

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.6

第40卷 第6期

目 次

北京城区大气金属元素干湿沉降特征	张国忠, 潘月鹏, 田世丽, 王永宏, 熊秋林, 李广, 顾梦娜, 吕雪梅, 倪雪, 何月欣, 黄威, 刘博文, 王跃思 (2493)
北京城郊 PM _{2.5} 中金属元素的污染特征及潜在生态风险评价	徐静, 李杏茹, 张兰, 陈曦, 杨阳, 刘永桥, 赵清 (2501)
上海城区二次气溶胶的形成: 光化学氧化与液相反应对二次气溶胶形成的影响	高杰, 乔利平, 楼晟荣, 严茹莎, 周敏, 刘瑜存, 冯加良, 黄丹丹 (2510)
天津市 2017 年重污染过程二次无机化学污染特征分析	徐虹, 肖致美, 陈魁, 李立伟, 杨宁, 高璟赞, 李源, 孔君, 毕温凯, 邓小文 (2519)
典型非金属矿物制造工艺过程源成分谱特征	赵雪艳, 于高峰, 王信梧, 张向炎, 殷宝辉, 刘盈盈, 王歆华, 杨文, 赵若杰 (2526)
垃圾焚烧厂排放颗粒物组分粒径分布特征	余卓君, 吴建会, 张裕芬, 张进生, 冯银厂, 李蒲 (2533)
天津市春季样方法道路扬尘碳组分特征及来源分析	马妍, 姬亚芹, 国纪良, 赵静琦, 李越洋, 王士宝, 张蕾 (2540)
霾天气下城市气溶胶吸湿性的观测	杨素英, 田芷洁, 张铁凝, 于兴娜, 李艳伟, 安俊琳, 赵秀勇, 李岩, 王梓航, 吴尚 (2546)
宁东能源化工基地大气 PM _{2.5} 中硝基多环芳烃污染特征及呼吸暴露风险	刘攀亮, 剧媛丽, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民 (2556)
2014 ~ 2016 年间郑州市控制 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	韩士杰, 王佳, 燕启社, 杨留明, 赵庆炎, 王申博, 李晨, 张轶舜, 张瑞芹 (2565)
1990 ~ 2017 年中国地区气溶胶光学厚度的时空分布及其主要影响类型	刘莹, 林爱文, 覃文敏, 何利杰, 李霄 (2572)
北京春季一次霾-沙天气污染特性与成因分析	王耀庭, 李青春, 郑祚芳, 窦有俊 (2582)
江苏省内河船舶大气污染物排放清单及特征	徐文文, 殷承启, 许雪记, 张玮 (2595)
亚热带稻区大气 NO ₂ 、HNO ₃ 及硝态氮污染特征及干湿沉降	欧阳秀琴, 王波, 沈健林, 朱潇, 王杰飞, 李勇, 吴金水 (2607)
长江源区降水氢氧稳定同位素特征及水汽来源	汪少勇, 王巧丽, 吴锦奎, 何晓波, 丁永建, 王利辉, 胡召富 (2615)
基于高山湖泊沉积记录的贵州北部大气重金属污染历史重建	梁梦瑶, 刘恩峰, 张恩楼, 纪明, 李小林 (2624)
青岛 4 个海水浴场微塑料的分布特征	罗雅丹, 林千惠, 贾芳丽, 徐功娣, 李锋民 (2631)
鄱阳湖湿地候鸟栖息地微塑料污染特征	刘淑丽, 简敏菲, 周隆胤, 李文华, 吴希恩, 饶丹 (2639)
三峡库区消落带土壤溶解性有机质溯源: 基于氮/碳比值的线性双端元源负荷分析	江韬, Joeri Kaal, 梁俭, 刘江, 张耀玲, 王定勇, 魏世强, 赵铮 (2647)
水生生物光合作用对雪玉洞岩溶水体中 CDOM 的影响	范佳鑫, 蒋勇军, 贺秋芳, 王家楠, 何瑞亮, 张彩云, 马丽娜, 汪啟容 (2657)
水化学和环境同位素对济南东源饮用水源地地下水演化过程的指示	张雅, 苏春利, 马燕华, 刘伟江 (2667)
崇左响水地区地下水水质分析及健康风险评价	周巾枚, 蒋忠诚, 徐光黎, 覃小群, 黄奇波, 张连凯 (2675)
云南荞麦地流域地下水水化学特征及物质来源分析	张勇, 郭纯青, 朱彦光, 于爽 (2686)
鄱阳湖流域多尺度 C、N 输送通量及其水质参数变化特征	陆瑶, 高扬, 贾珺杰, 宋贤威, 陈世博, 马明真, 郝卓 (2696)
合流制面源污染传输过程与污染源解析	房金秀, 谢文霞, 朱玉玺, 沈雷, 马玉坤, 李佳, 姜智绘, 李叙勇, 赵洪涛 (2705)
强化浅基质层干植草沟对道路径流的脱氮效果	段进凯, 李田, 张佳炜 (2715)
水源水库暴雨径流过程水体锰的迁移及其影响	邓立凡, 黄廷林, 李楠, 李凯, 吕晓龙, 毛雪静 (2722)
巢湖十五里河沉积物磷吸收潜力及对外源碳的响应	李如忠, 鲍琴, 张瑞钢, 陈慧 (2730)
金盆水库沉积物磷的来源及分布特征	毛雪静, 黄廷林, 李楠, 徐金兰, 苏露, 吕晓龙, 邓立凡 (2738)
水库水体热分层的水质及细菌群落分布特征	王禹冰, 王晓燕, 庞树江, 杨晓明, 刘洋 (2745)
不同水温分层水库沉积物间隙水营养盐垂向分布与细菌群落结构的关系	王慎, 张思思, 许尤, 官卓宇, 杨正健, 刘德富, 马骏 (2753)
表面流人工湿地长期运行后的底泥营养盐累积特征与释放规律	朱伊梦, 姜翠玲, 朱立琴, 杜观超, 高旭, 陈红卫, 李峰东, 张海阔, 张雪, 秦文凯, 李一平 (2764)
针铁矿改性生物炭对砷吸附性能	朱司航, 赵晶晶, 尹英杰, 商建英, 陈冲, 瞿婷 (2773)
改性稻壳生物炭对水溶液中甲基橙的吸附效果与机制	史月月, 单锐, 袁浩然 (2783)
厌氧膜生物反应器处理含盐废水运行效能及膜污染特性	闫欢沙, 许振钰, 金春姬, 邵梦雨, 郭亮, 赵阳国 (2793)
污水处理厂出水有机磷污染特征及强化去除	王小东, 王子文, 陈明飞, 王燕, 王硕, 李激 (2800)
碱度对沸石序批式反应器亚硝化的影响	王瑞鑫, 陈婧, 汪晓军, 胡浩林, Karasuta Chayangkun (2807)
活性污泥物理结构对呼吸过程的影响	郭耀, 李志华, 杨成建, 王慧娟, 李亚明, 姜阳 (2813)
好氧颗粒污泥处理畜禽养殖沼液污染物的特性	廖杰, 叶嘉琦, 曾志超, 刘琳, 徐开钦, 刘超翔 (2821)
快速城市化区河流温室内空气排放的时空特征及驱动因素	刘婷婷, 王晓峰, 袁兴中, 龚小杰, 侯春丽 (2827)
生物炭对潜流人工湿地污染物去除及 NO ₃ -N 排放影响	邓朝仁, 梁银坤, 黄磊, 方丹丹, 陈玉成, 杜刚 (2840)
曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田 N ₂ O 排放的影响及其微生物机制	吴杰, 李志琳, 徐佳迎, 王珏, 蒋静艳 (2847)
不同施氮水平对紫花苜蓿草地土壤呼吸和土壤生化性质的影响	胡伟, 张亚红, 李鹏, 张鹏, 李满友, 尤璟涛, 田水泉 (2858)
典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征与风险评价	何博, 赵慧, 王铁宇, 孟晶, 肖荣波, 刘胜然, 周云桥, 史斌 (2869)
西南高锡地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征	刘意章, 肖唐付, 熊燕, 宁增平, 双燕, 李航, 马良, 陈海燕 (2877)
基于 GIS 和受体模型的枸杞地土壤重金属空间分布特征及来源解析	白一茹, 张兴, 赵云鹏, 王幼奇, 钟艳霞 (2885)
喀斯特地区小尺度农业土壤砷的空间分布及污染评价	汪花, 刘秀明, 刘方, 唐启琳, 王世杰 (2895)
黄土高原不同植被带人工刺槐林土壤团聚体稳定性及其化学计量特征	瞿晴, 徐红伟, 吴旋, 孟敏, 王国梁, 薛蓑 (2904)
秸秆还田配施氮肥对喀斯特农田微生物群落及有机碳矿化的影响	徐学池, 苏以荣, 王桂红, 刘坤平, 胡亚军, 陈香碧, 郑小东, 何寻阳 (2912)
生物炭施用及老化对紫色土中抗生素吸附特征的影响	阴文敏, 关卓, 刘琛, 何杨, 杨飞, 唐翔宇 (2920)
稳定性同位素 DNA-SIP 示踪中性紫色土的氨氧化过程	刘天琳, 王智慧, 闫小娟, 赵永鹏, 贾仲君, 蒋先军 (2930)
纳米银和银离子对土壤中硝化微生物及其氨氧化速率的影响	伍玲丽, 张旭, 舒慧慧, 张丽, 司友斌 (2939)
农田沟道土壤中锰氨氧化 (Mn-ANAMMOX) 过程的探究	陈湜, 李正魁, 覃云斌, 丁帮环, 陈志浩 (2948)
污泥四环素含量对蚯蚓堆肥中氨氧化菌群的影响	吴颖, 黄魁, 夏慧, 陈景阳 (2954)
《环境科学》征订启事 (2929)	《环境科学》征稿简则 (2947)
信息 (2646, 2656, 2857)	

黄土高原不同植被带人工刺槐林土壤团聚体稳定性及其化学计量特征

瞿晴¹, 徐红伟², 吴旋¹, 孟敏¹, 王国梁¹, 薛蕊^{1,2*}

(1. 西北农林科技大学林学院, 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100)

摘要: 为研究黄土高原不同植被带对土壤团聚体稳定性及团聚体化学计量变化特征的影响, 本研究选取黄土高原不同植被带人工刺槐林地土壤为研究对象, 分析了不同粒径团聚体含量, 团聚体化学计量及稳定性指标。结果表明, >2 mm 和 $0.25 \sim 2$ mm 粒径团聚体含量, 机械团聚体的平均重量直径(E_{MWD})和机械团聚体的几何平均直径(E_{CMD})表现为森林带 > 森林草原带 > 草原带, 而 $0.053 \sim 0.25$ mm 粒径团聚体含量和可蚀性因子 K 呈现相反的变化特点; 各粒径团聚体有机碳和全氮含量在 3 个植被带整体表现为森林带显著高于森林草原带和草原带, 而全磷含量在各植被带间无明显变化规律; 有机碳和全氮含量在草原带以 <0.053 mm 和 $0.25 \sim 2$ mm 粒径占绝对优势, 在森林草原带以 $0.053 \sim 0.25$ mm 和 $0.25 \sim 2$ mm 粒径为主, 而森林带各粒径间均无显著差异; 草原带和森林草原带 <0.053 mm 粒径全磷含量最高, 而森林带全磷含量在各粒径间无显著差异; <0.053 mm 和 $0.053 \sim 0.25$ mm 粒径团聚体 C:N 值以草原带和森林草原带高于森林带, 而 $0.25 \sim 2$ mm 和 >2 mm 粒径在 3 个植被带间无显著差异; 各粒径 C:P 和 N:P 值以森林带显著高于森林草原带和草原带。综上所述, 土壤团聚体稳定性和团聚体化学计量在 3 个植被带间存在较大差异, 团聚体稳定性和团聚体有机碳、全氮含量整体表现为森林带显著高于森林草原带和草原带。

关键词: 团聚体稳定性; 纬度梯度; 植被带; 黄土高原

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)06-2904-08 DOI: 10.13227/j.hjlx.201811109

Soil Aggregate Stability and Its Stoichiometric Characteristics in *Robinia pseudoacacia* Forest within Different Vegetation Zones on the Loess Plateau, China

QU Qing¹, XU Hong-wei², WU Xuan¹, MENG Min¹, WANG Guo-liang¹, XUE Sha^{1,2*}

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract: With the aim of studying the effects of different vegetation zones on soil aggregate stability and its stoichiometric characteristics, the soils under *Robinia pseudoacacia* plantations located within different vegetation zones on the Loess Plateau were selected as the research object. Indicators including the content, stoichiometry, and stability of different aggregate fractions were analyzed. The results showed that the content of >2 mm and $0.25 \sim 2$ mm, the mean diameter (E_{MWD}), and the geometric mean diameter (E_{CMD}) of aggregate fractions were in the order of forest zone > forest-steppe zone > grassland zone. However, the stability proxies of aggregate fractions across the three vegetation zones indicated that the content and erodibility (K factor) of $0.053 \sim 0.25$ mm exhibited an opposite trend. The overall trend of the soil organic carbon and total nitrogen of aggregate fractions among the three vegetation zones was that the forest zone significantly overtopped the forest-steppe zone and grassland zone, while the content of total phosphorus showed no significant differences among the three vegetation zones. Additionally, the content of soil organic carbon and total nitrogen of <0.053 mm and $0.25 \sim 2$ mm was the highest among the different fractions in the grassland zone, while that of $0.053 \sim 0.25$ mm and $0.25 \sim 2$ mm was the highest in the forest-steppe zone. In contrast, there were no significant differences in the content of organic carbon and total nitrogen in the forest zone among the different aggregate fractions. The total phosphorus content topped in <0.053 mm fractions in the grassland zone and the forest-steppe zone, while that in the forest zone had no significant differences among the different aggregate fractions. Besides, the C:N ratios of <0.053 mm and $0.053 \sim 0.25$ mm in the steppe zone and the forest-steppe zone were higher than that in the forest zone, while that of $0.25 \sim 2$ mm and >2 mm had insignificant differences among the three vegetation zones. The C:P and N:P ratios of fractions in the forest zone were significantly higher than that in the forest-steppe zone and steppe zone. Overall, the stability and stoichiometry of soil aggregate fractions exhibited relatively significant differences among the three vegetation zones. Additionally, the stability, soil organic carbon, and total nitrogen content of aggregate fractions in the forest zone were generally higher than those in the forest-steppe zone and grassland zone.

Key words: soil aggregate stability; latitude; vegetation zones; Loess Plateau

收稿日期: 2018-11-16; 修订日期: 2018-12-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0501707); 国家自然科学基金项目(41771557); 中国科学院西部青年学者项目(XAB2015A05)

作者简介: 瞿晴(1995~), 女, 硕士, 主要研究方向为土壤生态学, E-mail: ylxnqq@nwfu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: xuesha100@163.com

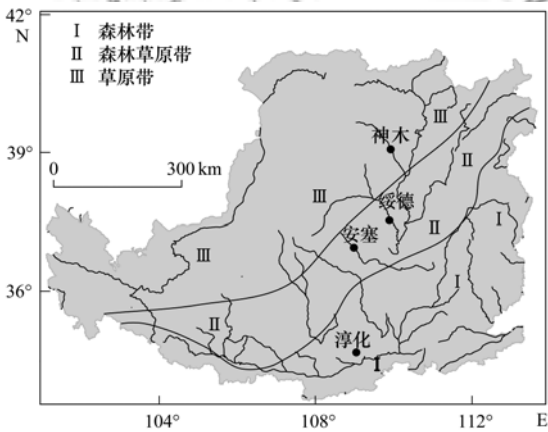
土壤团聚体是由矿物颗粒和有机物等形成的土壤基本单元^[1]，其数量的多少在一定程度上反映了土壤持水性、通透性和供蓄养分等能力的高低^[2]，其组成和稳定性不仅影响着土壤肥力，而且对土壤的物理和化学性状，土壤微生物的活性起重要的作用^[3]，良好的土壤结构依赖于稳定的土壤团聚体^[4]。土壤团聚体稳定性还是土壤抗侵蚀能力的重要指标，团聚体稳定性越强，土壤对抗地表径流和土壤侵蚀的能力越强^[5]。土壤中的碳、氮和磷是构成植物体和促进植物生长的重要元素，对土壤碳、氮和磷等元素的供应、转化和保存能力等方面起着不同的作用^[6, 7]。土壤化学计量揭示了土壤有机碳和养分的分配状况，反映了土壤养分循环状态^[8]。研究不同植被带土壤团聚体稳定性及其对土壤碳氮磷等化学元素转化分配等化学计量特征的影响，具有重要的现实意义。

人工刺槐林是黄土高原主要造林树种之一，在黄土高原植被恢复，生态环境重建以及经济发展中发挥着重要作用^[9]。研究黄土高原不同植被带刺槐林土壤团聚体稳定性及团聚体化学计量特征，对揭示不同植被带间土壤结构差异受何因素影响具有重要意义。土壤团聚体稳定性和团聚体化学计量与土壤的内在理化性质(母质、有机质和微生物)关系密切^[10]，同时也受植被带的影响^[11, 12]。已有研究表明，森林带土壤大团聚体稳定性，土壤有机碳、全氮含量和土壤化学计量比显著高于森林草原带和草原带^[11, 13, 14]。但已有对土壤团聚体稳定性和化学计量的研究主要集中于大团聚体和土壤化学计量，而对于不同植被带微团聚体含量，团聚体稳定性，不同粒径化学计量以及相互关系还认识不足。因此，本文选取黄土高原3个植被带人工刺槐林下的土壤为实验对象，重点研究：①不同植被带土壤团聚体稳定性变化特征；②不同植被带各粒径土壤团聚体化学计量变化特征和差异性分析。通过丰富黄土高原地区乃至全国的土壤团聚体碳、氮、磷化学计量和稳定性特征数据库，以为黄土丘陵区人工刺槐林规划和管理提供一定的指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本文沿黄土高原纬度梯度从南至北选择森林带(淳化县)、森林草原带(安塞县和绥德县)和草原带(神木县)这3个植被带的4个地区(图1)为研究区域(从东南至西北，降雨和温度降低，植被类型具有明显的梯度变化特征，从南向北依次为森林带、森林草原带和草原带^[16])。淳化县位于陕西省中部偏西，东经108°18′~108°50′，北纬34°43′~37°03′，属暖温带大陆性季风气候，海拔630~1 809 m，年均温9.3℃，年降水量610 mm。安塞县位于陕西省北部东经108°5′~109°26′，北纬36°30′~37°19′，属温带大陆性半干旱季风气候，海拔1 013~1 309 m，年均温8.8℃，年降水量505.3 mm。绥德县位于陕西省北部东经110°04′~110°41′，北纬37°16′~37°45′，属温带半干旱大陆性季风气候，海拔608~1 287 m，年均温9.7℃，年降水量486 mm。神木县位于陕西省北部东经109°40′~110°54′，北纬38°13′~39°27′，属温带半干旱大陆性季风气候，海拔738.7~1 448.7 m，年均温8.9℃，年降水量422.7 mm。研究区域地形地貌复杂，主要为黄土丘陵沟壑区，该区的典型特征为高温和干旱。研究区基本情况见表1。



参考并修改自文献[15]

图1 样地地理位置示意

Fig. 1 Location of sample sites on the Loess Plateau, China

表1 研究区基本概况

Table 1 Basic information for the study areas

研究区	地区	坡度/(°)	坡向	乔木平均胸径/cm	乔木平均树高/m	土壤类型
森林带	淳化	36	阳	18.18	6.88	黄绵土
森林草原带	安塞	32	阳	16.34	7.44	黄绵土
	绥德	28	阳	17.39	12.40	黄绵土
草原带	神木	33	阳	15.94	9.28	绵砂土

1.2 土壤样品的采集与分析

土壤样品于2017年9月采集，根据每个研究

区地形和植被特征，在3个研究区选取具有典型性和代表性的样地共20个，每个地区分别设置5个

10 m × 10 m 样地, 样地之间间隔 10 m 以上, 在每个样地用铝盒采用多点法采集 0 ~ 20 cm 深度的原状土样密封带回实验室, 去除粗根及小石块, 然后沿土壤自然结构面轻轻掰开直径约 1 cm 的小团块, 自然风干, 用于测定土壤团聚体。

各粒径团聚体含量采用干筛法^[17], 分别筛出粒径为 > 2、0.25 ~ 2、0.053 ~ 0.25 和 < 0.053 mm 的土壤团聚体; 有机碳含量测定采用重铬酸钾氧化外加热法^[18], 全氮含量测定采用半微量凯氏定氮法^[18], 全磷含量测定采用钼锑抗比色法^[18]。

1.3 数据处理

利用各粒级团聚体数据, 计算机械团聚体的平均重量直径(E_{MWD})(mm)^[19], 机械团聚体的几何平均直径(E_{GMD})(mm)^[20]和可蚀性因子 K ^[21], 计算公式如下:

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

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

$$K = 7.954 \times \left\{ 0.0017 + 0.0494 \times \exp \left[-0.5 \times \left(\frac{\lg E_{GMD} + 1.675}{0.6986} \right)^2 \right] \right\}$$

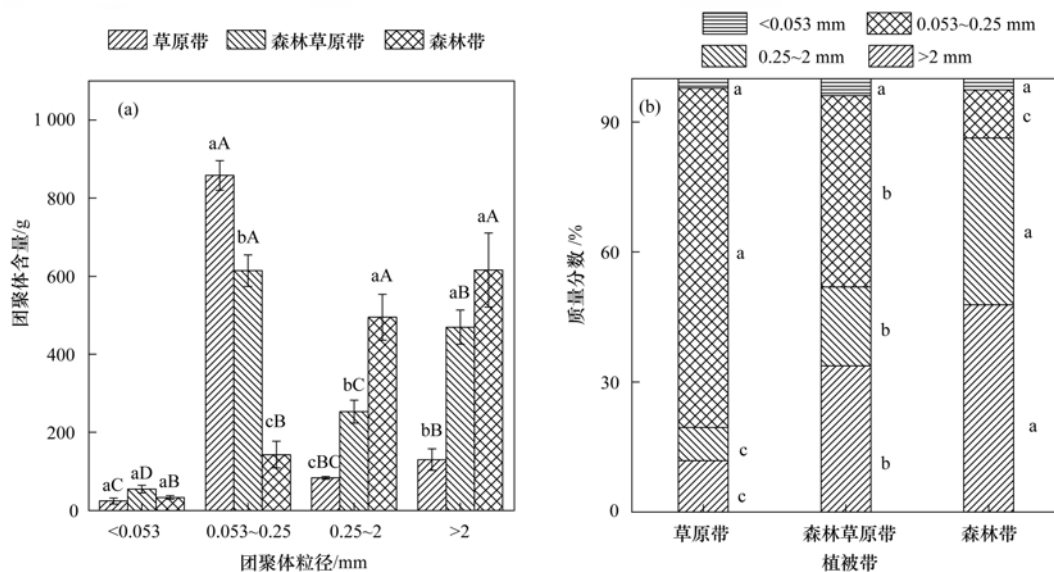
式中, $\bar{X}_i$ 为第 i 级的团聚体平均直径, mm; W_i 为第 i 级的团聚体组分的质量, g。

各粒径土壤团聚体碳氮比(C:N)、碳磷比(C:P)和氮磷比(N:P)均采用有机碳、全氮和全磷的含量比。采用 Excel 2016 和 SPSS 23.0 软件对数据进行整理和统计分析, 用 Duncan 法进行相同粒径不同植被带间各粒径团聚体含量、稳定性指标和各粒径碳氮磷化学计量、相同植被带不同粒径间各粒径团聚体含量和碳氮磷化学计量差异显著性检验($P < 0.05$)。利用 Pearson 相关系数法进行各粒径土壤团聚体含量与其粒径碳氮磷含量之间相关程度比较。冗余分析用 CANOCO 5.0 软件完成。运用 Origin 9.0 对数据进行绘图, 各图表中数据均以平均值 ± 标准误来表示。

2 结果与分析

2.1 土壤团聚体含量和稳定性分布特征

各粒径土壤团聚体含量在不同植被带间存在较大差异[图 2(a)]。其中森林草原带和森林带 > 2 mm 粒径团聚体含量分别是草原带的 4.74 和 3.61 倍; 0.25 ~ 2 mm 粒径团聚体含量表现为森林带 > 森林草原带 > 草原带, 其中森林带分别是森林草原带和草原带的 1.96 和 5.93 倍; 0.053 ~ 0.25 mm 粒径团聚体含量表现为草原带 > 森林草原带 > 森林带, 其中森林带分别占森林草原带和草原带的 23.26% 和 16.64%; 而 < 0.053 mm 团聚体含量在 3 个植被带无显著差异[图 2(a)]。0.25 ~ 2 mm 和 > 2 mm 团聚体质量分数表现为森林带 > 森林草原带 > 草原带; 0.053 ~ 0.25 mm 粒径团聚体质量分数表现为草原带 > 森林草原带 > 森林带; 而 < 0.053 mm 粒



小写字母表示不同植被带相同粒径团聚体含量在 $P < 0.05$ 水平上差异显著, 大写字母表示相同植被带不同粒径团聚体含量在 $P < 0.05$ 水平上差异显著

图 2 不同植被带不同粒径土壤团聚体含量及质量分数变化

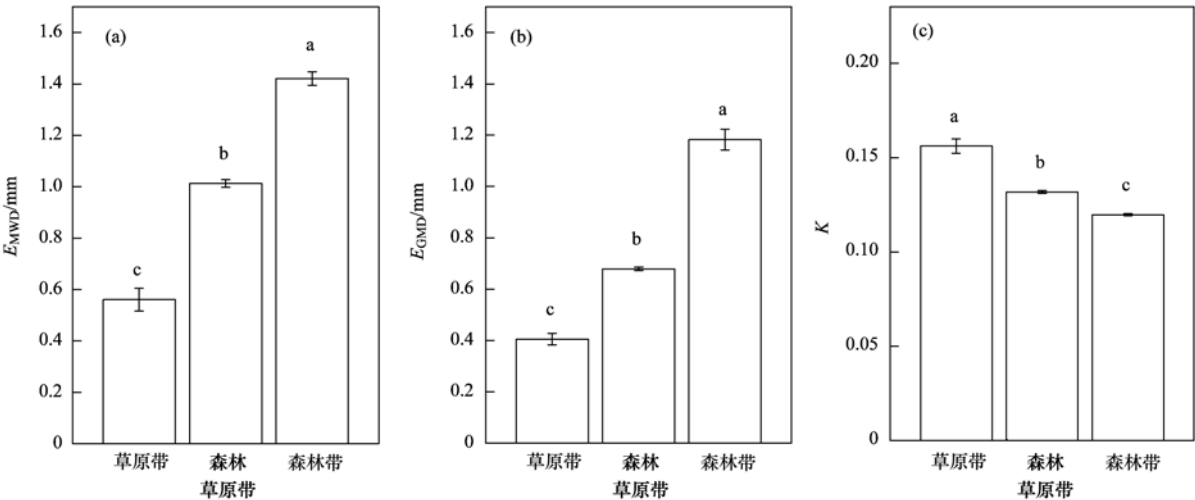
Fig. 2 Changes of the weight and fraction of different aggregate fractions among different vegetation zones

径团聚体质量分数在3个植被带间无显著差异[图2(b)]。

草原带和森林草原带中0.053~0.25 mm粒径团聚体含量显著高于其余粒径，其中草原带0.053~0.25 mm粒径团聚体含量分别是<0.053，0.25~2和>2 mm的35.82，10.27和6.61倍，而森林草原带0.053~0.25 mm粒径团聚体含量分别是<0.053，0.25~2和>2 mm的11.25，2.43和1.31倍。森林带表现为0.25~2 mm(494.80 g)和>2 mm(615.77 g)粒径团聚体含量显著高于<0.053

mm(142.79 g)和0.053~0.25 mm(33.49 g)粒径[图2(a)]。

植被带对土壤团聚体稳定性指标影响较显著[图3(a)]。E_{MWD}表现为森林带显著高于森林草原带和草原带，其中森林带分别是森林草原带和草原带的1.41和2.54倍[图3(a)]，E_{GMD}与E_{MWD}具有相同变化特点，即森林带(1.18 mm)>森林草原带(0.68 mm)>草原带(0.41 mm)[图3(b)]；而K则表现为草原带(0.16 mm)>森林草原带(0.13 mm)>森林带(0.12 mm)[图3(c)]。



小写字母表示不同植被带，E_{MWD}、E_{GMD}和K在P<0.05水平上差异显著

图3 不同植被带土壤团聚体稳定性指标变化特征

Fig. 3 Stability parameters for soil aggregate fractions among the different vegetation zones

2.2 各粒径土壤团聚体有机碳、全氮和全磷含量变化
植被带对各粒径土壤团聚体有机碳，全氮和全磷含量影响显著(表2)。各粒径有机碳和全氮含量在3个植被带表现为森林带显著高于森林草原带和草原带，而各粒径全磷含量在不同植被带间规律性较差(表2)。

草原带中，<0.053 mm和0.25~2 mm粒径有

机碳含量显著高于0.053~0.25 mm和>2 mm粒径，0.25~2 mm粒径全氮含量最高，<0.053 mm粒径全磷含量最高；森林草原带中0.053~0.25 mm和0.25~2 mm粒径有机碳和全氮含量显著高于<0.053 mm和>2 mm粒径，<0.053 mm粒径全磷含量最高；森林带中，不同粒径间有机碳、全氮和全磷含量无显著差异。

表2 不同植被带各粒径土壤机械稳定性团聚体碳氮磷含量¹⁾/g·kg⁻¹

Table 2 C, N, and P contents of different aggregate fractions among the different vegetation zones/g·kg⁻¹

项目	研究区	<0.053 mm	0.053~0.25 mm	0.25~2 mm	>2 mm
有机碳	草原带	9.38±0.92bA	7.28±0.90bB	9.64±1.17bA	6.65±0.77bB
	森林草原带	5.71±0.60bB	7.63±0.56bA	7.48±0.86bA	5.99±0.53bB
	森林带	11.99±2.40aA	17.84±3.68aA	18.62±4.33aA	13.76±2.91aA
全氮	草原带	0.47±0.03bAB	0.37±0.05bB	0.55±0.08bA	0.37±0.03bB
	森林草原带	0.32±0.02bB	0.41±0.03bA	0.40±0.03bA	0.34±0.02bB
	森林带	0.76±0.16aA	1.35±0.37aA	1.05±0.23aA	0.86±0.19aA
全磷	草原带	0.87±0.01aA	0.52±0.03bB	0.54±0.01bB	0.60±0.05aB
	森林草原带	0.72±0.01bA	0.62±0.01aB	0.66±0.01aB	0.63±0.01aB
	森林带	0.66±0.01cA	0.62±0.03aA	0.64±0.02aA	0.63±0.02aA

1) 同一列不同小写字母表示不同植被带相同粒径团聚体碳氮磷含量在P<0.05水平上差异显著；同一行不同大写字母表示相同植被带不同粒径团聚体碳氮磷含量在P<0.05水平上差异显著

2.3 各粒径土壤团聚体化学计量变化

各粒径土壤团聚体 C: N, C: P 和 N: P 在不同植被带有较显著差异(表 3). <0.053 mm 和 0.053 ~ 0.25 mm 粒径团聚体 C: N 在森林草原带和草原带高于森林带, 0.25 ~ 2 mm 和 >2 mm 粒径 C: N 在 3 个植被带间无显著差异; 而各粒径团聚体 C: P 和 N:

: P 均表现为森林带显著高于草原带和森林草原带. 草原带中, 不同粒径间 C: N 无显著差异, 0.25 ~ 2 mm 粒径 C: P 和 N: P 最大; 森林草原带中, 不同粒径间 C: N 无显著差异, 0.053 ~ 0.25 mm 粒径 C: P 最大, 0.053 ~ 0.25 和 0.25 ~ 2 mm 粒径 N: P 最大; 森林带中, 0.25 ~ 2 mm 粒径 C: N 最大, 不同

表 3 不同植被带各粒径土壤机械稳定性团聚体化学计量¹⁾

Table 3 C, N, and P ratios of different aggregate fractions among the different vegetation zones

项目	研究区	<0.053 mm	0.053 ~ 0.25 mm	0.25 ~ 2 mm	>2 mm
C: N	草原带	20.08 ± 1.55aA	19.52 ± 0.33aA	17.56 ± 0.33aA	17.65 ± 0.98aA
	森林草原带	16.19 ± 0.72abA	17.24 ± 0.61aA	16.48 ± 0.55aA	16.06 ± 0.87aA
	森林带	16.16 ± 0.50bA	14.32 ± 1.11bB	17.61 ± 1.33aA	16.10 ± 0.19aAB
C: P	草原带	10.77 ± 1.08bB	14.24 ± 2.00bAB	17.58 ± 1.83bA	11.50 ± 1.69bB
	森林草原带	7.07 ± 0.55bC	11.25 ± 0.87bA	10.01 ± 1.05bAB	8.59 ± 0.77bBC
	森林带	17.83 ± 3.30aA	27.88 ± 4.83aA	28.39 ± 5.83aA	21.47 ± 4.05aA
N: P	草原带	0.54 ± 0.04bB	0.73 ± 0.11bAB	1.01 ± 0.12bA	0.65 ± 0.08bB
	森林草原带	0.44 ± 0.02bB	0.65 ± 0.04bA	0.61 ± 0.05bA	0.53 ± 0.03bB
	森林带	1.12 ± 0.22aA	2.09 ± 0.50aA	1.61 ± 0.31aA	1.34 ± 0.26aA

1) 同一列小写字母表示不同植被带相同粒径团聚体化学计量在 $P < 0.05$ 水平上差异显著; 同一行不同大写字母表示相同植被带不同粒径化学计量在 $P < 0.05$ 水平上差异显著

粒径间 C: P 和 N: P 无显著差异.

3 讨论

一般把 >0.25 mm 粒径团聚体称为大团聚体, 大团聚体被看作是结构性最好, 抗蚀能力最强的团聚体, 其数量和土壤的抗侵蚀能力和稳定性呈正相关关系^[22], 而 <0.25 mm 粒径团聚体被称作微团聚体^[23]. 同时, 土壤团聚体形成与土壤有机碳关系密切, 其在团聚体的形成中发挥着重要的作用^[24]. 本研究表明草原带以微团聚体为主, 而森林带以大团聚体为主, 森林带林地土壤结构性最好, 主要是因为森林带林地较草原带和森林草原带凋落物含量、枯死的根系归还量大, 使得土壤中有机质的来源增加^[25], 为土壤团粒结构的形成提供了有机胶结物质, 且有研究发现森林带有机碳含量显著高于草原带^[26], 从而有效地改善了森林带的土壤结构^[27], 而草原带有机碳含量相对较低, 导致土壤大团聚体分散. 本研究还发现植被带对团聚体稳定性影响显著(图 4). 土壤团聚体稳定性在 3 个植被带整体表现为森林带 > 森林草原带 > 草原带, 与前人研究结果相同^[11]. 本研究发现各粒径有机碳和全氮含量均与团聚体的稳定性具有较强的相关性, 且其均受年均降雨和年均气温的影响较大(图 4). 首先, 黄土高原地区随纬度增加, 温度和降雨量逐渐降低^[28], 同时, 微生物活动受水热条件影响较大, 低温和少雨不利于土壤微生物的活动^[29], 导致土壤团聚体凝结力减小, 团聚体稳定性降低. 其次,

随纬度增加, 植被覆盖度增加, 土壤抗蚀性能力增强, 同时由植物凋落物、根系分泌物增加导致归还到土壤中的有机质含量增加^[29, 30], 土壤黏结作用增强, 进而土壤团聚化作用在增强, 使得土壤团聚体稳定性增强, 从而导致森林带团聚体稳定性显著高于森林草原带和草原带.

此外, 由表 2 可看出, 团聚体稳定性与大团聚体含量有相同的变化特点, 即森林带显著高于森林草原带和草原带. 进一步说明团聚体的稳定性与大团聚体含量显著相关, 在团聚体稳定性中大团聚体含量起主要作用. 土壤团聚体中有机碳、全氮和全磷含量反映了土壤有机碳和养分含量的分布状况, 其化学计量特征与土壤中养分有效性关系密切^[8].

本研究中森林带各粒径团聚体有机碳和全氮含量显著高于森林草原带和草原带, 可能原因是森林带中植物生物量和输入土壤的有机物数量较多, 再加上归还土壤的动植物残体和腐殖化物质较多, 表现出较高的土壤养分含量^[29], 从而导致森林带各粒径团聚体有机碳和全氮含量较高. 而各粒径全磷含量在 3 个植被带规律性较差, 主要是由于磷是一种沉积性元素, 主要受母质的影响^[31]. 本研究还发现大团聚体含量与该粒径有机碳, 全氮和全磷含量呈正相关关系, 而微团聚体含量与该粒径有机碳, 全氮和全磷含量呈负相关关系(图 5), 说明大团聚体有利于团聚体中土壤养分的积累, 从而反过来有利于团聚体稳定性的提高. 此结果与前人研究结果相符^[32].

此外, 本研究发现 0.25 ~ 2 mm 和 > 2 mm 粒径团聚体 C: N 在 3 个植被带无显著差异, 可能与该粒径团聚体有机碳和全氮含量变化一致性有关; 而 < 0.053 mm 和 0.053 ~ 0.25 mm 粒径团聚体 C: N 均表现为草原带和森林草原带高于森林带. 一般认为土壤有机质的分解速率与 C: N 呈负相关关系^[33], 说明森林带 < 0.053 mm 和 0.053 ~ 0.25 mm 粒径土壤有机质分解速率最高, 而 0.25 ~ 2 mm 和 > 2 mm 粒径的土壤有机质分解速率在 3 个植被带间无显著差异. 同时, 各粒径团聚体 C: P 和 N: P 均表现为森林带显著高于森林草原带和草原带.

冗余分析(RDA)结果显示, C: P 和 N: P 与有机碳和全氮含量具有较强的正相关性, 本研究中, 森林带各粒径有机碳和全氮含量显著高于森林草原带和草原带, 而全磷含量无明显变化特点, 从而森林带 C: P 和 N: P 较高. 同时, 土壤 C: P 是衡量微生物矿化土壤有机物质释放磷或从环境中吸收固持磷素潜力的一种指标^[34], 说明森林带各粒径团聚体土壤固磷能力、土壤微生物对土壤有效磷同化作用最强, 微生物在矿化土壤有机质中释放磷的潜力最低. 此外, 氮磷为植物生长的必需矿质营养元素和生态系统常见的限制性元素土壤, 是养分限制类

型的预测指标^[35], 说明黄土高原草原带和森林草原带受 N 限制强于森林带, 因此在管理的过程中需要对草原带和森林草原带土壤全氮进行改善和保护, 如施用氮肥等.

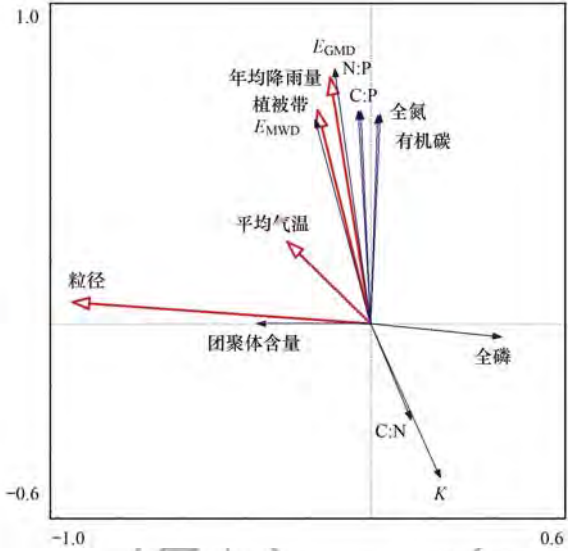


图 4 环境因子与团聚体稳定性指标和团聚体化学计量的 RDA 排序

Fig. 4 RDA sorting graph of environmental factors, aggregate stability and stoichiometric ratios

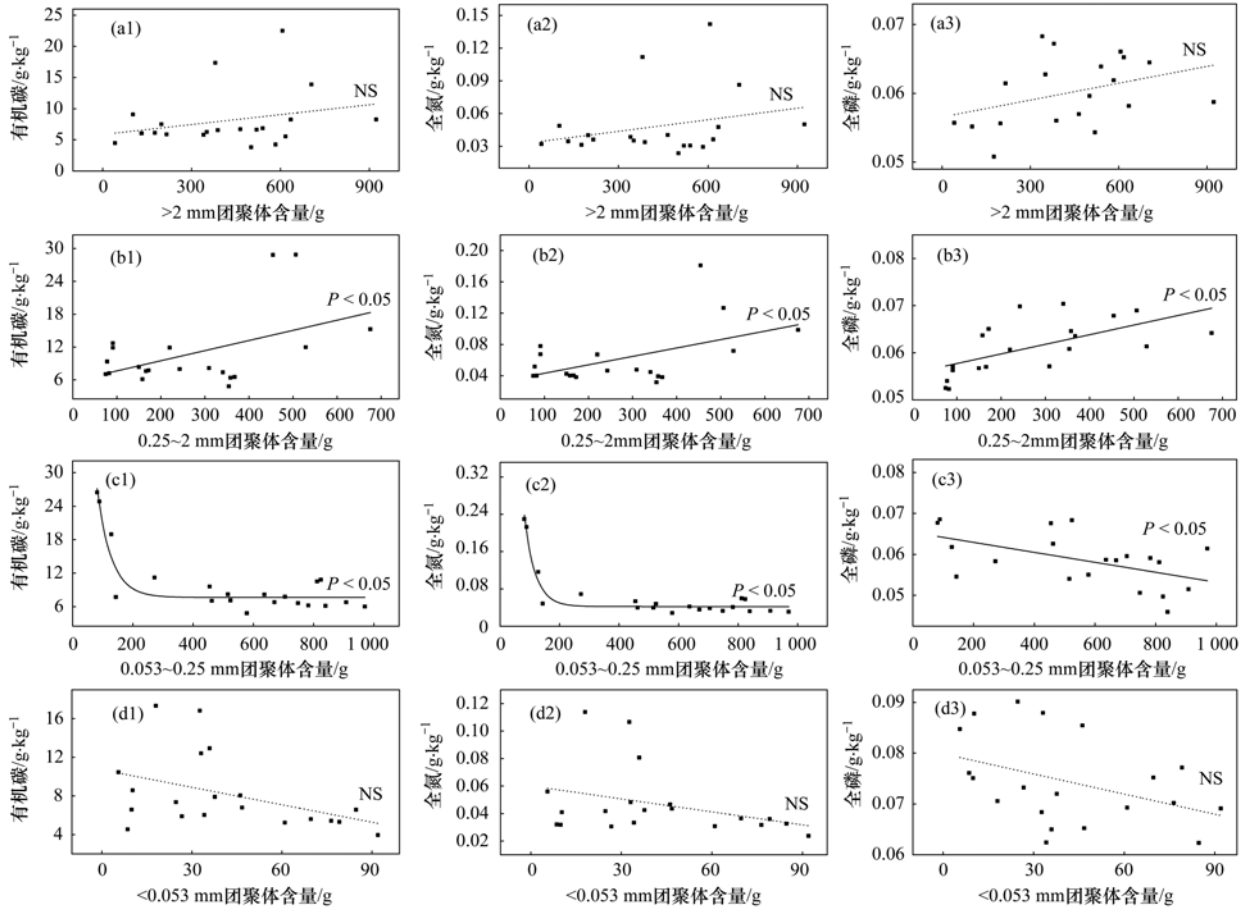


图 5 各粒径团聚体含量与有机碳、全氮、全磷含量的相关分析

Fig. 5 Correlation between the soil aggregate fraction content and soil organic carbon, total nitrogen and total phosphorous content

冗余分析(RDA)结果显示,粒径对团聚体含量也有较强的正相关性(图4),草原带以0.053~0.25 mm粒径团聚体含量占绝对优势,而森林带以0.25~2 mm和>2 mm粒径团聚体为主[图2(a)和图2(b)].已有研究表明有机质的增加提高了土壤大团聚体(>0.25 mm)含量^[36].本研究中森林带林下凋落物层较厚,可以有效地降低降雨的溅蚀,从而降低了对土壤大团聚体的破坏作用,同时林下植被生长旺盛,根系组织发达,可以有效地减少地表雨水的径流作用^[37],从而有效地保护土壤大团聚体.另外,根系分泌的高分子黏质是土壤团聚体形成的重要黏结物质^[27],森林带根系发达^[26],导致分泌的高分子黏质较多,可以有效地粘结土壤颗粒和微团聚体,从而提高了大团聚体的含量.而相反,草原带地表层凋落物层薄,根系较浅,降雨导致的溅蚀和地表径流较大,从而破坏土壤大团聚体结构,使得微团聚体含量较高.同时,本研究发现草原带中<0.053 mm和0.25~2 mm粒径对有机碳和全氮含量有富集作用,且<0.053 mm粒径对全磷也有富集作用;森林草原带0.053~0.25 mm和0.25~2 mm粒径对有机碳和全氮有富集作用,而<0.053 mm粒径对全磷有富集作用.

4 结论

(1)植被带显著影响团聚体稳定性和团聚体化学计量变化特征.团聚体稳定性整体表现为森林带>森林草原带>草原带,而这种稳定性的变化主要是由>0.25 mm粒径团聚体引起.各粒径团聚体有机碳和全氮含量表现为森林带显著高于森林草原带和草原带,而不同粒径全磷含量在3个植被带间存在较大差异.不同植被带主要影响<0.25 mm粒径团聚体C:N,且在3个植被带整体表现为森林带低于草原带和森林草原带.而各粒径C:P和N:P均表现为森林带显著高于森林草原带和草原带.

(2)团聚体有机碳、全氮和全磷含量在不同粒径间存在较大差异.在草原带,<0.053 mm和0.25~2 mm粒径的有机碳和全氮含量显著高于其余粒径,而全磷含量以<0.053 mm粒径为主;在森林草原带,有机碳和全氮含量以0.053~0.25 mm和0.25~2 mm粒径占绝对优势,而<0.053 mm粒径全磷含量显著高于其余粒径;在森林带,有机碳、全氮和全磷含量在不同粒径间均无显著差异.

参考文献:

[1] 彭新华,张斌,赵其国.土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J].土壤学报,2004,41(4):618-623.
Peng X H, Zhang B, Zhao Q G. A review on relationship between soil organic carbon pools and soil structure stability[J].

Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4): 618-623.
[2] 蔡立群,齐鹏,张仁陟.保护性耕作对麦-豆轮作条件下土壤团聚体组成及有机碳含量的影响[J].水土保持学报,2008,22(2):141-145.
Cai L Q, Qi P, Zhang R Z. Effects of conservation tillage measures on soil aggregates stability and soil organic carbon in two sequence rotation system with spring wheat and field pea[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(2): 141-145.
[3] Six J, Elliott E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1998, 62(5): 1367-1377.
[4] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: a review[J]. Geoderma, 2005, 124(1-2): 3-22.
[5] 安韶山,张扬,郑粉莉.黄土丘陵区土壤团聚体分形特征及其对植被恢复的响应[J].中国水土保持科学,2008,6(2):66-70,82.
An S S, Zhang Y, Zheng F L. Fractal dimension of the soil aggregate and its responds to plant rehabilitation in the hilly-gully region of Loess Plateau [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(2): 66-70, 82.
[6] 张星星.土壤团聚体研究进展[J].绿色科技,2017,(24):138-139.
Zhang X X. Advance in soil aggregate study[J]. Journal of Green Science and Technology, 2017, (24): 138-139.
[7] Mao R, Ye S Y, Zhang X H. Soil-aggregate-associated organic carbon along vegetation zones in tidal salt marshes in the Liaohe Delta[J]. Clean-Soil Air Water, 2018, 46(4): 1800049.
[8] Cleveland C C, Liptzin D. C:N:P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? [J]. Biogeochemistry, 2007, 85(3): 235-252.
[9] 王俊波,马安平,王得祥,等.我国人工林经营现状与健康经营途径探讨[J].世界林业研究,2008,21:102-105.
Wang J B, Ma An P, Wang D X, et al. Discussion on plantation current status and forest health management[J]. World Forestry Research, 2008, 21: 102-105.
[10] Barthès B, Roose E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels [J]. Catena, 2002, 47(2): 133-149.
[11] 徐红伟,吴阳,乔磊磊,等.不同植被带生态恢复过程土壤团聚体及其稳定性—以黄土高原为例[J].中国环境科学,2018,38(6):2223-2232.
Xu H W, Wu Y, Qiao L L, et al. Soil aggregates and stability in the ecological restoration process under different vegetation zones on Loess Plateau [J]. China Environmental Science, 2018, 38(6): 2223-2232.
[12] 李婷,邓强,袁志友,等.黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征[J].环境科学,2015,36(8):2988-2996.
Li T, Deng Q, Yuan Z Y, et al. Latitudinal changes in plant stoichiometric and soil C, N, P stoichiometry in Loess Plateau [J]. Environmental Science, 2015, 36(8): 2988-2996.
[13] 曾全超,李鑫,董扬红,等.黄土高原延河流域不同植被类型下土壤生态化学计量学特征[J].自然资源学报,2016,31(11):1881-1891.
Zeng Q C, Li X, Dong Y H, et al. Ecological stoichiometry of soils in the Yanhe watershed in the Loess Plateau; the influence of different vegetation zones [J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(11): 1881-1891.
[14] 朱秋莲.黄土丘陵区不同植被带立地条件对植物—枯落物—土壤生态化学计量特征的影响[D].杨凌:西北农林科技大学

- 学, 2013.
- [15] 杜盛, 刘国彬. 黄土高原植被恢复的生态功能[M]. 北京: 科学出版社, 2015. 7-10.
- [16] 温仲明, 焦峰, 焦菊英. 黄土丘陵区延河流域潜在植被分布预测与制图[J]. 应用生态学报, 2008, **19**(9): 1897-1904.
- Wen Z M, Jiao F, Jiao J Y. Prediction and mapping of potential vegetation distribution in Yanhe River catchment in hilly area of Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, **19**(9): 1897-1904.
- [17] 刘孝义. 土壤物理及土壤改良研究法[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1982. 9-11.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000. 30-172.
- Bao S D. The soil agricultural analysis (3rd ed.) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. 30-172.
- [19] Katz A J, Thompson A H. Fractal sandstone pores: implications for conductivity and pore formation[J]. Physical Review Letters, 1985, **54**(12): 1325-1328.
- [20] 王丽, 李军, 李娟, 等. 轮耕与施肥对渭北旱作玉米田土壤团聚体和有机碳含量的影响[J]. 应用生态学报, 2014, **25**(3): 759-768.
- Wang L, Li J, Li J, *et al.* Effects of tillage rotation and fertilization on soil aggregates and organic carbon content in corn field in Weibei highland [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, **25**(3): 759-768.
- [21] Shirazi M A, Boersma L. A unifying quantitative analysis of soil texture[J]. Soil Science Society of America Journal, 1984, **48**(1): 142-147.
- [22] 高维森. 土壤抗蚀性指标及其适用性初步研究[J]. 水土保持学报, 1991, **5**(2): 60-65.
- Gao W S. Primary study of cassification of different indices of soil anti-erosibility and its adaptation in the hill Region of the Loess Plateau[J]. Acta Conservationis Soil et Aquae Sinica, 1991, **5**(2): 60-65.
- [23] Oades J M, Waters A G. Aggregate hierarchy in soils [J]. Australian Journal of Soil Research, 1991, **29**(6): 815-828.
- [24] 胡尧, 李懿, 侯雨乐. 不同土地利用方式对岷江流域土壤团聚体稳定性及有机碳的影响[J]. 水土保持研究, 2018, **25**(4): 22-29.
- Hu Y, Li Y, Hou Y L. Effects of land use types on stability and organic carbon of soil aggregates in Minjiang river valley [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, **25**(4): 22-29.
- [25] Tamura M, Suseela V, Simpson M, *et al.* Plant litter chemistry alters the content and composition of organic carbon associated with soil mineral and aggregate fractions in invaded ecosystems [J]. Global Change Biology, 2017, **23**(10): 4002-4018.
- [26] 李鑫, 马瑞萍, 安韶山, 等. 黄土高原不同植被带土壤团聚体有机碳和酶活性的粒径分布特征[J]. 应用生态学报, 2015, **26**(8): 2282-2290.
- Li X, Ma R P, An S S, *et al.* Characteristics of soil organic carbon and enzyme activities in soil aggregates under different vegetation zones on the Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, **26**(8): 2282-2290.
- [27] 毛艳玲, 杨玉盛, 邢世和, 等. 土地利用方式对土壤水稳性团聚体有机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2008, **22**(4): 132-137.
- Mao Y L, Yang Y S, Xing S H, *et al.* Effects of land use on soil organic carbon in water-stable aggregates [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, **22**(4): 132-137.
- [28] 李正国, 王仰麟, 吴健生, 等. 基于植被/温度特征的黄土高原地表水分季节变化[J]. 生态学报, 2007, **27**(11): 4563-4575.
- Li Z G, Wang Y L, Wu J S, *et al.* Intra-annual surface soil moisture change based on vegetation & temperature characteristics in Loess Plateau area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, **27**(11): 4563-4575.
- [29] Komiya A, Ong J E, Pongpan S. Allometry, biomass, and productivity of mangrove forests: a review [J]. Aquatic Botany, 2008, **89**(2): 128-137.
- [30] Yin H J, Phillips R P, Liang R B, *et al.* Resource stoichiometry mediates soil C loss and nutrient transformations in forest soils [J]. Applied Soil Ecology, 2016, **108**: 248-257.
- [31] 郑子成, 何淑勤, 王永东, 等. 不同土地利用方式下土壤团聚体中养分的分布特征[J]. 水土保持学报, 2010, **24**(3): 170-174.
- Zheng Z C, He S Q, Wang Y D, *et al.* Distribution feature of soil nutrients in aggregate under different land use [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, **24**(3): 170-174.
- [32] 葛楠楠, 石芸, 杨宪龙, 等. 黄土高原不同土壤质地农田土壤碳、氮、磷及团聚体分布特征[J]. 应用生态学报, 2017, **28**(5): 1626-1632.
- Ge N N, Shi Y, Yang X L, *et al.* Distribution of soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus and water stable aggregates of cropland with different soil textures on the Loess Plateau, Northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, **28**(5): 1626-1632.
- [33] Chapin III F S, Matson P A, Vitousek P. Principles of terrestrial ecosystem ecology [M]. New York: Springer, 2011. 369-397.
- [34] 彭佩钦, 张文菊, 童成立, 等. 洞庭湖湿地土壤碳、氮、磷及其与土壤物理性状的关系[J]. 应用生态学报, 2005, **16**(10): 1872-1878.
- Peng P Q, Zhang W J, Tong C L, *et al.* Soil C, N and P contents and their relationships with soil physical properties in wetlands of Dongting Lake Floodplain [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, **16**(10): 1872-1878.
- [35] 陈蕾, 李超伦. 海洋浮游生物的生态化学计量学研究进展[J]. 应用生态学报, 2014, **25**(10): 3047-3055.
- Chen L, Li C L. Research advances in ecological stoichiometry of marine plankton [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, **25**(10): 3047-3055.
- [36] Chen G P, Gao Z Y, Zu L H, *et al.* Soil aggregate characteristics and stability of soil carbon stocks in a *Pinus tabulaeformis* plantation [J]. New Forests, 2017, **48**(6): 837-853.
- [37] An S S, Mentler A, Mayer H, *et al.* Soil Aggregation, aggregate stability, organic carbon and nitrogen in different soil aggregate fractions under forest and shrub vegetation on the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2010, **81**(3): 226-233.

CONTENTS

Concurrent Measurement of Wet and Bulk Deposition of Trace Metals in Urban Beijing	ZHANG Guo-zhong, PAN Yue-peng, TIAN Shi-li, <i>et al.</i> (2493)
Concentration and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Collected in Urban and Suburban Areas of Beijing	XU Jing, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i> (2501)
Secondary Aerosol Formation in Urban Shanghai: Insights into the Roles of Photochemical Oxidation and Aqueous-Phase Reaction	GAO Jie, QIAO Li-ping, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (2510)
Secondary Inorganic Pollution Characteristics During Heavy Pollution Episodes of 2017 in Tianjin	XU Hong, XIAO Zhi-mei, CHEN Kui, <i>et al.</i> (2519)
Characterization of PM ₁₀ and PM _{2.5} Source Profiles for Emissions from Nonmetal Mineral Products Manufacturing Processes	ZHAO Xue-yan, YU Gao-feng, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (2526)
Characteristics of Component Particle Size Distributions of Particulate Matter Emitted from a Waste Incineration Plant	YU Zhuo-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (2533)
Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust PM _{2.5} and PM ₁₀ During Spring in Tianjin Derived by Using the Quadrat Sampling Method	MA Yan, JI Ya-qin, GUO Ji-liang, <i>et al.</i> (2540)
Urban Aerosol Hygroscopicity During Haze Weather	YANG Su-ying, TIAN Zhi-jie, ZHANG Tie-ning, <i>et al.</i> (2546)
Atmospheric Pollution Characteristics and Inhalation Exposure Risk of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} at the Ningdong Energy and Chemical Industry Base, Northwest China	LIU Pan-liang, JU Yuan-li, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (2556)
Health Benefit Evaluation for PM ₁₀ and PM _{2.5} Pollution Control in Zhengzhou, China, 2014-2016	HAN Shi-jie, WANG Jia, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (2565)
Spatial-temporal Distribution of Aerosol Optical Depth and Its Main Influence Types in China During 1990-2017	LIU Ying, LIN Ai-wen, QIN Wen-min, <i>et al.</i> (2572)
Research on the Pollution Characteristics and Causality of Haze-sand Air Pollution in Beijing in Spring	WANG Yao-ting, LI Qing-chun, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (2582)
Vessel Emission Inventories and Emission Characteristics for Inland Rivers in Jiangsu Province	XU Wen-wen, YIN Cheng-qi, XU Xue-ji, <i>et al.</i> (2595)
Atmospheric Nitrogen Dioxide, Nitric Acid, Nitrate Nitrogen Concentrations, and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China	OUYANG Xiu-qin, WANG Bo, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2607)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Moisture Sources in the Headwaters of the Yangtze River	WANG Shao-yong, WANG Qiao-li, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2615)
Historical Trends of Atmospheric Trace Metal Pollution in Northern Guizhou Province as Reconstructed from Alpine Lake Sediments	LIANG Meng-yao, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in Qingdao Coastal Beaches	LUO Ya-dan, LIN Qian-hui, JIA Fang-li, <i>et al.</i> (2631)
Pollution Characteristics of Microplastics in Migratory Bird Habitats Located Within Poyang Lake Wetlands	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZHOU Long-yin, <i>et al.</i> (2639)
Use of the Nitrogen/Carbon Ratio (N/C) and Two End-Member Sources Mixing Model to Identify the Origins of Dissolved Organic Matter from Soils in the Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, JOERI Kaal, LIANG Jian, <i>et al.</i> (2647)
Effects of Photosynthesis of Submerged Aquatic Plants on CDOM in a Karst Water System: A Case Study from Xueyu Cave, Chongqing, China	FAN Jia-xin, JIANG Yong-jun, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (2657)
Indicators of Groundwater Evolution Processes Based on Hydrochemistry and Environmental Isotopes: A Case Study of the Dongyuan Drinking Water Source Area in Ji'nan City	ZHANG Ya, SU Chun-li, MA Yan-hua, <i>et al.</i> (2667)
Water Quality Analysis and Health Risk Assessment for Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2675)
Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Buckwheat Field, Yunnan Province	ZHANG Yong, GUO Chun-qing, ZHU Yan-guang, <i>et al.</i> (2686)
C and N Transport Flux and Associated Changes of Water Quality Parameters from a Multiscale Subtropical Watershed in the Poyang Lake Area	LU Yao, GAO Yang, JIA Jun-jie, <i>et al.</i> (2696)
Pollutant Transport Analysis and Source Apportionment of the Entire Non-point Source Pollution Process in Combined Sewer Systems	FANG Jin-xiu, XIE Wen-xia, ZHU Yu-xi, <i>et al.</i> (2705)
Nitrogen Removal Efficiencies from Road Runoff by Dry Grass Swales with a Shallow Substrate Layer	DUAN Jin-kai, LI Tian, ZHANG Jia-wei (2715)
Migration Characteristics of Manganese During Rainfall Events and Its Impacts on Water Quality in a Drinking Water Source Reservoir	DENG Li-fan, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2722)
Potential for Phosphorus Uptake by Bed Sediments and Its Response to Carbon Additions in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, ZHANG Rui-gang, <i>et al.</i> (2730)
Sources and Distribution of Phosphorus in Sediments of the Jinpen Reservoir	MAO Xue-jing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2738)
Water Quality Characteristics and Distribution of Bacterial Communities During Thermal Stratification in the Miyun Reservoir	WANG Yu-bing, WANG Xiao-yan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (2745)
Relationship Between the Vertical Distribution of Nutrients and Bacterial Community Structures in Sediment Interstitial Waters of Stratified Reservoirs with Different Water Temperatures	WANG Shen, ZHANG Si-si, XU You, <i>et al.</i> (2753)
Accumulation Characteristics and Release Regularity of Nutrients in Sediments of a Surface-flow Constructed Wetland After Long-term Operation	ZHU Yi-meng, JIANG Cui-ling, ZHU Li-qin, <i>et al.</i> (2764)
Application of Goethite Modified Biochar for Arsenic Removal from Aqueous Solution	ZHU Si-hang, ZHAO Jing-jing, YIN Ying-jie, <i>et al.</i> (2773)
Effects and Mechanisms of Methyl Orange Removal from Aqueous Solutions by Modified Rice Shell Biochar	SHI Yue-yue, SHAN Riu, YUAN Hao-ran (2783)
Performance and Membrane Fouling Properties in an Anaerobic Membrane Bioreactor for Salty Wastewater	YAN Huan-xi, XU Zhen-yu, JIN Chun-ji, <i>et al.</i> (2793)
Pollution Characteristics and Enhanced Removal of Organic Phosphorus in Effluent from a Wastewater Treatment Plant	WANG Xiao-dong, WANG Zi-wen, CHEN Ming-fei, <i>et al.</i> (2800)
Effects of Alkalinity on Partial Nitrification in a Zeolite Sequencing Batch Reactor	WANG Rui-xin, CHEN Jing, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (2807)
Effects of the Physical Structure of Activated Sludge on Respiration Processes	GUO Yao, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (2813)
Performance of an Aerobic Granular Reactor Treating Biogas Slurry from Pig Farm	LIAO Jie, YE Jia-qi, ZENG Zhi-chao, <i>et al.</i> (2821)
Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of Greenhouse Gas Emissions from Rivers in a Rapidly Urbanizing Area	LIU Ting-ting, WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, <i>et al.</i> (2827)
Influences of Biochar on Pollutant Removal Efficiencies and Nitrous Oxide Emissions in a Subsurface Flow Constructed Wetland	DENG Chao-ren, LIANG Yin-kun, HUANG Lei, <i>et al.</i> (2840)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on N ₂ O Emissions and the Associated Microbiological Mechanism in a Rice Field	WU Jie, LI Zhi-lin, XU Jia-ying, <i>et al.</i> (2847)
Effects of Different Levels of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration Rates and Soil Biochemical Properties in an Alfalfa Grassland	HU Wei, ZHANG Ya-hong, LI Peng, <i>et al.</i> (2858)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils from a Typical Urbanized Area	HE Bo, ZHAO Hui, WANG Tie-yu, <i>et al.</i> (2869)
Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils and Crops from an Area with a High Geochemical Background of Cadmium, Southwestern China	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, XIONG Yan, <i>et al.</i> (2877)
Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Chinese Wolfberry Land Based on GIS and the Receptor Model	BAI Yi-ru, ZHANG Xing, ZHAO Yun-peng, <i>et al.</i> (2885)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of As at a Small Scale in Agricultural Soils of the Karst Region	WANG Hua, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (2895)
Soil Aggregate Stability and Its Stoichiometric Characteristics in <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest within Different Vegetation Zones on the Loess Plateau, China	QU Qing, XU Hong-wei, WU Xuan, <i>et al.</i> (2904)
Straw Returning Plus Nitrogen Fertilizer Affects the Soil Microbial Community and Organic Carbon Mineralization in Karst Farmland	XU Xue-chi, SU Yi-rong, WANG Gui-hong, <i>et al.</i> (2912)
Effects of Biochar Application and Ageing on the Adsorption of Antibiotics in Purple Soil	YIN Wen-min, GUAN Zhuo, LIU Chen, <i>et al.</i> (2920)
Ammonia Oxidation in a Neutral Purple Soil Measured by the ¹³ C-DNA-SIP Method	LIU Tian-lin, WANG Zhi-hui, YAN Xiao-juan, <i>et al.</i> (2930)
Effects of Silver Nanoparticles and Silver Ions on Soil Nitrification Microorganisms and Ammonoxidation	WU Ling-li, ZHANG Xu, SHU Kun-hui, <i>et al.</i> (2939)
Insight into the Process of Mn-ANAMMOX in Soils of Agricultural Drainage Ditches	CHEN Shi, LI Zheng-kui, QIN Yun-bin, <i>et al.</i> (2948)
Effects of Different Concentrations of Tetracycline in Sludge on Ammonia Oxidizers During Vermicomposting	WU Ying, HUANG Kui, XIA Hui, <i>et al.</i> (2954)