

冻融循环次数和土壤含水率对油松林土壤团聚体及有效态微量元素的影响

姚珂涵, 肖列, 李鹏, 高扬

(西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048)

摘要: 以王茂沟流域典型人工油松林土壤为对象,研究了不同冻融循环次数(0,3,9 次)和不同土壤含水率(40%FC,60%FC,80%FC)条件下土壤团聚体组成和团聚体中 4 种有效态微量元素(Cu、Fe、Mn、Zn)的演变特征。结果表明:冻融循环次数增加显著增加了<0.25 mm 粒径团聚体比例($P<0.01$),降低了>2 mm 粒径团聚体比例($P<0.01$),从而导致团聚体平均重量直径(MWD)显著降低($P<0.01$);土壤含水率增加显著降低了<0.25 mm 粒径团聚体比例($P<0.01$),增加了 0.25~2、>2 mm 粒径团聚体的比例,团聚体 MWD 值显著增加($P<0.01$)。土壤含水率增加对土壤颗粒的团聚作用显著大于冻融循环作用对土壤团聚体的破坏作用。冻融循环作用降低了<0.25 mm 粒径团聚体中有效态 Cu 和 Fe 的总量,增加了 Mn 和 Zn 的总量,同时增加了在>2 mm 粒径团聚体中 4 种有效态元素的总量。土壤含水率增加降低了<0.25 mm 粒径团聚体中 4 种有效态微量元素的总量,而在>2 mm 粒径团聚体中其总量显著增加。土壤含水率升高能够抵消冻融循环次数增加对土壤团聚体的破坏作用,冻融循环作用和土壤含水率增加的协同作用提高了>2 mm 粒径团聚体有效态微量元素的含量。

关键词: 冻融循环; 含水率; 团聚体; 有效态微量元素

中图分类号: S175.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2020)03-0259-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.03.039

Effects of Freeze-thaw Cycle Times and Soil Moisture Content on Soil Aggregates and Available Trace Elements in Chinese Pine Forest Soil

YAO Kehan, XIAO Lie, LI Peng, GAO Yang

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

Abstract: The present research evaluated the effects of the frequency of freeze-thaw cycles (FTC) (0, 3, and 9 times) and initial soil water content (WC) (40%, 60%, and 80% field capacity) on soil aggregate distribution and four aggregate associated available trace elements (Cu, Fe, Mn, Zn) in a typical Chinese pine forest soil in the Wangmaogou watershed. The results showed that FTC significantly increased the proportion of aggregates < 0.25 mm ($P<0.01$), decreased the proportion of aggregates >2 mm ($P<0.01$), thus significantly decreased the mean weight diameter (MWD) ($P<0.01$). Increased soil WC significantly decreased the proportion of aggregates <0.25 mm, increased the proportion of aggregates 0.25~2 mm and >2 mm, thus increased MWD. The increased effects of soil WC on MWD were much larger than the disruptive effects under FTC conditions. FTC significantly decreased the total amount of available Cu and Fe, and increased the total amount of Mn and Zn in < 0.25 mm aggregates. The total amount of the four available trace elements in>2 mm aggregates were significantly increased after FTC. Increased soil WC decreased the available trace elements content in <0.25 mm aggregates and increased in the >2 mm aggregates. The increased soil WC could offset the disruptive effects of FTC on soil aggregation, and FTC and the increase soil WC synergistically improved the available tract elements contents in >2 mm aggregate fractions.

Keywords: freeze-thaw cycle; soil water content; aggregate; available trace elements

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,在土壤抗侵蚀性能、水分、养分及微量元素的保持方面发挥着重要作用^[1-2]。全球中高纬度和高海拔地区普遍存在季节性冻融循环过程^[3-4],显著改变了区域土壤结构和团聚

体稳定性,而土壤团聚作用有助于土壤抵抗侵蚀性、养分周转或土壤水分的输送。近年来,随着温室气体的大量排放,冬季温度升高导致区域冻融循环过程发生了明显变化,持续的全球变暖预计将增加土壤冻融循环过程和土壤初始含水率,这将对土壤结构造成影响^[5]。因此,系统研究季节性冻融循环作用对土壤团聚体稳定性及微量元素的含量特征^[6-7],对于深入认识未来全球气候变化对陆地生态系统的影响具有重要意义。

冻融循环过程是一个能量输入和输出的过程,会显著改变土壤颗粒之间的排列方式和黏结程度,进而导致土壤结构的改变^[8]。大量研究表明,冻融循环作用导致土壤团聚结构的破坏,降低了团聚体稳定性^[9-10],但也有研究发现,季节性冻融循环作用增加了土壤团聚体稳定性^[6-7]。这可能是由于不同研究设定的冻融循环条件(冻融循环温度、冻融次数、土壤初始含水率等)、土壤质地以及团聚体筛分方法不同所导致的。研究^[11]表明,冻融期土壤初始含水率是影响冻融循环作用对团聚体稳定性的重要因素。因此,深入分析全球变暖情境下,不同土壤初始含水率条件下冻融循环作用对土壤团聚体的影响机制具有重要意义。

土壤团聚体的形成和稳定对土壤中微量营养元素的保持和转化具有重要作用。土壤微量元素,如铜、铁、锰、锌等是土壤酶、生长激素、维生素以及维持植物生长的重要组成部分^[12],是表征土壤质量的重要因子。土壤中微量元素的缺乏和不足会显著影响植被的生长和发育^[13]。土壤中微量元素的分布和转化越来越受到众多科研工作者^[14-16]的关注。土壤水分和温度是影响土壤微量元素的分布和有效性重要因素^[17]。季节性冻融循环作用通过对土壤物理化学及生物性质的影响,如对土壤水分、土壤温度和土壤酶活性等的影响,显著改变了土壤团聚体中微量元素吸附解吸过程及赋存特征。孙亚乔等^[18]研究发现,随着冻融循环次数的增加;煤矸石中可利用态 Cu 的比例逐渐增加;王梦露等^[19]研究表明,冻融循环作用降低了不同粒径团聚体交换态 Cd 含量,促进了 Cd 在 >2 mm 粒径团聚体中的富集;王洋等^[20]研究发现,随着冻融循环次数的增加,元素 Zn 的交换态含量呈降低趋势。然而,目前对于冻融循环作用及土壤初始含水率的改变对土壤不同粒径团聚体中有效态微量元素含量的分布特征还鲜有报道。深入研究冻融循环作用下土壤团聚体有效态微量元素分布特征,对于揭示冬季季节性冻融循环作用下土壤有效态元素的循环转化规律,促进植被生产力的提高具有重要意义。

黄土丘陵区地处中纬度带,存在明显的季节性冻融循环现象^[21-22]。该区水土流失严重,生态环境十分

脆弱,国家实施大规模的退耕还林草工程来改善该区域的生态环境。种植人工油松林是改良土壤结构,促进生态恢复的一种重要植被恢复方式。本研究以黄土丘陵区典型人工油松林为研究对象,系统研究了冻融循环次数和初始含水率变化对土壤团聚体稳定性及团聚体中有效态微量元素 Cu、Fe、Mn 和 Zn 含量的影响。研究结果可为评价未来气候变化条件下季节性冻融循环区微量元素含量及转化提供科学依据。

1 研究区域及研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省绥德县以北 5 km 的王茂沟流域($37^{\circ}34'13''-37^{\circ}36'03''\text{N}$, $110^{\circ}20'26''-110^{\circ}22'46''\text{E}$)。该流域面积 5.97 km²,属于大陆性季风气候,年平均降水量为 513 mm,大部分降水出现在 7—9 月。流域的海拔为 940~1 200 m。土壤类型为黄绵土,土壤田间持水量和凋萎系数分别为 20% 和 4%^[23]。该地区多年平均温度为 10.2℃,其最高记录温度为 39℃(7 月),最低记录温度为 -27℃(1 月)。该地区存在明显的季节性冻融循环过程,冻融循环过程一般发生在每年的 10 月至翌年 4 月,尤其在 11,2,3 月最为显著^[24]。

王茂沟流域是新中国成立后最早接受治理的试验流域之一,也是位于黄河中游一条具有代表性的典型流域。为有效控制水土流失,改善区域生态环境,大量坡耕地退耕转为种植人工油松林^[25]。本研究选取该流域内的典型人工油松林样地为研究对象进行研究。

1.2 试验设计

于 2018 年 10 月初(季节性冻融循环前)用铝制饭盒在王茂沟流域采集表层 0—20 cm 的原状土样品,将新鲜土壤样品过 8 mm 的筛子,以去除土壤中的根系、枯落物等杂质。将过筛后的土壤样品按野外实测容重(1.16 g/cm³)重新填到铝制饭盒内。

于 2018 年 11 月 16 日至 12 月 28 日在西北水资源与环境生态教育部重点实验室雨洪侵蚀大厅进行测试试验。分别设置 40% 的田间持水量 40%FC(8%)、60%FC(12%)和 80%FC(16%)3 个土壤含水量水平;冻融循环次数分别设定为 0,3,9 次;共计 9 个处理,每个处理做 3 个重复。鉴于研究区 2000—2015 年冬季平均最低温度为 -13.2℃^[26],因此设定室内模拟试验土壤冻结温度为 -15℃,冻结 24 h,之后在 10℃ 的温度下融冻 24 h,记为 1 次冻融循环过程。

1.3 土壤团聚体分级和有效态微量元素含量测定

冻融循环结束后,进行土壤团聚体的分级。将土壤样品冻干,然后采用干筛法^[27]来分离不同粒径的团聚体($<0.25, 0.25\sim 2, >2$ mm),采用干筛的原因是该方法对土壤有效态微量元素的影响较小,更有利于分析土壤团聚体中微量元素含量。

不同粒径团聚体中有效态微量元素的测定:采用二乙烯三胺五乙酸(DTPA)浸提风干土样,在室温下振荡 1.5 h,过滤后,用原子吸收分光光度计(GBC932AA)在不同波长下(324.8, 248.3, 213.9, 279.5 nm)分别测得土壤有效铜、有效铁、有效锰及有效锌的吸光度。

1.4 数据处理与计算

土壤团聚体稳定性采用团聚体平均重量直径(MWD)^[28]来表征。其计算公式为:

$$W_i = \frac{W_1}{W_2} \times 100\%$$
 (1)

$$MWD = \sum_{i=1}^n (X_i \times W_i)$$
 (2)

土壤有效态微量元素总量计算公式为:

$$G_i = C_i \times W_i$$
 (3)

式中:W₁为该粒径团聚体烘干的重量(g);W₂为烘干土样的重量(g);X_i为某级团聚体的平均直径(mm);W_i为*i* 粒径团聚体重量所占的比例(%);G_i为不同团聚体中微量元素总量(μg);C_i为不同团聚体中微量元素含量(μg/g)。

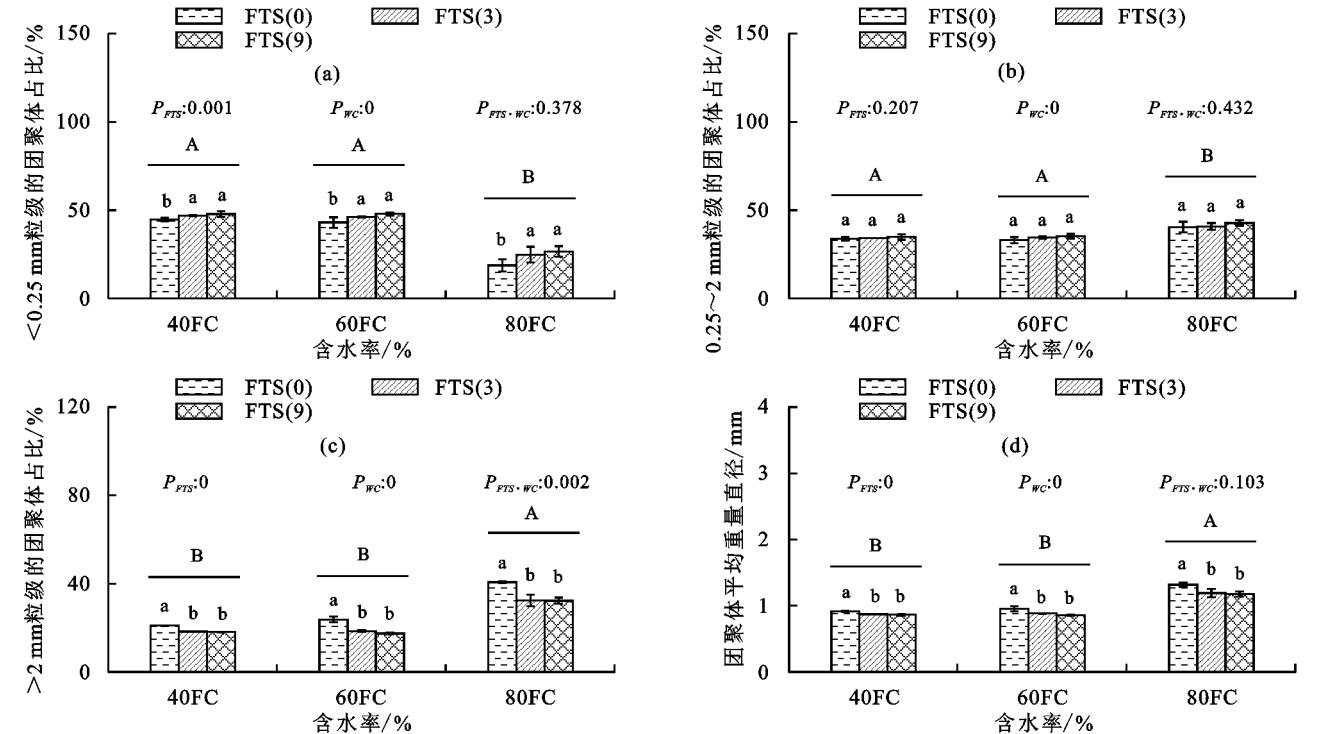
采用 Excle 2010 和 SPSS 22.0 进行数据处理与分析,采用单因素方差分析(One-way ANOVA),用

最小显著性差异法(LSD)分析冻融循环次数和土壤初始含水率对团聚体粒径、团聚体 MWD 以及有效态微量元素含量和总量的影响。采用双因素方差分析(Two-way ANOVA)测定冻融循环次数、土壤含水率以及二者交互作用对以上指标的影响。采用 Origin 2018 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 冻融循环次数和土壤含水率对团聚体组成和稳定性的影响

冻融循环次数和土壤含水率对>2, <0.25 mm 粒径团聚体及团聚体 MWD 有显著影响(*P*<0.01),而 0.25~2 mm 粒径团聚体仅受土壤含水率的显著影响(*P*<0.01)。在相同含水率条件下,随着冻融循环次数的增加,>2 mm 粒径团聚体比例显著减少,而<0.25 mm 粒径团聚体比例显著增加,从而导致 MWD 值显著降低(图 1)。土壤含水率的增加,尤其是当含水率增加至 80%FC 时,显著提高 0.25~2, >2 mm 粒径团聚体的比例,降低<0.25 mm 粒径团聚体比例,团聚体 MWD 值显著增大。土壤含水率提高对土壤颗粒的团聚作用大于冻融循环作用对土壤团聚体的破坏作用。



注:FTS 为冻融循环次数;WC 为土壤含水率;图柱上方不同小写字母表示在相同含水率、不同冻融循环次数处理间具有显著差异(*P*<0.05);不同大写字母表示不同含水率处理间具有显著差异(*P*<0.05)。下同。

图 1 冻融循环次数和土壤含水率对团聚体粒径和团聚体平均重量直径的影响

2.2 冻融循环次数和土壤含水率对不同粒径团聚体中元素有效态含量的影响

冻融循环次数和土壤含水率及其交互作用对<0.25 mm 粒径团聚体中有效态 Cu 含量有极显著影

响(*P*<0.01)(图 2),在同一含水率条件下,随着冻融循环次数的增加,有效态 Cu 含量均呈显著下降趋势,同一冻融循环次数条件下,随含水率增加其含量呈显著增加趋势。冻融循环次数及其与土壤含水率的交互作用

均对 >2 mm 粒径团聚体中有效态 Cu 含量有显著影响($P<0.05$),具体表现为同一含水率条件下,其含量随冻融循环次数的增加呈增加趋势,同一冻融循环次数条件下,其含量随含水率的增加而显著增加。

冻融循环次数与土壤含水率的交互作用对 <0.25 mm 粒径团聚体有效态 Fe 含量有显著影响($P<0.05$) (图 3),同一含水率条件下,有效态 Fe 的含量随冻融循环次数的增加呈降低趋势。冻融循环次数及其与含水率的交互作用均对 >2 mm 粒径团聚体有显著影响($P<0.05$),同一含水率条件下,有效态 Fe 的含量随冻融循环次数的增加而升高,同一冻融循环次数条件下,其含量随着含水率的增加而显著增加。

冻融循环次数及其与土壤含水率的交互作用对 <0.25 mm 粒径和 >2 mm 粒径团聚体中有效态 Mn 含量均有显著影响($P<0.05$) (图 4),相同之处在于,冻融

循环次数与含水率同时增加的条件,其含量在 2 种粒径团聚体中均表现为逐渐增加的趋势;不同之处在于,对 <0.25 mm 粒径团聚体,同一含水率条件下,随着冻融循环次数的增加有效态 Mn 含量呈降低趋势,而在 >2 mm 粒径团聚体中,其含量呈显著增加趋势。冻融循环次数对 $0.25\sim2$ mm 粒径团聚体中有效态 Mn 的含量也有显著影响($P<0.05$),具体表现为同一含水率条件下,随着冻融循环次数的增加其含量呈显著增加的趋势。

冻融循环次数对 <0.25 mm 粒径和 >2 mm 粒径团聚体中有效态 Zn 含量均有显著影响($P<0.05$) (图 5),且变化趋势相同,均表现为同一含水率条件下,随冻融循环次数的增加呈显著增加趋势。此外,含水率对 <0.25 mm 粒径团聚体中有效态 Zn 的含量也有显著影响($P<0.05$),同一冻融循环次数条件下,随含水率的增加其含量呈显著增加趋势。

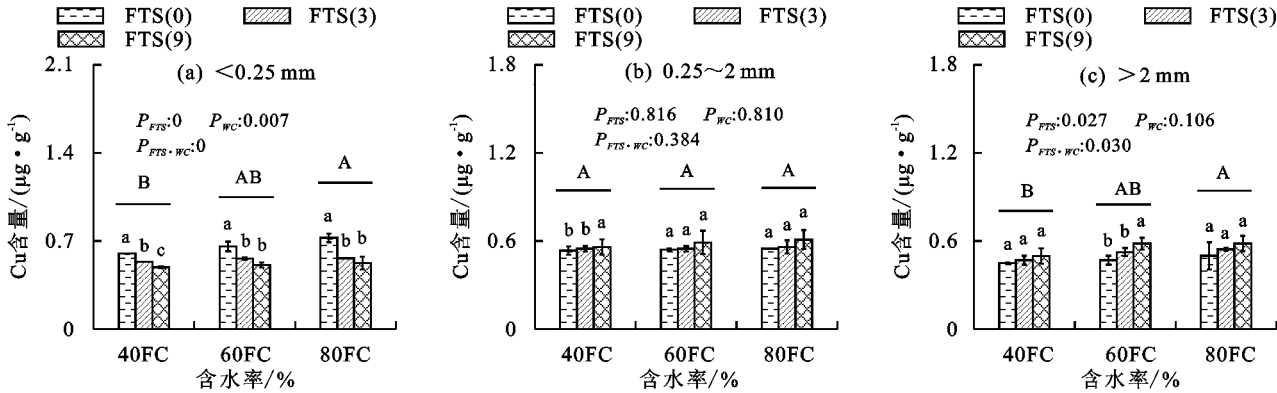


图 2 不同粒径团聚体中有效态 Cu 含量

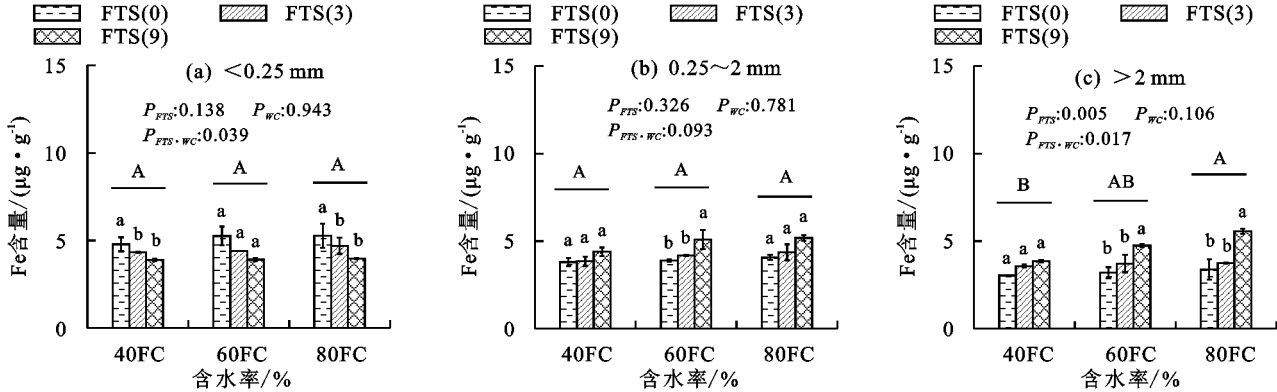


图 3 不同粒径团聚体中有效态 Fe 含量

2.3 冻融循环次数和土壤含水率对不同粒径团聚体中有效态元素总量的影响

冻融循环次数和土壤含水率对 <0.25 mm 粒径和 >2 mm 粒径团聚体中有效态 Cu 的总量均有显著影响($P<0.05$) (图 6)。相同之处在于,在同一含水率下,随着冻融循环次数的增加,有效态 Cu 的总量均表现为降低的趋势;不同之处在于,在同一冻融循环次数条件下,与 40%FC 和 60%FC 相比,80%FC 条件下 <0.25 mm 粒径团聚体中有效态 Cu 总量显著降低,而 >2 mm 粒径团聚体中其总量显著增加。此

外,土壤含水率对 $0.25\sim2$ mm 粒径团聚体中有效态 Cu 的总量有极显著影响($P<0.01$),在土壤含水率为 60%FC 条件下,随着冻融循环次数增加其总量显著上升;同一冻融循环次数条件下,有效态 Cu 的总量随含水率的增加也呈显著增加趋势。

土壤含水率对 <0.25 mm 粒径和 >2 mm 粒径团聚体中有效态 Fe 的总量均有极显著影响($P<0.01$) (图 7)。在同一冻融循环次数条件下,与 40%FC、60%FC 相比,80%FC 条件下 <0.25 mm 粒径团聚体中有效态 Fe 总量显著降低,而 >2 mm 粒径团聚体中有效态 Fe 总量显著

增加。对于 0.25~2 mm 粒径的团聚体,与 40%FC、60% FC 相比,80%FC 条件下有效态 Fe 总量也呈增加趋势。

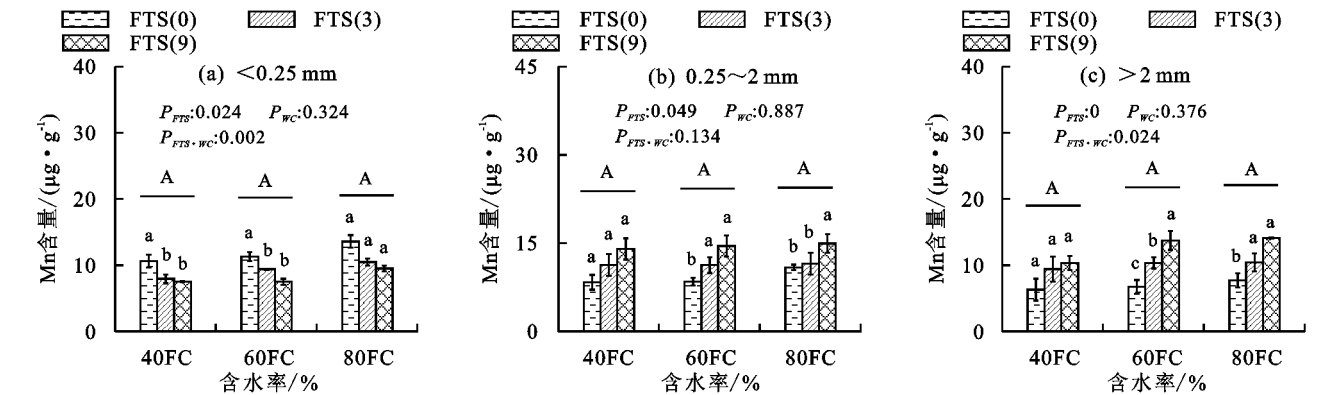


图4 不同粒径团聚体中有效态 Mn 含量

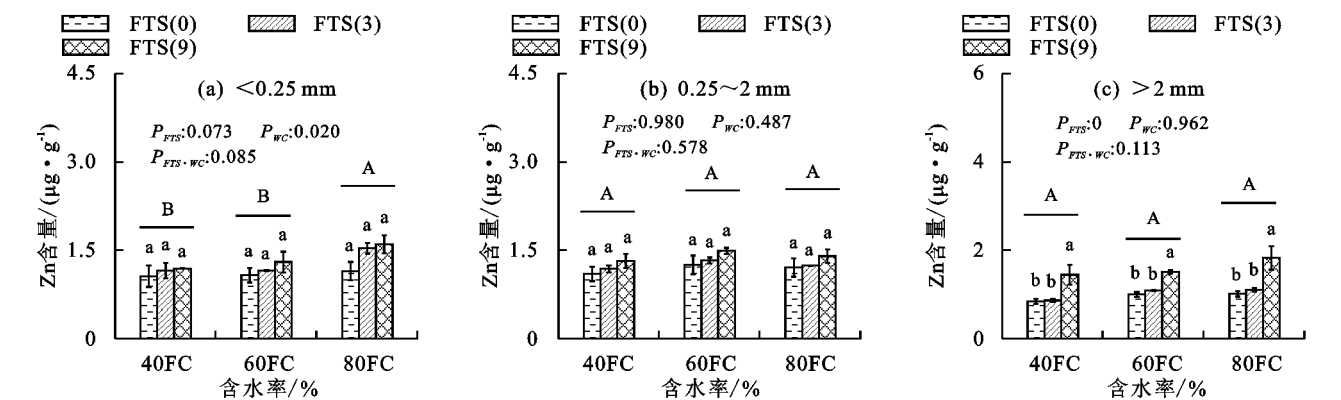


图5 不同粒径团聚体中有效态 Zn 含量

冻融循环次数与土壤含水率及二者的交互作用对于 $<0.25 \text{ mm}$ 粒径和 $>2 \text{ mm}$ 粒径团聚体中有效态 Mn 的总量均有显著影响($P<0.05$)(图 8),在同一含水率条件下,随冻融循环次数的增加,2 种粒径团聚体中有效态 Mn 的含量均呈增加趋势;在同一冻融循环次数条件下,与 40%FC、60%FC 相比,80%FC 条件下 $<0.25 \text{ mm}$ 粒径团聚体中有效态 Mn 总量显著降低,而 $>2 \text{ mm}$ 粒径团聚体中有效态 Mn 总量显著增加。此外,土壤含水率对 $0.25 \sim 2 \text{ mm}$ 粒径团聚体中有效态 Mn 总量有极

显著影响($P<0.01$),同一含水率条件下,其总量随冻融循环次数的增加而显著增加。

冻融循环次数和土壤含水率对 $<0.25, >2 \text{ mm}$ 粒径团聚体中有效态 Zn 的总量有显著影响($P<0.05$)(图 9),且在 2 种粒径团聚体中有效态 Zn 总量的变化趋势与有效态 Mn 的变化趋势相同。另外,土壤含水率对 $0.25 \sim 2 \text{ mm}$ 粒径团聚体中有效态 Zn 总量也有显著影响($P<0.05$),表现为在同一含水率条件下,其总量随冻融循环次数的增加而增加。

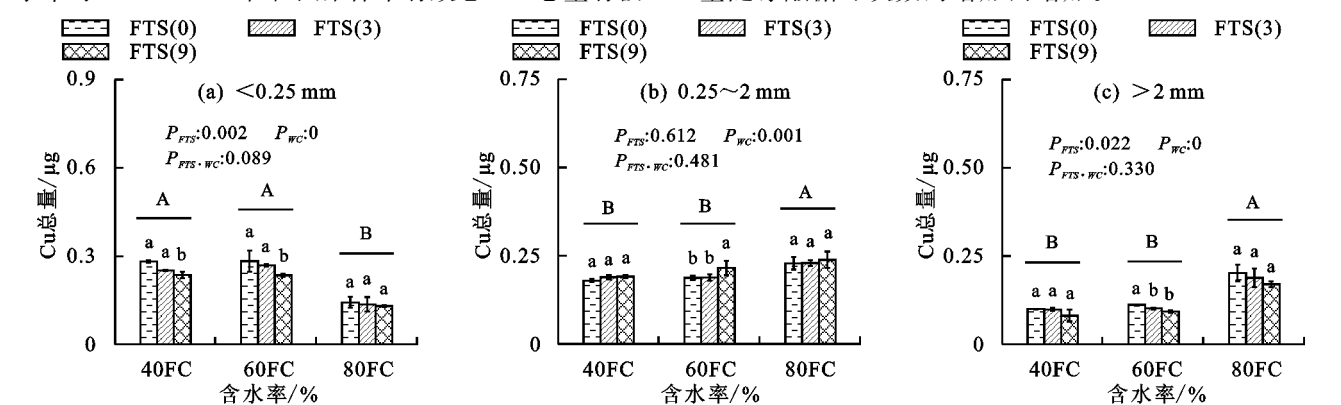


图6 不同粒径团聚体中有效态 Cu 总量

3 讨论

3.1 冻融循环次数和土壤含水率对团聚体稳定性的影响

土壤团聚体稳定性通常用来指示土壤的抗侵蚀

能力^[28]。植被恢复是改善土壤结构,减少土壤侵蚀的重要方式^[29-30]。而在中高纬度和高海拔地区普遍存在的季节性冻融循环过程会显著影响土壤团聚体稳定性。本研究结果表明,冻融循环作用增加了油松

林土壤 $<0.25\text{ mm}$ 粒径团聚体比例,降低了 $>2\text{ mm}$ 粒径团聚体比例,从而导致团聚体 MWD 值的降低。这与王梦露等^[19]对棕壤和姜鑫等^[6]对暗棕壤土壤团聚体稳定性对冻融循环作用响应研究的结果相一致。

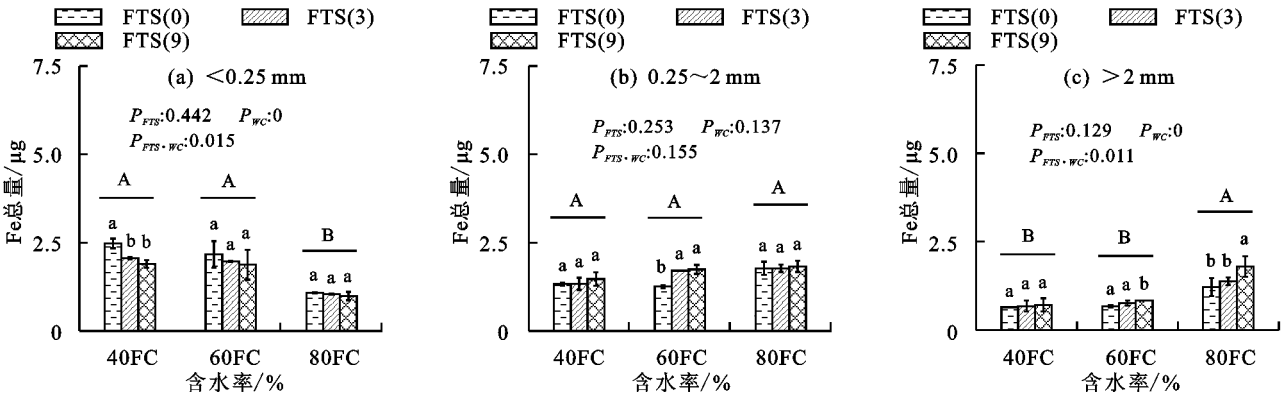


图 7 不同粒径团聚体中有效态 Fe 总量

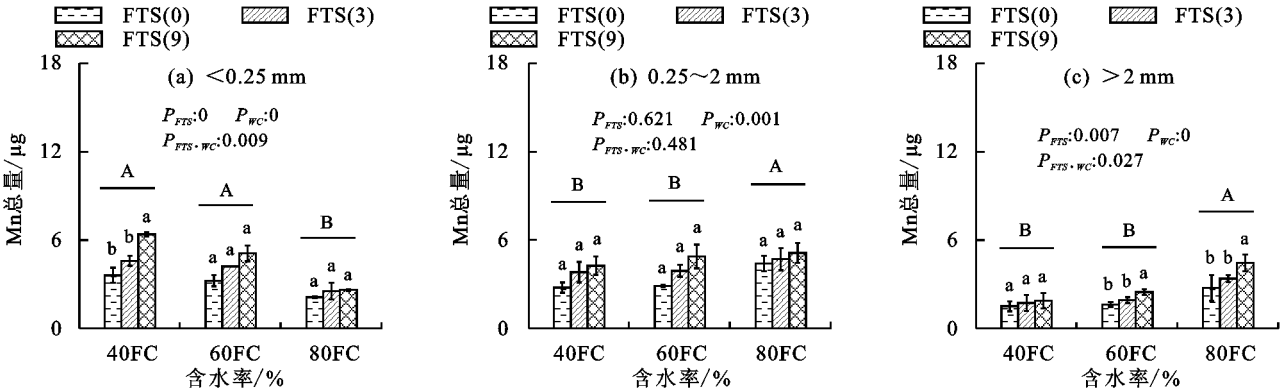


图 8 不同粒径团聚体中有效态 Mn 总量

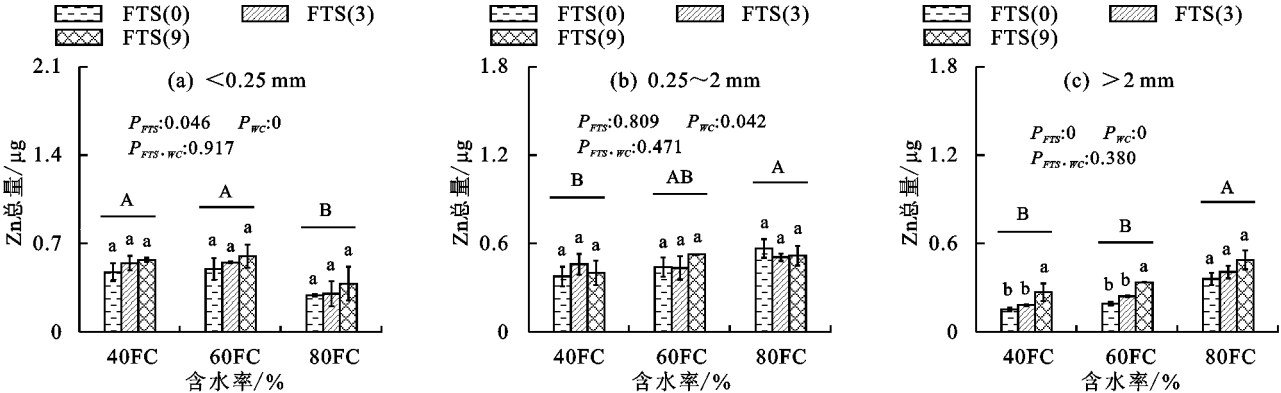


图 9 不同粒径团聚体中有效态 Zn 总量

土壤初始含水率是影响冻融作用下土壤团聚体稳定性的重要因素^[31]。本研究结果表明,土壤初始含水率升高增加了团聚体 MWD 值,这种增加趋势在含水率 80%FC 条件下达到显著水平。土壤高含水率条件下,土壤团聚体 MWD 值的增加可能与土壤水分对土壤颗粒黏结和团聚作用相关^[11,31],而冻融循环作用对土壤团聚体的破坏作用通常在高含水率条件下更显著^[9]。王展等^[32]对棕壤微团聚体特征对冻融作用研究结果表明,随着土壤初始含水率的增加团聚体 MWD 值呈先增大后减小的趋势;王凤等^[33]研究了冻融循环过程中黑土团聚体稳定性的变化特征,结果也表明与该结论相一致。造成这一现象

的主要原因可能是在适宜土壤含水率条件下,水分团聚效应大于破碎效应;当含水率过高或过低时,团聚效应小于破碎效应,促使团聚体的稳定性增强。本研究结果表明,土壤初始含水率升高对土壤颗粒的团聚作用大于冻融循环作用对土壤团聚体的破坏作用。在未来全球气候变暖条件下,土壤含水率的增加能够抵消冻融循环次数增加对土壤团聚体稳定性的破坏作用,甚至提高土壤团聚体稳定性。

3.2 冻融循环次数及土壤含水率对土壤有效态微量元素的影响

土壤团聚体是土壤颗粒主要的存在形式,不同粒径团聚体颗粒组成、比表面积、有机质含量和土壤性

质等因素导致团聚体中的元素分布存在很大差异^[34]。有研究^[35-36]表明,金属元素呈现出在大团聚体中亏缺而小团聚体中富集的现象,主要原因是小粒径团聚体的比表面积更大,对于重金属元素的吸附位点更多,对重金属元素的亲和力更高。也有研究^[37]表明,重金属元素的富集随团聚体粒径的增加而增加,这可能是由于新进入土壤中的重金属元素更容易被大颗粒团聚体吸附,且含重金属元素的小团聚体在一定条件下会合成大粒径团聚体。冻融循环作用导致土壤中金属离子随着水分的重新分布而在土壤中发生迁移,王梦露等^[19]研究表明,冻融作用促进了重金属 Cd 在>2 mm 粒径团聚体中的富集。本研究结果表明,冻融循环作用导致<0.25 mm 粒径团聚体中有效态 Cu 和 Fe 的总量呈下降趋势,有效态微量 Mn 和 Zn 的总量呈上升趋势,>2 mm 粒径团聚体中 4 种有效态微量元素含量均呈上升趋势。

土壤含水率对团聚体微量元素的分布有重要影响^[38]。本研究结果表明,土壤含水率升高导致 4 种有效态微量元素总量在<0.25 mm 粒径团聚体中显著降低,在>2 mm 粒径团聚体中显著增加,土壤初始含水率的升高显著促进了土壤颗粒的团聚作用。土壤在团聚过程中,小粒径团聚体比较大的比表面积和较多的负电荷促使有效态微量元素被包裹起来,而导致形成的大粒径团聚体中有效态微量元素的总量较高。在未来,气温升高引起的季节性冻融循环次数增加和土壤初始含水率升高,导致土壤中的有效态微量元素将更多的转移到大粒径团聚体中。此外,Zhang 等^[39]和 Huang 等^[40]对不同粒径团聚体中微量元素的积累与分布研究发现,土壤团聚体的理化性质是影响有效态金属元素分布的重要因素。因此,应加强对黄土区不同植被类型土壤团聚体有效态微量元素的分布特征对冻融循环作用响应特征的研究。本研究是基于室内模拟条件下进行的,所得出的结论可能具有一定的局限性,今后应进一步加强在原位条件下,土壤有效态微量元素与团聚体结合特征对冻融循环作用响应机理的研究。

4 结 论

冻融循环作用增加了<0.25 mm 粒径团聚体比例,降低了>2 mm 粒径团聚体比例,导致团聚体 MWD 值的降低。而土壤初始含水率升高显著促进了土壤的团聚作用,导致团聚体 MWD 值增加。冻融循环次数的增加导致<0.25 mm 粒径团聚体中微量元素 Cu 和 Fe 的有效态总量呈减少趋势,Mn 和 Zn 有效态总量呈上升趋势,>2 mm 粒径团聚体中 4 种元素总量均呈升高趋势。

初始含水率的升高显著提高了>2 mm 粒径团聚体中 4 种有效态元素的总量。土壤初始含水率升高能够抵消冻融循环作用对土壤团聚体的破坏作用,冻融循环作用和土壤含水率升高促进了土壤有效态微量元素向>2 mm 粒径团聚体的转移。

参考文献:

[1] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: a review[J].*Geoderma*,2005,124(1/2):1-22.

[2] 陈山,杨峰,林杉,等.土地利用方式对红壤团聚体稳定性的影响[J].*水土保持学报*,2012,26(5):211-216.

[3] Grogan P, Michelsen A, Ambus P, et al. Freeze-thaw regime effects on carbon and nitrogen dynamics in sub-arctic heath tundra mesocosms[J].*Soil Biology and Biochemistry*,2004,36(4):641-654.

[4] Song Y, Zou Y C, Wang G P, et al. Altered soil carbon and nitrogen cycles due to the freeze-thaw effect: A meta-analysis[J].*Soil Biology and Biochemistry*,2017,109:35-49.

[5] Netz B, Davidson O R, Bosch P R, et al. Climate change 2007: Mitigation contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Summary for policymakers[J].*Computational Geometry*,2007,18(2):95-123.

[6] 娄鑫,谷岩,张军辉,等.冬季积雪与冻融对土壤团聚体稳定性的影响[J].*北京林业大学学报*,2016,38(4):63-70.

[7] 李杨波,刘楠,韩进斌,等.冻融循环对五台山典型植被土壤微团聚体的影响[J].*水土保持通报*,2018,38(5):21-27.

[8] Zhang Z, Ma W, Feng W J, et al. Reconstruction of soil particle composition during freeze-thaw cycling: A review[J].*Pedosphere*,2016,26(2):167-179.

[9] Song Y, Zou Y C, Wang G P, et al. Stimulation of nitrogen turnover due to nutrients release from aggregates affected by freeze-thaw in wetland soils[J].*Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*,2017,97:3-11.

[10] Dagesse D F. Effect of freeze-drying on soil aggregate stability[J].*Soil Science Society of America Journal*,2011,75(6):2111-2121.

[11] Li G Y, Fan H M. Effect of freeze-thaw on water stability of aggregates in a black soil of Northeast China [J].*Pedosphere*,2014,24(2):285-290.

[12] Tao S, Chen Y J, Xu F L, et al. Changes of copper speciation in maize rhizosphere soil[J].*Environmental Pollution*,2003,122(3):447-454.

[13] Farooq M, Wahid A, Siddique K H M. Micronutrient application through seed treatments: A review[J].*Journal of Soil Science and Plant Nutrition*,2012,12:125-142.

[14] Hartley W, Riby P, Waterson J. Effects of three different biochars on aggregate stability, organic carbon mobility and micronutrient bioavailability[J].*Journal of*

- Environmental Management, 2016, 181: 770-778.
- [15] Wang R, Dungait J A J, Buss H L, et al. Base cations and micronutrients in soil aggregates as affected by enhanced nitrogen and water inputs in a semi-arid steppe grassland[J]. Science of The Total Environment, 2017, 575: 564-572.
- [16] Puniya R, Pandey P C, Bisht P S, et al. Effect of long-term nutrient management practices on soil micronutrient concentrations and uptake under a rice-wheat cropping system[J]. Journal of Agriculture Science, 2019, 157: 226-234.
- [17] Najafi-Ghiri M, Ghasemi-Fasaei R, Farrokhnejad E. Factors affecting micronutrient availability in calcareous soils of Southern Iran[J]. Arid Land Research and Management, 2013, 27(3): 203-215.
- [18] 孙亚乔, 王旭东, 段磊, 等. 冻融作用下煤矸石重金属释放特性及潜在生态风险评价[J]. 环境工程, 2018, 36(11): 157-162.
- [19] 王梦露, 王风, 许堃, 等. 冻融作用对棕壤团聚体及其重金属赋存形态的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(4): 298-303.
- [20] 王洋, 刘景双, 王国平, 等. 冻融作用对黑土土壤重金属 Zn 形态转化的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(6): 206-210.
- [21] Xiao L, Zhang Y, Li P, et al. Effects of freeze-thaw cycles on aggregate-associated organic carbon and glomalin-related soil protein in natural-succession grassland and Chinese pine forest on the Loess Plateau[J]. Geoderma, 2019, 334: 1-8.
- [22] 李强, 刘国彬, 许明祥, 等. 黄土丘陵区冻融对土壤抗冲性及相关物理性质的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 105-112.
- [23] Xiao L, Liu G B, Xue S. Elevated CO₂ concentration and drought stress exert opposite effects on plant biomass, nitrogen, and phosphorus allocation in *Bothriochloa ischaemum*[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2016, 35: 1088-1097.
- [24] 陈磊, 朱广宇, 刘玉林, 等. 黄土高原人工油松林土壤谈单对短期氮添加的响应[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 348-354.
- [25] Xiao L, Liu G B, Zhang J Y, et al. Long-term effects of vegetational restoration on soil microbial communities on the Loess Plateau of China[J]. Restoration Ecology, 2016, 24(6): 794-804.
- [26] Li Z B, Geng Z, Li P, et al. Soil organic matter and glomalin-related soil protein contents do not explain soil aggregate stability after freeze-thaw cycles at contrasting soil moisture contents[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2019. DOI: 2019. 10. 1080/03650340.2019.1676891.
- [27] Zhang X K, Wu X, Zhang S X, et al. Organic amendment effects on aggregate-associated organic C, microbial biomass C and glomalin in agricultural soils[J]. Catena, 2014, 123: 188-194.
- [28] 杜立宇, 李天来, 梁成华, 等. 长期不同施肥处理对设施土壤团聚体组成及其稳定性的影响[J]. 水土保持通报, 2012, 32(1): 38-41.
- [29] Wang Y X, Ran L S, Fang N F, et al. Aggregate stability and associated organic carbon and nitrogen as affected by soil erosion and vegetation rehabilitation on the Loess Plateau[J]. Catena, 2018, 167: 257-265.
- [30] Zhou H, Peng X, Peth S, et al. Effects of vegetation restoration on soil aggregate microstructure quantified with synchrotron-based micro-computed tomography[J]. Soil and Tillage Research, 2012, 124: 17-23.
- [31] Wang E, Cruse R M, Chen X, et al. Effects of moisture condition and freeze/thaw cycles on surface soil aggregate size distribution and stability[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2012, 92(3): 529-536.
- [32] 王展, 张玉龙, 虞娜, 等. 冻融作用对土壤微团聚体特征及分形维数的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(1): 83-88.
- [33] 王风, 韩晓增, 李良皓, 等. 冻融过程对黑土水稳性团聚体含量影响[J]. 冰川冻土, 2009, 31(5): 915-919.
- [34] 路雨楠, 徐殿斗, 成杭新, 等. 土壤团聚体中重金属富集特征研究进展[J]. 土壤通报, 2016, 45(4): 1008-1013.
- [35] 黄斌. 重金属在稻田土壤中的吸附、富集、迁移特征及稳定化研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- [36] Acosta J A, Martínez-Martínez S, Faz A, et al. Accumulations of major and trace elements in particle size fractions of soils on eight different parent materials[J]. Geoderma, 2011, 161(1/2): 30-42.
- [37] 龚仓, 马玲玲, 成杭新, 等. 典型农耕区黑土和沼泽土团聚体颗粒中重金属的分布特征解析[J]. 生态环境学报, 2012, 21(9): 1635-1639.
- [38] Wang R, Dungait J A J, Buss H L, et al. Base cations and micronutrients in soil aggregates as affected by enhanced nitrogen and water inputs in a semi-arid steppe grassland[J]. Science of the Total Environment, 2017, 575: 564-572.
- [39] Zhang C, Liu G B, Xue S, et al. Rhizosphere characteristic of available trace elements during the succession on abandoned croplands in the Loess Plateau China[J]. Soil Science, 2012, 177(10): 619-627.
- [40] Huang B, Li Z N, Li D Q, et al. Distribution characteristics of heavy metal(loid)s in aggregates of different size fractions along contaminated paddy soil profile[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24: 23939-23952.