

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.047.

万欣, 张帅文, 张润琴, 等. 青藏高原不同土地利用方式土壤团聚体组成及稳定性特征[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 53-60.

Wan Xin, Zhang Shuaiwen, Zhang Runqin, et al. Soil Aggregate Stability of Different Land Use Patterns on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 53-60.

青藏高原不同土地利用方式土壤团聚体组成及稳定性特征

万欣^{1,2}, 张帅文^{1,2}, 张润琴², 李志国², 陈鹏², 邢顺林¹, 刘毅²

(1. 西藏大学 理学院, 拉萨 850000; 2. 中国科学院 武汉植物园, 武汉 430074)

摘要: [目的] 探究青藏高原不同土地利用方式对土壤团聚体分布特征及稳定性的影响, 为改善高寒地区土壤质量提供科学依据。[方法] 选取青藏高原 5 种不同土地利用方式(农田、人工林、湿地、灌丛、裸地)为研究对象, 采用干筛法和湿筛法测定土壤团聚体粒径分布以及土壤有机碳(SOC)、总碳(TC)、总氮(TN)、pH, 并计算大团聚体重量的百分含量($DR_{>0.25}$, $WR_{>0.25}$)、团聚体破坏率(PAD)、平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)等土壤团聚体稳定性指标, 研究了高寒地区不同土地利用方式下团聚体组成及其稳定性特征。[结果] 相较于机械稳定性团聚体, 土壤水稳定性团聚体更易受到土地利用方式的影响, 且更能反映西藏地区土壤团聚体结构稳定性; 农田耕种增加了具有机械稳定性的土壤大团聚体含量, 但不具有水稳定性; 人工林和湿地的土壤团聚体具有较高的水稳定性特征。相关性分析表明, 土壤团聚体 MWD 与 SOC, TN 含量呈显著正相关; 土壤团聚体 MWD, GMD 值与各粒径团聚体含量总体上呈线性相关, 且对于机械稳定性团聚体, 1 mm 是正负相关的临界点, 对于水稳定性团聚体, 0.25 mm 是正负相关的临界点。[结论] 高寒地区农业耕种仅能提高土壤团聚体的机械稳定性, 湿地和人工林对团聚体稳定性具有促进作用, 建议未来在高寒地区进行合理的植被覆盖进而提高土壤质量。

关键词: 土壤团聚体; 团聚体稳定性; 团聚体直径; 青藏高原

中图分类号: S152.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)01-0053-08

Soil Aggregate Stability of Different Land Use Patterns on the Qinghai-Tibetan Plateau

Wan Xin^{1,2}, Zhang Shuaiwen^{1,2}, Zhang Runqin², Li Zhiguo², Chen Peng², Xing Shunlin¹, Liu Yi²

(1. College of Science, Tibet University, Lhasa 850000, China;

2. Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to investigate the effects of different land use patterns on the distribution characteristics and stability of soil aggregate on the Qinghai-Tibet Plateau, and to provide a scientific basis for improving soil quality in alpine regions. [Methods] Five different land use patterns (farmland, plantation, wetland, shrubland, and bareland) were selected as the study samples on the Tibetan Plateau. Soil aggregate size distribution and soil organic carbon (SOC), total carbon (TC), total nitrogen (TN), and pH were determined by dry and wet sieving methods. >0.25 mm soil aggregates weight percentage ($DR_{>0.25}$, $WR_{>0.25}$), the percentage of aggregate destruction (PAD), the mean weight diameter (MWD), and the geometric mean diameter (GMD) of soil aggregates were determined, and the composition and stability characteristics of soil aggregates under different land use patterns in the alpine region were studied. [Results] Compared with mechanically stable aggregates, soil water-stable aggregates were more susceptible

收稿日期: 2022-10-11

修回日期: 2022-11-25

资助项目: 国家自然科学基金项目(31971532, 32171648)

第一作者: 万欣(1997—), 女, 安徽芜湖人, 硕士研究生, 主要从事土壤生态学研究。E-mail: 1097778732@qq.com

通信作者: 刘毅(1978—), 男, 湖南新化人, 研究员, 博士, 主要从事土壤生态学研究。E-mail: liuyi@wbgcas.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

to the influence of land use patterns and better reflected the structural stability of soil aggregations in Tibet. Farmland cultivation increased the content of soil macroaggregates with mechanical stability, but not with water stability. Soil aggregates in plantations and wetlands had high water stability characteristics. Correlation analysis showed that the MWD of soil aggregates was positively correlated with SOC and TN contents. For machine-stable aggregates, 1 mm is the critical size of positive and negative correlation, and for water-stable aggregates, 0.25 mm is the critical size of positive and negative correlation. [Conclusion] Agricultural cultivation in alpine areas can only improve the mechanical stability of soil aggregates, while wetlands and planted forests have a positive effect on the stability of aggregates, and it is recommended that reasonable vegetation cover should be carried out to improve soil quality in alpine areas in the future.

Keywords: soil aggregate; soil aggregate stability; soil aggregate diameter; Qinghai-Tibet Plateau

土壤结构通过影响水分流动、气体交换、养分循环和土壤微生物的多样性、活性进而影响土壤质量及其生态学功能^[1]。作为土壤结构的基本单元,土壤团聚体组成与有机质含量也是表征土壤结构状况和养分供储能力的重要指标^[2]。Tisdall 等^[3]将以粒径 250 μm 的团聚体为界,将水稳性团聚体划分为大团聚体($> 250 \mu\text{m}$, Macroaggregates)和微团聚体($< 250 \mu\text{m}$, Microaggregates),不同粒级团聚体在改善土壤孔隙度、提高水土保持能力、增强土壤微生物活性等方面具有不同的作用^[4]。评价土壤团聚体稳定性特征的常用指标主要为平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)以及大团聚体含量等。MWD, GMD 和大团聚体含量越大,土壤团聚体的稳定性越好^[5]。

土地利用改变是自然作用与人类活动共同作用的结果,土地利用方式改变会影响土壤团聚体的形成和粒径组成,进而造成土壤团聚体稳定性的差异^[6],使得 C、N 元素在土壤团聚体中重新组合和再分配。已有研究表明,土地利用方式能够显著影响土壤团聚体的形成与稳定性。例如,Blankinship 等^[7]发现草地退会使土壤团聚体由大团聚体(2~9 mm)转变为小团聚体(0.25~2 mm)。谭秋锦等^[8]研究了喀斯特 6 种土地利用类型,发现人工林和次生林的土壤团聚体稳定性最好,而旱地稳定性较差。大粒级团聚体对于土地利用类型较为敏感,而小粒级团聚体相对稳定^[9]。合理的土地利用方式可以增加土壤团聚体稳定性、增强土壤固碳水平并提高生态系统土壤肥力与生产力^[10]。

青藏高原被称为地球的第三极,位于中国西南部高寒地带,是生态系统的敏感脆弱地带,对我国甚至整个全球的气候和气象都具有重要影响。深入探究青藏高原的土壤结构稳定性有助于增强青藏高原的土壤肥力和土壤抗蚀性,并改善其生态环境^[11]。目前土壤团聚体组成及其稳定性特征的研究主要集中

在东北平原^[12]和黄土高原地区^[13]。由于青藏高原的环境恶劣性(比如:气候寒冷和海拔高),土壤团聚体相关研究结果普适性有待进一步验证,尤其是土地利用方式如何影响土壤团聚体组成及其稳定性的研究十分匮乏。鉴于此,本文结合野外调查与室内分析,采用干筛法、湿筛法分别测定不同土地利用方式下表层土壤的机械稳定性团聚体和水稳定性团聚体,研究青藏高原 5 种主要土地利用方式(农田、人工林、湿地、灌丛、裸地)对土壤团聚体组成和稳定性特征的影响,以期科学认识高寒地区土壤资源的合理利用及调控管理提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于藏南谷地,平均海拔约 4 000 m,年均气温 $-16 \sim 16^{\circ}\text{C}$,年日平均照时数约为 3 021 h,年降雨量自西北至东南为 50~5 000 mm。西藏地区由于气候条件多寒冷、干旱,故而高原土壤的成土年龄晚、母质风化程度低。

1.2 试验采样

于 2021 年 8 月自藏南谷地经拉萨至阿里沿线约 1 500 km 进行野外调查采样,根据土地利用方式等选取农田(青稞 *Hordeum vulgare* 或油菜 *Brassica campestris*)、人工林(主要树种为白桦 *Betula platyphylla*)、湿地、灌丛(香柏 *Sabina pingii* 和昌都锦鸡儿 *Caragana changduensis*)、裸地(无植被覆盖)共 5 种土地类型,在同一个采样区域内对每一种土地利用类型都布置采样点,并于 6 个区域内进行重复采样,总样品数为 30 个。每个样点内按 S 型多点混合的原则采集 0—20 cm 土层的原状土样,除去杂草、根系、石块等杂物,自然风干后除去植物残体及小石块后备用。采样点信息见表 1。

1.3 土壤样品测定方法

采用沙维诺夫干筛法测定土壤机械稳定性团聚

体组成,湿筛法测定水稳定性团聚体组成。干筛选取的 5 个粒级为: $>5\text{ mm}$, $2\sim 5\text{ mm}$, $1\sim 2\text{ mm}$, $0.25\sim 1\text{ mm}$, $<0.25\text{ mm}$;湿筛选取的 5 个粒级为 $>2\text{ mm}$, $1\sim 2\text{ mm}$, $0.25\sim 1\text{ mm}$, $0.053\sim 0.25\text{ mm}$, $<0.053\text{ mm}$ 。

采用电位法测定土壤 pH 值;采用 K_2CrO_7 外加热法测定土壤有机质含量,以土壤有机碳与有机质 1.724 的换算系数计算土壤有机质;采用全自动有机元素分析仪 (Vario macro cube)测定土壤 TN 及 C : N 值。

表 1 采样点信息

Table 1 The basic information of sampling point

编号	经度 E	纬度 N	海拔/m	植被	土地利用
1	86.837126°	28.592881°	4275	青稞 <i>Hordeum vulgare</i>	农田
2	86.908548°	28.590499°	4268	江孜沙棘 <i>Hippophaegyantensis</i>	人工林
3	86.908571°	28.591417°	4264	三裂碱毛茛 <i>Halerpestes tricuspis</i>	湿地
4	83.954190°	29.751890°	4548	水麦冬 <i>Triglochin palustre</i>	湿地
5	86.721936°	28.628591°	4603	香柏 <i>Sabina pingii</i>	灌丛
6	86.722012°	28.628737°	4615	无	裸地
7	85.337348°	28.412726°	3290	青稞 <i>Hordeum vulgare</i>	农田
8	85.33715°	28.410969°	3312	毛白杨 <i>Populus tomentosa</i>	人工林
9	81.219373°	30.222213°	3810	青稞 <i>Hordeum vulgare</i>	农田
10	81.187280°	30.252538°	3839	毛白杨 <i>Populus tomentosa</i>	人工林
11	82.231740°	30.623570°	4780	水麦冬 <i>Triglochin palustre</i>	湿地
12	81.611550°	30.762250°	4557	穗状狐尾藻 <i>Myriophyllum spicatum</i>	湿地
13	81.293135°	30.942234°	4582	昌都锦鸡儿 <i>Caragana changduensis</i>	灌丛
14	81.293432°	30.942216°	4582	无	裸地
15	87.473516°	29.209011°	4249	青稞 <i>Hordeum vulgare</i>	农田
16	86.796576°	29.393873°	4699	香柏 <i>Sabina pingii</i>	灌丛
17	86.796577°	29.393903°	4701	无	裸地
18	87.661887°	29.084787°	3959	油菜 <i>Brassicacampestris</i>	农田
19	88.014493°	29.080606°	4256	白桦 <i>Betula platyphylla</i>	人工林
20	91.431062°	29.777759°	3697	毛白杨 <i>Populus tomentosa</i>	人工林
21	91.186115°	29.928311°	3757	油菜 <i>Brassicacampestris</i>	农田
22	91.148121°	30.015318°	3908	白桦 <i>Betula platyphylla</i>	人工林
23	91.130676°	30.079605°	4375	香柏 <i>Sabina pingii</i>	灌丛
24	91.130646°	30.079558°	4374	无	裸地
25	85.337150°	28.410969°	3312	丝叶眼子菜 <i>Potamogeton filiformis</i>	湿地
26	85.800382°	28.704347°	4737	香柏 <i>Sabina pingii</i>	灌丛
27	85.800446°	28.704188°	4735	无	裸地
28	83.741500°	29.865950°	4553	西伯利亚蓼 <i>Polygonum sibiricum</i>	湿地
29	84.540541°	29.501856°	4582	昌都锦鸡儿 <i>Caragana changduensis</i>	灌丛
30	84.540659°	29.501803°	4582	无	裸地

1.4 土壤团聚体各稳定性指标计算

采用邱丽萍^[14]和刘文利等^[15]文献中提到的方法计算土壤稳定性大团聚含量($R_{>0.25}$)、平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和土壤团聚体破坏率(PAD),具体计算公式为:

$$R_{>0.25} = \frac{M_{>0.25}}{M_T} \times 100\%$$
 (1)

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n \overline{R_i} W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}$$
 (2)

$$GMD = \exp \left[\frac{\sum_{i=0}^n W_i \ln \overline{R_i}}{\sum_{i=0}^n W_i} \right]$$
 (3)

$$PAD = \frac{DR_{>0.25} - WR_{>0.25}}{DR_{>0.25}} \times 100\%$$
 (4)

式中; $\overline{R_i}$ 为筛分出来的任一粒径范围团聚体的平均直径(mm); W_i 为任一粒径范围团聚体的质量占土壤样品干质量的分数(%); $M_{>0.25}$ 为 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体重量; M_T 为总土重量; $DR_{>0.25}$ 为 $>0.25\text{ mm}$ 的机

械稳定性团聚体含量(%)； $WR_{>0.25}$ 为 >0.25 mm 的水稳定性团聚体含量(%)。

1.5 数据处理

采用 Excel 和 Origin 等对数据进行整理和绘图。采用 SPSS 20.0 进行统计分析,采用 Pearson 法分析指标间相关性。

2 结果与分析

2.1 土壤团聚体组成分析

不同土地利用方式下土壤团聚体组成如图 1 所示。从机械稳定性来看,农地以 >5 mm 粒级团聚体占比最高(达 37.33%),林地和湿地以 <1 mm 和 >5 mm 粒级

团聚体为主,灌丛和裸地则以 <1 mm 粒级团聚体占比最高(高达 80%以上)。其中 $0.25\sim1$ mm 粒级团聚体在农田和湿地中的含量显著低于其他土地利用方式; <0.25 mm粒级微团聚体在处理间无显著差异。从水稳定性团聚体来看,农田、湿地和灌丛土壤水稳性团聚体优势粒径为 $0.053\sim0.25$ mm,分布于 44%~54%之间,而林地和裸地土壤水稳性团聚体优势粒径为 $0.25\sim1$ mm;各土地利用方式下均以 $1\sim2$ mm 团聚体含量最低。此外, >2 mm 的大团聚体含量表现为湿地最多(12.7%),裸地最少(2.32%), $0.25\sim1$ mm 粒级团聚体表现为裸地>林地>农田>灌丛>湿地, $0.053\sim0.25$ mm 与 <0.053 mm 粒级团聚体在处理间均无显著差异。

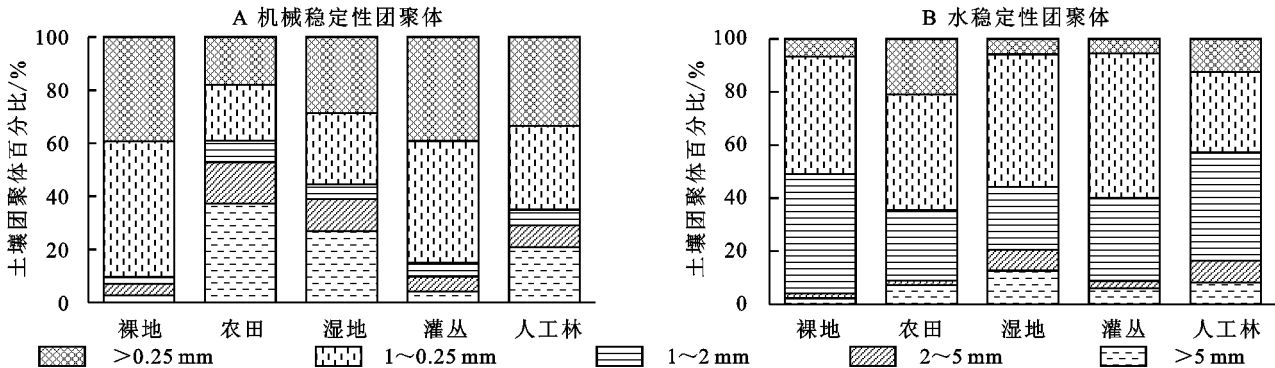


图 1 不同土地利用方式下土壤机械(干筛)和水(湿筛)稳定性团聚体的粒级分布

Fig. 1 Particle level distribution of soil mechanical (dry screen) and water (wet screen) stable aggregates under different land use types

2.2 土壤团聚体稳定性分析

土壤中的大团聚体是维持土壤结构稳定的基础,通常大团聚体含量 $R_{>0.25}$ 越高,土壤结构越稳定^[16]。由图 2 可知,机械稳定性 $R_{>0.25}$ 表现为农田(82.0%)>湿地(74.0%)>灌丛(70.9%)>人工林(66.6%)>裸土(60.8%)。水稳定性 $R_{>0.25}$ 表现为人工林(57.2%)>裸土(49.1%)>湿地(44.7%)>灌丛(43.6%)>农田

(35.6%)($p<0.05$),说明人工林条件下的土壤团聚体水稳定性较好。团聚体破坏率(PAD)是表征土壤结构稳定性的重要指标,其数值越小土壤结构稳定性越强。农田土壤团聚体湿筛后 PAD 最高,为 53.6%,湿地和灌丛的 PAD 分布 35.2%~36.7%,而人工林的 PAD 显著低于农田,这说明人工林土壤团聚体稳定性最好。

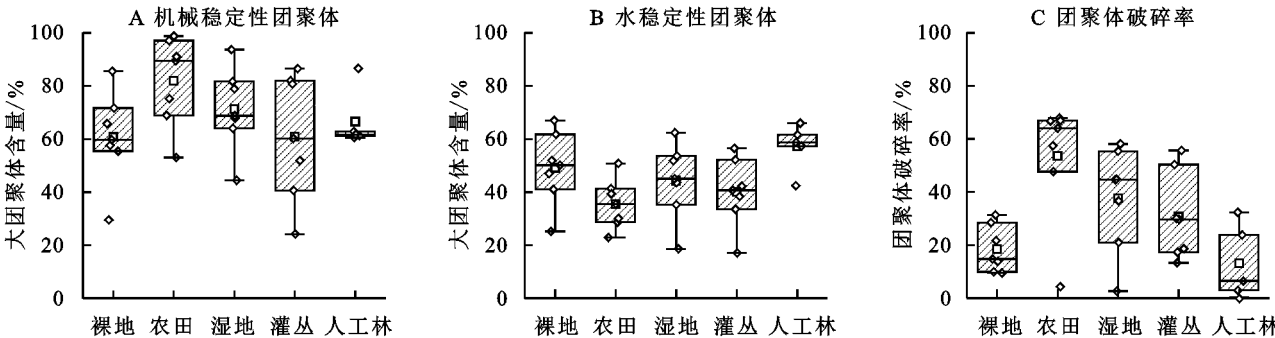


图 2 不同土地利用方式下土壤机械(干筛)和水(湿筛)稳定性 $R_{>0.25}$ 含量及其 PAD

Fig. 2 Stability of $R_{>0.25}$ content and PAD of soil machinery (dry screen) and water (wet screen) under different land use types

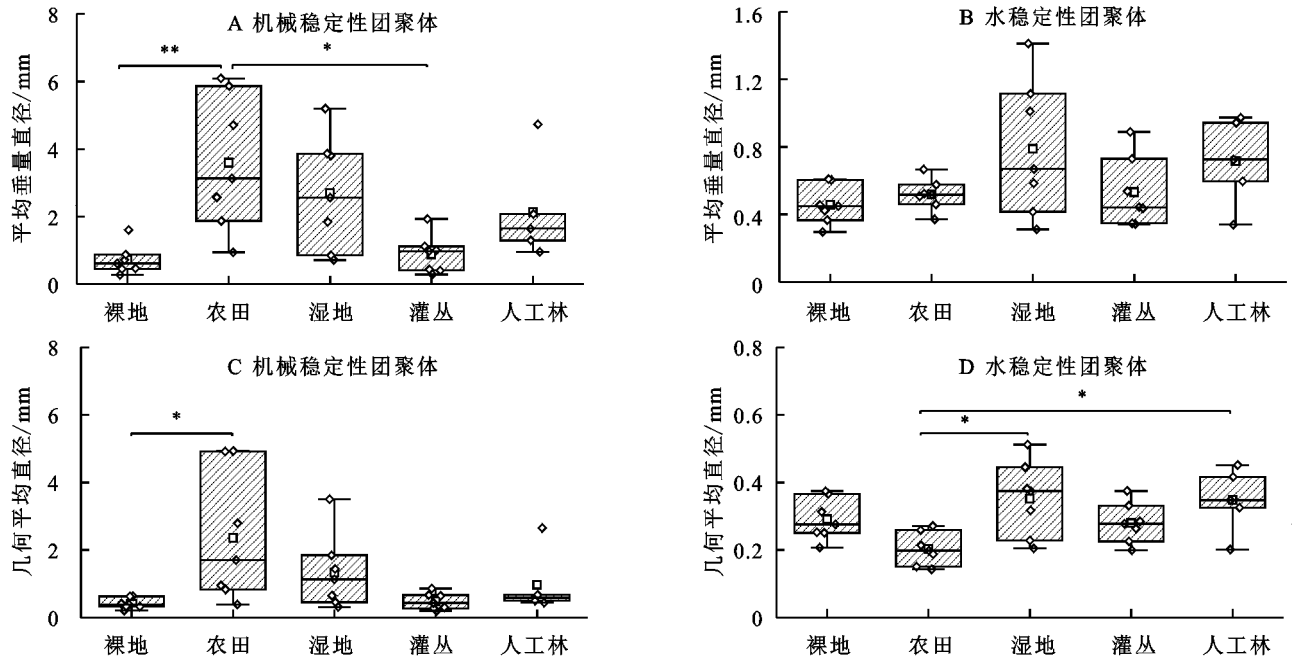
2.3 土壤团聚体直径分析

平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)是土壤团聚体直径分析的常用指标,MWD 和 GMD 值的大小与土壤团聚体的稳定性呈正相关。从图 3 看出,在干筛条件下,5 种土地利用方式下 MWD 表

现为:农田(3.60 mm)>湿地(2.69 mm)>人工林(2.14 mm)>灌丛(0.88 mm)>裸土(0.71 mm),其中农田显著高于灌丛和裸土($p<0.05$);GMD 表现规律与 MWD 情况基本一致,但仅农田和裸土差异达到了显著水平($p<0.05$)。对于水稳定性团聚体,

各土地利用方式下 MWD 表现为:湿地(0.79 mm) > 人工林(0.72 mm) > 灌丛(0.53 mm) > 农田(0.52 mm) > 裸土(0.46 mm); GMD 表现为:湿地(0.35 mm) > 人工林(0.35 mm) > 裸土(0.29 mm) > 灌丛(0.28 mm) > 农田

(0.20 mm)。以上结果说明,湿地和人工林对团聚体水稳定性直径具有显著的促进作用;而对农田土壤来说,尽管其显著增加了团聚体的机械稳定性直径,但明显降低了水稳定性团聚体直径。



注: * 表示因子间显著相关($p < 0.05$), ** 表示因子间极显著相关($p < 0.01$)。

图 3 不同土地利用下土壤机械(干筛)和水(湿筛)稳定性团聚体的 MWD 和 GMD

Fig. 3 MWD and GMD of soil mechanical (dry screen) and water (wet screen) stable aggregates under different land use types

2.4 土壤有机碳、全氮含量

土壤中碳、氮含量及 pH 值等是影响土壤团聚体稳定性的主要因子,由图 4 可知,不同土地利用下的土壤 SOC 含量在 14.6~41.2 g/kg,其中以湿地最高,裸土最低;土壤 TN 含量 0.7~2.1 g/kg,表现为湿地 > 农田 > 人工林 > 灌丛 > 裸土,其中裸土的土壤氮含量显著低于农田($p < 0.05$);土壤的 C:N 表现为裸土 > 灌丛 > 人工林 > 湿地 > 农田。土壤 pH 分布在 7.40~8.38,均为中性或弱碱性土壤。

2.5 土壤团聚体组成与各参数间相关性分析

Pearson 相关性分析表明,无论是机械稳定性团聚体还是水稳定性团聚体,其 MWD 与 SOC 和 TN 均呈显著正相关,机械稳定性 GMD 与 TN 间以及水稳定性 GMD 与 SOC 间也存在显著正相关,这说明土壤 SOC 和 TN 含量越高,团聚体的 MWD 和 GMD 越大。对于机械稳定性团聚体组成(图 5A),2~5 mm, >5 mm 粒径的机械稳定性团聚体与 MWD, GMD 均呈显著正相关,但 <0.25 mm, 1~0.25 mm 粒径的机械稳定性团聚体与 MWD, GMD 均呈显著负相关,其正负相关性以 1 mm 团聚体粒径为界。对于水稳定性团聚体组成(图 5B), >2 mm, 1~2 mm 粒径的水稳定性团聚体与 MWD,

GMD 呈显著正相关,而 0.053~0.25 mm 粒径的土壤水稳定性团聚体与 MWD, GMD 呈显著负相关,其正负相关性以 0.25 mm 为界。

3 讨论

土壤团聚体的数量和组成可反映土壤、通透性、持水性、孔隙性和养分供储能力^[17]。理想的土壤团聚体组成可促进土壤结构稳定,有利于提高土地生产力。环境因子和成土过程深刻影响着土壤团聚体的形成、稳定及大团聚体和微团聚体之间的转化和再分布^[18]。本研究结合干湿筛方法对高寒地区不同土地利用方式土壤团聚体进行分析发现,无论是机械稳定性团聚体还是水稳定性团聚体,均以 <0.25 mm 粒级的微团聚体在土壤团粒结构中占主导地位。其主要原因有两个方面,一方面是高寒地区土壤有机质含量较低,另一方面是由于高寒地区是典型土壤结构稳定性较差的区域,土壤较为贫瘠,且所处环境恶劣,海拔较高,易受冻融交替作用影响^[12],从而降低大团聚体含量,使团聚体在冻融交替过程中容易破碎,较大粒径的团聚体比例降低,这与 Niu 等^[19]研究结果一致。

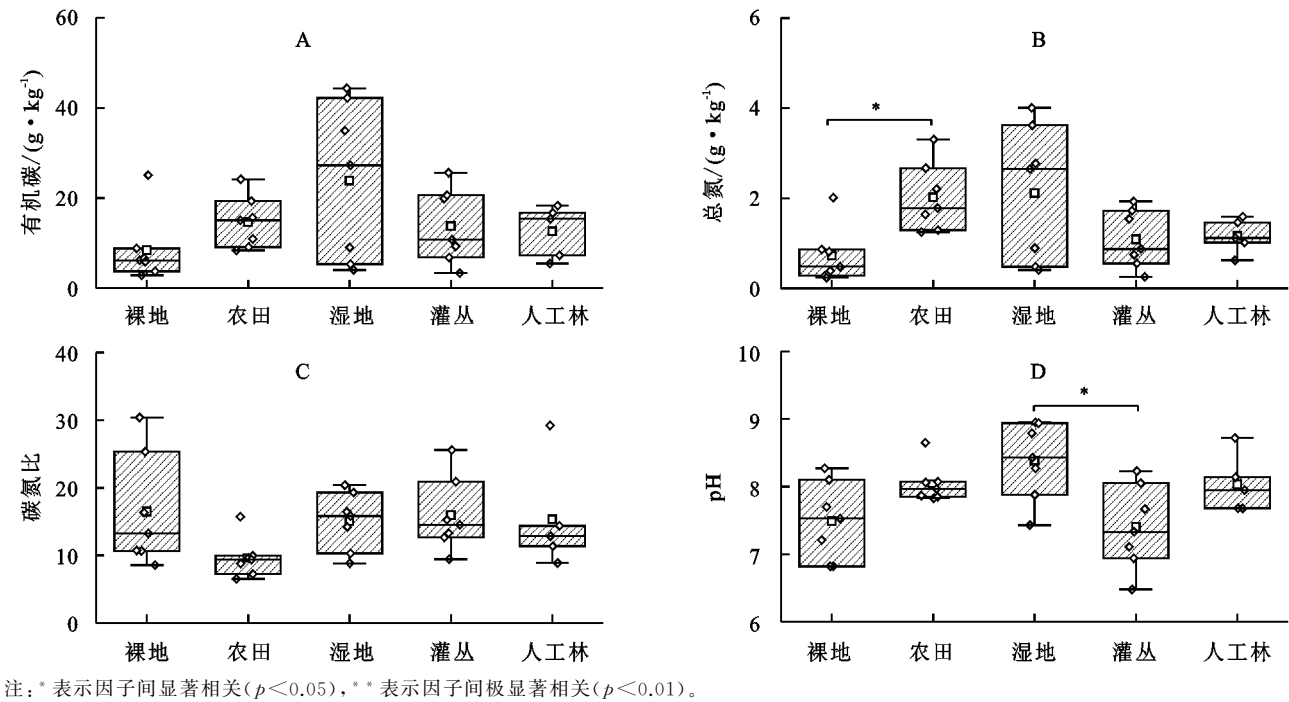


图 4 不同土地利用方式下土壤有机碳、全氮、碳氮比和 pH 含量

Fig. 4 Soil organic carbon, total nitrogen, carbon-nitrogen ratio and pH content under different land use methods

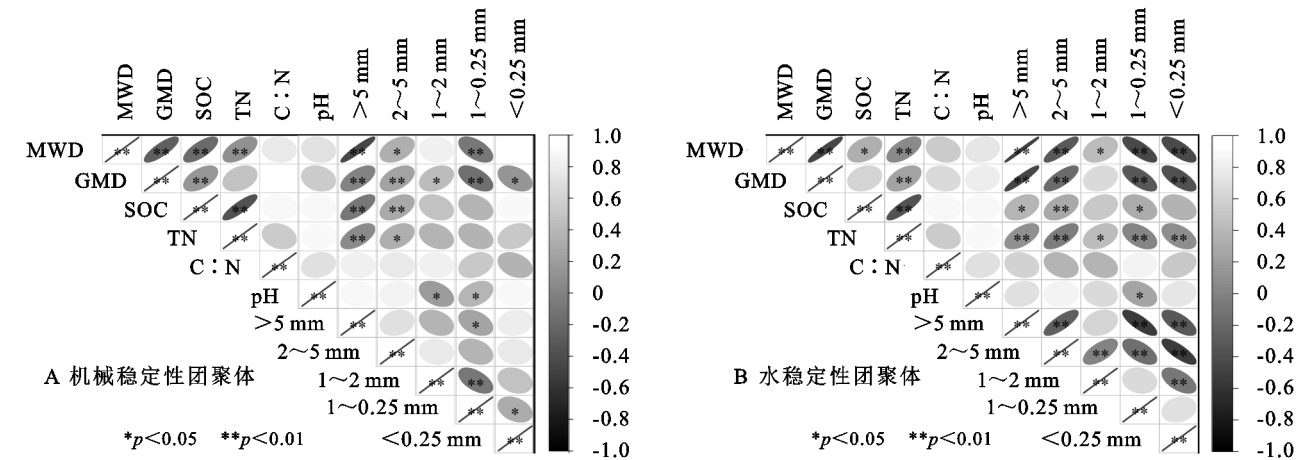


图 5 土壤团聚体组成和稳定性指数与土壤环境因子的 Pearson 相关性分析

Fig. 5 Pearson correlation analysis of soil aggregate composition and stability index and soil environmental factors

土地利用方式改变导致的植被类型变化会深刻影响土壤质量和微生物活性,进而导致土壤团聚体的稳定性和粒径分布具有明显差异^[20]。本研究结果表明,农田耕作使土壤机械稳定性大团聚体增加,机械稳定性团聚体 $R_{>0.25}$ 和直径指数 MWD 和 GMD 显著高于其他的土地利用方式,其原因可能是农业活动加速了土壤熟化,有利于土壤团聚体的周转,进而促进机械稳定性团聚体的形成。而对于水稳定团聚体,农田土壤团聚体的水稳定性指标明显降低,而且农田土壤团聚体破碎率显著高于其他土地利用方式的土壤,可见农田土壤增加了机械稳定性大团聚体经过湿

筛后的破碎率,说明农田土壤增加的土壤大团聚体并不具有水稳定性,可能是农耕地受人干扰较大,土壤结构容易遭到破坏,故而未形成稳定的胶结作用,丁俊男等^[21]的研究中也有相似现象。此外,本研究结果也表明,高寒地区人工林和湿地的土壤团聚体稳定性水平都相对较好,这可能是由于这些区域具有较好的植被覆盖,特别是湿地土壤中具有发达的植物根系,根系分泌物产生的高分子黏质可促进土壤颗粒的团聚化,提高土壤团聚体的稳定性和抗腐蚀性^[22]。人工林区域产生凋落物较多,易促进有机质的形成,提高了土壤结构的稳定性^[23]。青藏高原灌丛生境下

的植株分布并不密集,生长于石砾较多的山坡上,几乎无其他植物共存,因此本研究灌丛土壤与裸土基本类似,两者团聚体组成和稳定性具有相似的结果,但灌丛的凋落物和根系分泌物相对多,有机质输入量大,其团聚体稳定性略高于裸地。

土壤有机质与土壤团聚体的形成与周转息息相关。一方面,土壤团聚体是土壤有机质固定的主要场所;另一方面,在土壤团聚体形成过程中有机质通过与微团聚体、矿物质组分结合形成新的更大级别的团聚体。相关性分析结果表明,土壤团聚体稳定性指标与土壤 SOC, TN 均呈现显著正相关,进一步验证了土壤团聚体形成与有机质固定是一个互相促进的过程^[24],土壤有机碳含量越高,其团聚体稳定性越高,提高有机碳含量有利于土壤结构稳定性的增强^[11]。此外机械稳定性土壤团聚体 MWD 和 GMD 值与各粒径团聚体含量皆呈明显线性关系(除 1~2 mm 粒径与 MWD 和 GMD 值相关性不显著外,均达显著水平),其正负相关性以 1 mm 为界。对于水稳定性团聚体,>2 mm 和 1~2 mm 粒径的土壤水稳定性团聚体与 MWD, GMD 呈显著正相关,而 0.053~0.25 mm 粒径的土壤水稳定性团聚体与 MWD, GMD 呈显著负相关,其正负相关性以 0.25 mm 为界。本研究结果与姜敏等^[25]的研究结果相似,进一步确认了水稳定性团聚体的关键临界点为 0.25 mm。

4 结论

本研究采用干筛法和湿筛法对团聚体稳定性进行了分析,对比分析了青藏高原不同土地利用方式下土壤团聚体稳定性($R_{>0.25}$ 和 PAD)、土壤团聚体大小直径(MWD 和 GMD)等主要指标的差异,得出如下主要结论:

(1) 对于青藏高原高寒地区,由于其土壤发育程度较低,难以形成稳定的大团聚体(>0.25 mm),干筛和湿筛获得的土壤团聚体组成均以微团聚体(<0.25 mm)为主。

(2) 从团聚体稳定性来看,湿地和人工林对团聚体水稳定性具有显著的促进作用;农田土壤具有较高的机械稳定性团聚体直径,农业耕种下土壤熟化形成的土壤团聚体仅具有机械稳定性,而不具有水稳定性, PAD 结果也进一步确证了这一现象。

(3) 相关性分析结果表明,土壤团聚体 MWD, GMD 值和土壤碳氮含量皆呈明显线性关系。土壤团聚体 MWD, GMD 值与各粒径团聚体含量总体上呈线性相

关,且对于机械稳定性团聚体,1 mm 是正负相关的临界点,水稳定性团聚体的重要临界点为 0.25 mm。

参考文献:

- [1] Vogel H J, Balseiro R M, Kravchenko A, et al. A holistic perspective on soil architecture is needed as a key to soil functions[J]. *European Journal of Soil Science*, 2022, 73 (1): e13152.
- [2] O'Brien S L, Jastrow J D. Physical and chemical protection in hierarchical soil aggregates regulates soil carbon and nitrogen recovery in restored perennial grasslands [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013, 61: 1-13.
- [3] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. *Journal of Soil Science*, 1982, 33(2): 141-163.
- [4] Wang L, Yuan X, Liu C, et al. Soil C and N dynamics and hydrological processes in a maize-wheat rotation field subjected to different tillage and straw management practices[J]. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 2019, 285: 106616.
- [5] Nimmo J R, Perkins K S. Aggregate stability and size distribution[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 68(3): 725-735.
- [6] Laganière J, Angers D A, Paré D. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: A meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(1): 439-453.
- [7] Blankinship J C, Fonte S J, Six J, et al. Plant versus microbial controls on soil aggregate stability in a seasonally dry ecosystem[J]. *Geoderma*, 2016, 272: 39-50.
- [8] 周春衡, 韦媛荣, 许鹏, 等. 喀斯特地区澳洲坚果种植对土壤养分及肥力的影响[J]. *中国热带农业*, 2021(5): 62-68. Zhou C H, Wei Y R, Xu P, et al. Effect of macadamia nuts planting on soil nutrients and fertility in karst areas [J]. *China Tropical Agriculture*, 2021(5): 62-68.
- [9] 任荣秀, 杜章留, 孙义亨, 等. 华北低丘山地不同土地利用方式下土壤团聚体及其有机碳分布特征[J]. *生态学报*, 2020, 40(19): 6991-6999. Ren R X, Du Z L, Sun Y H, et al. Soil aggregate and its organic carbon distribution characteristics at different land use patterns in hilly areas of north China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(19): 6991-6999.
- [10] 胥佳忆, 李先德, 刘吉龙, 等. 农业土地利用转变对土壤团聚体组成及碳、氮含量的影响[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(8): 438-448. Xu J Y, Li X D, Liu J L, et al. Effects of the change of agricultural soil utilization pattern on soil aggregate composition and carbon, nitrogen content [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(8): 438-448.

- [11] 于文竹,魏霞,赵恒策,等.青藏高原高寒草原草甸土壤团聚体及养分因子变化特征[J].水土保持学报,2020,34(6):301-308.
- Yu W Z, Wei X, Zhao H C, et al. Changes of Soil Aggregates and nutrient factors in alpine grassland and alpine meadow of Qinghai Tibet Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(6):301-308.
- [12] 王文刚,王彬,顾汪明,等.冻融循环对黑土团聚体稳定性与微结构特征的影响[J].水土保持学报,2022,36(1):66-73.
- Wang W G, Wang B, Gu W M, et al. Effect of Freeze-Thaw cycles on soil aggregate stability and microstructure of black soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(1):66-73.
- [13] 王正伟,武均,李婉玲,等.不同土地利用方式对陇东黄土高原土壤团聚体稳定性的影响[J].作物研究,2022,36(3):238-244.
- Wang Z W, Wu J, Li W L, et al. Effects of different land use patterns on the stability of soil aggregates in the Loess Plateau of eastern Gansu[J]. Crop Research, 2022, 36(3):238-244.
- [14] 邱莉萍,张兴昌,张晋爱.黄土高原长期培肥土壤团聚体中养分和酶的分布[J].生态学报,2006,26(2):364-372.
- Qiu L P, Zhang X C, Zhang J A. Distribution of nutrients and enzymes in Loess Plateau soil aggregates after long-term fertilization [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(2):364-372.
- [15] 刘文利,吴景贵,傅民杰,等.种植年限对果园土壤团聚体分布与稳定性的影响[J].水土保持学报,2014,28(1):129-135.
- Liu W L, Wu J G, Fu M J, et al. Effect of different cultivation years on composition and stability of soil aggregate fractions in orchard[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(1):129-135.
- [16] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil structure and soil organic matter: II. A normalized stability index and the effect of mineralogy[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000,64:1042-1049.
- [17] Wang X, Cammeraat E L H, Cerli C, et al. Soil aggregation and the stabilization of organic carbon as affected by erosion and deposition[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2014,72:55-65.
- [18] Puget P, Chenu C, Balesdent J. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates [J]. European Journal of Soil Science, 2000,51(4):595-605.
- [19] Niu H, Luo W Q, Wang J F, et al. Effects of freeze-thaw on the composition and stability of air-dried and water-stable aggregates of black soil in northeast China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020,51(4):841-847.
- [20] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1996, 28:665-676.
- [21] 丁俊男,于少鹏,史传奇.黑龙江哈尔滨白渔泡国家湿地公园沼泽,林地和农田土壤物理,化学和生物性质差异[J].湿地科学,2020,18(1):77-84.
- Ding J N, Yu S P, Shi C Q. Differences of physical, chemical and biological properties of soils of marsh, forest land and farmland in Heilongjiang Harbin Baiyupo National wetland park[J]. Wetland Science, 2020, 18(1):77-84.
- [22] 李杨,仲波,陈冬明,等.不同浓度和多样性的根系分泌物对土壤团聚体稳定性的影响[J].应用与环境生物学报,2019,25(5):1061-1067.
- Li Y, Zhong B, Chen D M, et al. Effects of root exudates of different carbon concentrations and sources on soil aggregate stability[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental, 2019,25(5):1061-1067.
- [23] Atere C T, Gunina A, Zhu Z, et al. Organic matter stabilization in aggregates and density fractions in paddy soil depending on long-term fertilization; Tracing of pathways by C-13 natural abundance[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2020,149(3):107931.
- [24] 张斌,张福韬,陈曦,等.土壤有机质周转过程及其矿物和团聚体物理调控机制[J].土壤与作物,2022,11(3):235-247.
- Zhang B, Zhang F T, Chen X, et al. Soil organic matter turnover and controlling mechanisms of mineralogy and aggregation; new insights[J]. Soils and Crops, 2022,22(3):235-247.
- [25] 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.
- Jiang M, Liu Y, Liu C, et al. Study on the stability and fractal characteristics of soil aggregates under different land use patterns in the Danjiangkou Reservoir [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(6):265-270.