晓萍. 应用 Le Bissonnais 法测定富铁土中团聚体的稳定性及其意义[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1) : 7-11. LU S G, ZHU L, ZHENG X P. Le Bissonnais method of measuring aggregate stability in ferrisols and its implications[J]. Journal of soil water conservation, 2004, 18 (1) : 7-11 (in Chinese with English abstract).
- [28] 李朝霞, 蔡崇法, 史志华, 等. 鄂南第四纪粘土红壤团聚体的稳定性及其稳定机制初探[J]. 水土保持学报, 2004, 18(4) : 69-72. LI Z X, CAI C F, SHI Z H, et al. Aggregate stability and stable mechanism of aggregate derived from quaternary red clay in south of Hubei Province[J]. Journal of soil water conservation, 2004, 18(4) : 69-72 (in Chinese with English abstract).
- [29] 余洁, 苗淑杰, 乔云发. 不同类型土壤团聚体稳定机制的研究[J]. 中国农学通报, 2022, 38(14) : 89-95. YU J, MIAO S J, QIAO Y F. The stabilization mechanism of different types of soil aggregates[J]. Chinese agricultural science bulletin, 2022, 38(14) : 89-95 (in Chinese with English abstract).
- [30] PENG J, WANG J G, YANG Q S, et al. Spatial variation in soil aggregate stability and erodibility at different slope positions in four hilly regions of Northeast China[J/OL]. CATENA, 2024, 235: 107660 [2024-07-14]. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.1076600>.
- [31] 梁春林, 王彬, 张文龙. 东北黑土区坡耕地土壤团聚体稳定性与结构特征[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2020, 18(6) : 43-52. LIANG C L, WANG B, ZHANG W L. Stability and structural characteristics of soil aggregates on sloping farmland in black soil region, Northeast China[J]. Science of soil and water conservation, 2020, 18(6) : 43-52 (in Chinese with English abstract).
- [32] CARAVACA F, LAX A, ALBALADEJO J. Soil aggregate stability and organic matter in clay and fine silt fractions in urban refuse-amended semiarid soils[J]. Soil Science Society of America journal, 2001, 65(4) : 1235-1238.
- [33] 王彬. 土壤可蚀性动态变化机制与土壤可蚀性估算模型[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013: 127. WANG B. Mechanism of soil erodibility and soil erodibility calculation model[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2013: 127 (in Chinese with English abstract).
- [34] LADO M, BEN-HUR M, SHAINBERG I. Soil wetting and texture effects on aggregate stability, seal formation, and erosion[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(6) : 1992-1999.
- [35] 阿合江·赛力克, 孙琳, 王绒, 等. 黄土丘陵区恢复草地土壤团聚体组成及全氮分布特征[J]. 生态学报, 2023, 43(24) : 10065-10080. SAILIKE A, SUN L, WANG R, et al. Restoration of grassland soil aggregate composition and total nitrogen distribution characteristics in Loess Hilly Area[J]. Acta ecologica sinica, 2023, 43(24) : 10065-10080 (in Chinese with English abstract).

Effects of patterns of land use on stability of aggregates in soil in typical small watersheds in Danjiangkou Reservoir area

LIU Fujun, HU Yujie, GUO Zhonglu, ZENG Jianhui, LI Dongyao, XIAO Zhiyuan

College of Resources & Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract Soil erosion is a key driving factor leading to the degradation of soil quality, and the stability of aggregates in soil is an important indicator for measuring soil quality. Changes in patterns of land use may affect structural substances such as aggregates in soil and the physicochemical properties of soil related. Wulongchi watershed in Danjiangkou Reservoir area was used to study the effects of different patterns of land use including woodland, shrub land, slope farmland and terrace on the physicochemical properties of soil and the stability of aggregates in soil via field investigation, on-site sampling, and indoor analyses. The Le Bissonnais method was used to determine the stability of aggregates in soil. The results showed that there were significant differences in soil organic matter (SOM), total nitrogen (TN), clay, silt, and porosity among different patterns of land use ($P < 0.05$). The content of SOM and TN in slope farmland was higher than that in terrace. Woodlands had the highest content of organic matter and the lowest content of total nitrogen, whereas shrub land showed the opposite trend. The content of clay and silt in soil in slope farmland and terrace was higher than that in soil in woodland and shrub land. There were significant differences in SOM, bulk density (BD) and porosity among soils with different depths ($P < 0.05$). The porosity in soil in slope farmland and terrace was smaller than that in shrub land. SOM and Porosity decreased and BD increased with the increase in the depth of soil. The mean weight diameter (MWD) of aggregates in soil and structure stability index (SSI) of soil were significantly affected by the pattern of land use ($P < 0.05$). SSI was in the decreasing order of woodland > shrub land > slope farmland > terraced, with SSI values all greater than 7%, indicating a low risk of structural degradation in soil. The MWD_{fw} , MWD_{ws} and MWD_{sw} of all samples was 0.28-2.20, 0.83-2.44 and 0.41-2.30 mm, respectively. The stability of aggregates in soil in woodland was the highest, while the stability of aggregates in soil in terrace was the worst. The average weight diameter of aggregates in soil for the four patterns of land use among the three treatments of Le Bissonnais method was in the decreasing order of $MWD_{ws} > MWD_{sw} > MWD_{fw}$, indicating that the destruction of aggregates in soil in the studied area is mainly caused by dissipation. The results of path analysis showed that SOM had a significantly positive effect on the stability of aggregates in soil, with the highest path coefficient. TN had a significantly negative effect on the stability of aggregates in soil. Patterns of land use indirectly affected the stability of aggregates in soil mainly by affecting the SOM, TN, clay, porosity, and silt. It will provide reference for protecting the ecology and environment in the Danjiangkou Reservoir area and guaranteeing the safety of water quality in the water source area of South-to-North Water Diversion Project.

Keywords patterns of land use; Le Bissonnais method; stability of aggregates; path analysis

(责任编辑:陆文昌)