

目次

北京市 2014~2020 年 PM_{2.5} 和 O₃ 时空分布与健康效应评估 陈菁, 彭金龙, 徐彦森 (4071)

京津冀地区高分辨率 PM_{2.5} 浓度时空变化模拟与分析 杨晓辉, 宋春杰, 范丽行, 张凌云, 魏强, 李夫星, 王丽艳, 王卫 (4083)

京津冀典型城市冬季人为源减排与气象条件对 PM_{2.5} 污染影响 邵玄逸, 王晓琦, 钟焜盛, 王瑞鹏 (4095)

太行山两侧污染物传输对横谷城市气溶胶的影响分析 王雁, 郭伟, 闫世明, 裴坤宁, 李明明, 陈二萍 (4104)

嘉善冬季碳质气溶胶变化特征及其来源解析 张颖龙, 李莉, 吴伟超, 吕升, 秦阳, 祝新明, 高晋徽, 唐倩, 夏崢 (4116)

基于机器学习算法的新冠疫情管控对河南省空气质量影响的模拟分析 魏煜, 徐起翔, 赵金帅, 张瑞芹 (4126)

新乡市大气 PM_{2.5} 载带金属元素季节分布、来源特征与健康风险 刘桓嘉, 贾梦珂, 刘永丽, 赵艺洁, 郑爱华, 刘恒志, 徐肃阳, 肖晴晴, 苏晓燕, 任言 (4140)

黄渤海气溶胶中砷的分布特征和季节变化 袁帅, 王艳, 刘汝海, 种习习, 刘晓雨, 邵龙 (4151)

天津市 2020 年冬季重污染过程气溶胶消光特性及其来源 李立伟, 肖致美, 杨宁, 蔡子颖, 闫斌峰, 元洁, 白宇, 郑乃源, 唐逸 (4158)

中国暖季近地面臭氧浓度空间格局演变及主要气象驱动因素 何超, 慕航, 杨璐, 王丹璐, 邸彦峰, 叶志祥, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 洪松 (4168)

乌海市夏季臭氧污染特征及基于过程分析的成因探究 张瑞欣, 陈强, 夏佳琦, 刘晓, 郭文凯, 李光耀, 陈梅 (4180)

珠江三角洲海岸背景区大气 VOCs 污染特征与来源 云龙, 李成柳, 张明棣, 何龙, 郭键锋 (4191)

永定河上游地表水-地下水水化学特征及其成因分析 孔晓乐, 杨永辉, 曹博, 王艺璇, 裴宏伟, 沈彦军 (4202)

汉江中下游水质时空变异与驱动因素识别 程兵芬, 张远, 夏瑞, 张楠, 张新飞 (4211)

环境持久性药物在江苏省地表水中的污染水平、分布特征及生态风险评估 赵美美, 范德玲, 古文, 汪贞, 梁梦园, 刘济宁, 张志 (4222)

柳江流域河流溶解态重金属时空分布及污染评价 张婉军, 辛存林, 于爽, 刘齐, 曾鹏 (4234)

雷州半岛地下水重金属来源解析及健康风险评价 师环环, 潘羽杰, 曾敏, 黄长生, 侯清芹, 皮鹏程, 彭红霞 (4246)

龙子祠泉域地下水金属元素分布特征及健康风险评价 谢浩, 梁永平, 李军, 邹胜章, 申豪勇, 赵春红, 王志恒 (4257)

硫氧同位素解析典型岩溶地下河流域硫酸盐季节变化特征和来源 任坤, 潘晓东, 兰干江, 彭聪, 梁嘉鹏, 曾洁 (4267)

包头南海湿地磷形态及污染源定量识别 拜亚红, 钱晨歌, 袁思静, 谢子嫣, 来凌子, 张敏, 刘颖, 苗春林 (4275)

城市新城区公园沟塘沉积物磷释放风险及影响因素分析 李如忠, 宋敏, 杨继伟 (4287)

水力停留时间对潜流湿地净化效果影响及脱氮途径解析 齐冉, 张灵, 杨帆, 颜昌宙 (4296)

锰砂人工湿地对污染物的强化去除 马权, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (4304)

4 种典型沉水植物对去除磷污染底泥的应用效果 陶理, 王沛芳, 袁秋生, 王洵, 胡斌 (4311)

输水情景下白洋淀好氧反硝化菌群落对溶解性有机物的响应 周石磊, 张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 于明会, 姚波, 崔建升, 罗晓 (4319)

木屑生物炭在雨水径流中的氮磷淋出和吸附特性 孟依柯, 王媛, 汪传跃 (4332)

海州湾潮间带沙蚕对沉积物微塑料的指示作用 王嘉旋, 宋可心, 孙一鑫, 方涛, 李瑾祯, 张涛, 冯志华 (4341)

纳米二氧化钛与镉对斜生栅藻 (*Scenedesmus obliquus*) 生长的拮抗效应及其作用机制 王璞, 赵丽红, 朱小山 (4350)

螺旋霉素废水处理过程中菌群结构、水质特征及抗性基因之间关系分析 武彩云, 李慧莉, 覃彩霞, 佟娟, 魏源送 (4358)

螯合铁对厌氧铁氨氧化脱氮效能及微生物群落的影响 廖宏燕, 宋诚, 万柳杨, 时绍鹏, 王兴祖 (4366)

溶解氧对低碳源城市污水处理系统脱氮性能与微生物群落的影响 池玉蕾, 石炬, 任童, 王晓昌, 金鹏康 (4374)

间歇梯度曝气下缩短 SRT 强化短程 SNEDPR 系统脱氮除磷 张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张杰 (4383)

生物膜系统中部分反硝化实现特性 于莉芳, 张兴秀, 张琼, 王晓玉, 彭党聪, 张日霞 (4390)

厌氧推流进水对反硝化除磷好氧颗粒污泥系统的影响 李冬, 曹思雨, 王琪, 张杰 (4399)

不同好氧/缺氧时长联合分区排泥优化生活污水短程硝化反硝化除磷颗粒系统运行 王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (4406)

中国西南地区金属矿开采对矿区土壤重金属影响的 Meta 分析 张健琳, 瞿明凯, 陈剑, 杨兰芳, 赵永存, 黄标 (4414)

青藏高原典型流域土壤重金属分布特征及其生态风险评价 杜昊霖, 王莺, 王劲松, 姚玉璧, 周悦, 刘晓云, 芦亚玲 (4422)

电子垃圾拆解区土壤-农作物系统中镉元素的空间分布特征及其风险评价 张璐瑶, 赵科理, 傅伟军 (4432)

改性生物炭特性表征及对冶炼厂周边农田土壤铜镉形态的影响 王鑫宇, 孟海波, 沈玉君, 王佳锐, 张曦, 丁京涛, 周海宾, 李春燕, 程琼仪 (4441)

组配改良剂联合锌肥对土壤-水稻系统镉迁移转运的影响 周坤华, 周航, 王子钰, 刘雅, 刘佳伟, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4452)

不同结构改良剂对铜镉污染土壤水稻生长和重金属吸收的影响 魏玮, 李平, 郎漫 (4462)

1 株草螺属植物内生菌 R-13 的分离鉴定及对龙葵吸收土壤镉的影响 鹿杰, 刘月敏, 黄永春, 王常荣, 刘斌, 刘仲齐, 黄益宗, 黄雁飞, 张长波 (4471)

不同地区土壤古菌群落对重金属污染的响应 李雨桐, 杨杉, 张艺, 范例, 刘坤, 张晟 (4481)

高通量测序分析黄土高原退耕还林区土壤细菌群落特征 刘晓华, 魏天兴 (4489)

餐厨垃圾生物发酵液对黄土丘陵区土壤质量的影响试验 邵立明, 任俊达, 吕凡, 章骅, 何晶晶 (4500)

秦岭不同海拔土壤团聚体稳定性及其与土壤酶活性的耦合关系 马震菲, 胡汗, 李益, 郭鑫鑫, 任成杰, 赵发珠 (4510)

电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化 Cr(VI) 及机制 廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚 (4520)

降水变化对荒漠草原土壤呼吸的影响 蒿廉伊, 张丽华, 谢忠奎, 赵锐锋, 王军锋, 郭亚飞, 高江平 (4527)

氮肥分施次数及硝化抑制剂对盆栽玉米 N₂O 排放的影响 符佩娇, 吉恒宽, 何秋香, 汤水荣, 王鸿浩, 伍延正, 孟磊 (4538)

负载 NH₄⁺-N 生物炭对土壤 N₂O-N 排放和 NH₃-N 挥发的影响 马晓刚, 何建桥, 陈玉蓝, 李德天, 刘川, 董建新, 郑学博 (4548)

微塑料添加对橘园土壤有机碳矿化的影响 张秀玲, 鄢紫薇, 王峰, 王玺, 徐晗, 胡荣桂, 严昶, 林杉 (4558)

1985~2019 年中国全氟辛烷磺酰基化合物的动态物质流分析 王佳钰, 陈景文, 唐伟豪, 崔蕴晗, 王中钰, 宋国宝, 陈伟强 (4566)

《环境科学》征订启事(4201) 《环境科学》征稿简则(4340) 信息(4382, 4537, 4565)

秦岭不同海拔土壤团聚体稳定性及其与土壤酶活性的耦合关系

马寰菲¹, 胡汗¹, 李益¹, 郭垚鑫², 任成杰³, 赵发珠^{1*}

(1. 西北大学城市与环境学院, 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127; 2. 西北大学生命科学学院, 西安 710127; 3. 西北农林科技大学农学院, 杨凌 712100)

摘要: 为探究土壤团聚体稳定性在海拔上的变化规律及其影响因子, 在太白山选取 3 个不同海拔的 0~10 cm 表层土壤为对象, 测定并分析其土壤团聚体分布、土壤理化性质、微生物量和胞外酶等相关因子的变化特征。结果表明: ①土壤团聚体平均重量直径(MWD)在锐齿栎林、辽东栎林和红桦林这 3 个海拔梯度上的值分别为 2.17 mm、1.83 mm 和 1.82 mm; 几何平均直径(GMD)分别为 1.66 mm、1.39 mm 和 1.32 mm, 表明土壤团聚体稳定性随海拔的上升而减弱; ②土壤团聚体稳定性在海拔上的变化主要受到了土壤胞外酶活性的影响, 其中, 中团聚体的乙酰氨基葡萄糖酶(NAG)和微团聚体的 β -葡萄糖苷酶(BG)是主要影响因子; ③微生物通过调节胞外酶的相对产量和改变元素利用效率使高海拔的 N 限制状况得以改善, 也会影响土壤团聚体稳定性在海拔上的变化。本研究结果对于太白山森林生态系统的土壤质量评价和生态环境的保护具有重要意义。

关键词: 海拔; 团聚体稳定性; 酶活性; 微生物养分限制; 元素利用效率

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)09-4510-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202101236

Stability of Soil Aggregates at Different Altitudes in Qinling Mountains and Its Coupling Relationship with Soil Enzyme Activities

MA Huan-fei¹, HU Han¹, LI Yi¹, GUO Yao-xin², REN Cheng-jie³, ZHAO Fa-zhu^{1*}

(1. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2. College of Life Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China; 3. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: To explore changes in soil aggregate stability along an elevation gradient, and its regulating factors, soil samples were taken from the 0-10 cm surface layer at 3 different elevations on Taibai Mountain. We measured and analyzed the distribution of soil aggregates, physical and chemical properties, microbial biomass, and extracellular enzymes. The results showed that: ① the soil aggregates from the 3 elevations had mean weight diameters (MWD) of 2.17 mm, 1.83 mm, and 1.82 mm (increasing elevation), and geometric mean diameters (GMD) of 1.66 mm, 1.39 mm, and 1.32 mm, respectively. ② The change in soil aggregate stability along an elevation gradient was regulated by extracellular enzymes in the soil, in particular, the LAP in soil meso-aggregate and the BG in soil micro-aggregate. ③ Microorganisms can alleviate the N limitation at high elevations by adjusting the relative production of extracellular enzymes and altering nutrient utilization efficiency, which also changes soil aggregate stability along an elevation gradient. The results of this study have important scientific significance for soil quality evaluation and ecological environment protection in Taibai Mountain.

Key words: altitude; aggregate ability; enzyme activity; microbial nutrient limitation; element use efficiency

森林土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库, 约占全球土壤碳库的 40%, 因此即使森林 SOC 库发生微小的变化, 都会对大气 CO₂ 含量和全球碳平衡产生深远影响^[1,2]. 土壤团聚体作为土壤重要的组成部分和土壤结构的基本单位, 可以在 SOC 和土壤微生物之间形成空间隔离^[3], 从而减少微生物对 SOC 的分解利用并降低土壤 CO₂ 的排放. 此外, 土壤团聚体还具有维持土壤孔隙、减少侵蚀、防止水土流失^[4] 和影响微生物群落结构^[5] 等作用, 其稳定性是衡量土壤质量以及土壤结构和土壤可持续利用的重要指标^[6]. 因此探究森林土壤团聚体的稳定性对降低森林土壤的 CO₂ 排放, 增加其固碳能力具有重要意义.

在森林生态系统中, 土壤团聚体稳定性很大程度上受海拔梯度、植被类型和微生物等因素影响^[3]. 海拔梯度作为一种自然地理变化, 对植被带谱分布、土壤理化性质以及微生物组成等都有影响^[7,8]. Zhu 等^[9] 在四川雪宝顶山研究发现, 高海拔呈现出较高的土壤团聚体稳定性; 而 Murugan 等^[10] 和吴梦瑶等^[7] 分别在阿尔卑斯山和贺兰山的研究中发现, 中海拔具有较高的土壤团聚体稳定性,

收稿日期: 2021-01-25; 修订日期: 2021-03-11

基金项目: 青海省 2021 年度第一批中央引导地方科技发展专项 (2021ZY002); 教育部“春晖计划”合作科研项目

作者简介: 马寰菲(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤生态学, E-mail: mahuanfei@stumail.nwu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: zhaofazhu@nwu.edu.cn

其稳定性具有随着海拔呈先增高后降低的趋势。因此, 学者们对于土壤团聚体稳定性在不同海拔之间的研究还存在有结果的不一致性。并且, 关于土壤团聚体稳定性随海拔变化的调控因子尚未达成共识。因为其不仅受土壤理化性质(如土壤温度、湿度)^[11]和植被群落^[12]的影响, 还受多种微生物活动的影响, 如微生物生物量、胞外酶活性和微生物养分利用率^[13,14]。国内外学者就土壤有机质对团聚体稳定性的影响已做了大量的研究工作, 王兴等^[15]和 Deng 等^[16]的研究结果均表明土壤团聚体稳定性与有机质水平的高低密切相关, 而多项研究表明生物变量(如微生物量和胞外酶)在土壤团聚体的形成和稳定性中起重要作用^[14,17]。因此, 在海拔梯度上开展团聚体稳定性及影响因素的研究显得重要而迫切, 这对于研究森林土壤有机碳的储存和提高土壤可持续发展具有重要意义。

秦岭林区作为我国重要的生态屏障, 是我国南北气候的天然分界线和长江、黄河的分水岭, 也是我国暖温带森林系统的典型代表。尤其秦岭主峰太白山林区不仅垂直植被带谱分布完整、跨度大, 且生物多样性丰富、植被固碳功能潜力巨大, 在中国森林碳

汇中占有重要地位, 为温室气体减排提供重要保障, 也为人们开展森林土壤团聚体稳定性机制的研究提供天然的试验平台^[18]。鉴于此, 本文选择太白山不同海拔梯度的锐齿栎林、辽东栎林和红桦林(1 503 ~ 2 451 m)这 3 种典型植被下的土壤为研究对象, 阐明土壤团聚体稳定性在海拔上的变化规律及其影响因子, 探究不同粒级的团聚体的胞外酶对土壤团聚体稳定性的潜在影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

秦岭是我国南北气候的天然分界线, 是我国重要的生态屏障。其主峰太白山位于秦岭山脉中部(33°45' ~ 34°10'N, 107°19' ~ 107°58'E), 海拔 3 767.2 m。太白山属温带季风气候, 年平均气温 11.4℃, 年平均降水量 910.6 mm, 降水主要集中在 7 ~ 9 月。太白山植被垂直带谱分布完整且跨度大, 植被类型丰富, 不同典型垂直植被林带以锐齿栎林(1 253 ~ 1 856 m)、辽东栎林(1 900 ~ 2 265 m)、桦木林(2 356 ~ 2 500 m)、冷杉林(2 800 ~ 3 000 m)和落叶松(3 000 ~ 3 400 m)为主。样地基本信息见表 1。

表 1 样地基本信息

Table 1 Basic information of the plot

编号	海拔/m	植被类型	经度(E)	纬度(N)	土壤类型	土层/cm
I	1 503	锐齿栎林	107°41'31"	34°04'32"	灰棕壤	0 ~ 10 cm
II	1 915	辽东栎林	107°41'39"	34°03'30"	灰棕壤	0 ~ 10 cm
III	2 405	红桦林	107°42'21"	34°02'51"	灰棕壤	0 ~ 10 cm

1.2 土壤样品采集

2019 年 7 月, 在太白山锐齿栎(1 503 m)、辽东栎(1 915 m)和红桦(2 405 m)这 3 个植被带上选取地形、地貌、坡度和坡向等基本一致的标准样地(每个植被带 3 个重复样地), 每个样地内设 3 个样方(20 m × 20 m), 共设 9 个样地 27 个样方。去除地表凋落物和腐殖层后, 采用 S 型 10 点采样法采集各样方表层(0 ~ 10 cm)土壤, 将同一样方内 10 个土壤样品均匀混合后装入土壤袋中, 立即放置在便携式冷藏箱内。将上述样品带回实验室后, 剔除石块、根系和动植物残体等杂物, 碾压过 2 mm 筛后分成两部分, 一部分土壤鲜样置于 4℃ 冰箱保存, 一周内进行土壤酶活性和微生物量测定。其余土壤自然风干, 测定其他土壤理化性质。

同时, 采集各样方内表层(0 ~ 10 cm)原状土壤, 装入铝盒带回实验室, 按照土壤自然纹理轻柔掰开, 剔除石块、根系和动植物残体等, 全部过 8 mm 筛并将同一样地样品混合。采用干筛法将土壤筛分为大团聚体(> 2 mm), 中团聚体(0.25 ~ 2 mm)与

微团聚体(< 0.25 mm)3 个等级。将筛分后的各团聚体土壤一部分放于 4℃ 冰箱保存, 一周内进行土壤酶活性和微生物量测定; 其余部分自然风干, 测定其他土壤理化性质。

1.3 植物信息采集

在每个植被带调查样方(20 m × 20 m)内观测记录包括乔木层、灌木层和草本层植物。记录样方内出现的全部乔木种, 测量所有 DBH ≥ 3 cm 植株高度和胸径; 于乔木层样方设置 2 个 10 m × 10 m 的对角小样方进行灌木层调查, 记录样方内出现的全部灌木种, 对其中的全部灌木分别计数, 并测量基径和高度; 于乔木层样方的中心和四角位设置 5 个 1 m × 1 m 的草本层小样方, 记录样方内出现的所有草本种类, 记录每种草本植物的多度、频度、高度和盖度。

1.4 样品测定

土壤有机碳(SOC)的测定采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法^[19], 土壤全氮(TN)和全磷(TP)分别经 H₂SO₄ 和 H₂SO₄-HClO₄ 消解后, 利用 AA3 型连续流

动分析仪测定 (Bran + Luebbe A4111, 德国)^[20], 土壤微生物量 (MBC、MBN、MBP) 采用氯仿熏蒸-硫酸钾浸提法^[21,22], 参照 Saiya-Cork 等^[23] 描述的 96 微孔板荧光法测量土壤中 β -葡萄糖苷酶 (β -glucosidase, EC 3.2.1.21, BG)、 β -N-乙酰氨基葡萄糖酶 (β -N-Acetyl-glucosaminidase, EC 3.2.1.52, NAG)、亮氨酸氨基肽酶 (Leucine arylamidase, LAP) 和酸性磷酸酶 (Acid phosphatase, EC 3.1.3.2, ACP) 的活性, 利用多功能酶标仪 (Tecan Infinite M200, 奥地利) 检测荧光值。

1.5 数据分析

采用物种丰富度 (species richness)、Shannon-Wiener 多样性指数和 Simpson 多样性指数对不同海拔的植被多样性进行分析, 计算公式如下。

物种丰富度 (S): 出现在样方内的物种数

Shannon-Wiener 多样性指数 (H):

$$H = -\sum_{i=1}^S (P_i \ln P_i)$$

Simpson 多样性指数 (P):

$$P = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$$

式中, P_i 为第 i 个物种的个体数占所有物种个体数的百分比。

土壤微生物群落和土壤资源 (SOC、TN、TP) 间的关系是通过土壤 C:N (C:P) 与微生物量 C:N (C:P) 的比率计算的。为评估不同海拔微生物 C:N, C:P 稳态 (H'), 使用以下方程式^[24]:

$$H' = 1/m$$

式中, m 为土壤资源 $\ln(\text{SOC}:\text{TN})$ 与微生物 $\ln(\text{MBC}:\text{MBN})$ 的斜率或土壤资源 $\ln(\text{SOC}:\text{TP})$ 与微生物 $\ln(\text{MBC}:\text{MBP})$ 的斜率。当 $H' \gg 1$ 或拟合结果不显著 ($P > 0.05$) 时, 土壤微生物群落呈现强稳态, 而当 $H' \approx 1$ 时, 呈现弱稳态。

为了探索不同海拔下的微生物如何调节元素利用效率, 使用了以下方程式计算元素阈值 (Ter C:N 和 Ter C:P), 将测定的微生物量和胞外酶活性联系起来, 阐明土壤当前的养分限制^[25]:

$$\text{Ter C:N} = \left(\frac{\text{BG}}{\text{LAP} + \text{NAG}} \times \frac{\text{MBC}}{\text{MBN}} \right) / e^{n_0}$$

$$\text{Ter C:P} = \left(\frac{\text{BG}}{\text{ACP}} \times \frac{\text{MBC}}{\text{MBP}} \right) / e^{n_0}$$

式中, BG 为 β -葡萄糖苷酶的酶活性, LAP 为亮氨酸氨基肽酶的酶活性, NAG 为 β -N-乙酰氨基葡萄糖酶的酶活性, ACP 为酸性磷酸酶的酶活性, MBC、MBN 和 MBP 分别表示微生物量碳、微生物量氮和微生物量磷含量。 n_0 表示 $\ln \text{BG}$ 对 $\ln(\text{LAP} + \text{NAG})$ 的标准主轴回归分析 (standardized major axis,

SMA) 所得到方程的截距, p_0 表示 $\ln \text{BG}$ 对 $\ln \text{ACP}$ 的标准主轴回归分析所得到的方程截距。标准主轴回归分析在 Rstudio 中完成。

土壤团聚体稳定性指标选取平均重量直径 (mean weight diameter, MWD), 几何平均直径 (geometric mean diameter, GMD)^[26]。

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n x_i \times w_i$$

$$\text{GMD} = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n w_i \times \ln x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right]$$

式中, x_i 为第 i 级团聚体平均直径 (mm), w_i 为第 i 级团聚体所占质量分数。

偏最小二乘法路径模型 (partial least squares path models, PLS-PM) 是一种研究观测变量的数据分析方法, 该方法对样本数量要求低且具备高水平统计能力^[27], 因此应用 PLS-PM 探究土壤团聚体稳定性指标 MWD 和 GMD 与土壤理化性质、微生物生物量、胞外酶活性及其化学计量比、元素阈值间的关系。

利用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 检验不同海拔混合土壤和团聚体酶活性、酶活性计量比、团聚体稳定性和元素阈值的差异, 利用逐步回归探究团聚体酶活性对团聚体稳定性的驱动因子, 所有分析处理在 SPSS 19.0 中进行, 用 Origin 8.5 软件作图。

2 结果与分析

2.1 秦岭海拔梯度上土壤理化性质及植被群落特征

土壤有机碳、全氮和全磷含量在海拔梯度上变化特征基本一致 (表 2), 均随着海拔升高而显著增加 ($P < 0.05$)。土壤 C:N、C:P、N:P、容重和 pH 均表现为海拔梯度 I 显著大于 III ($P < 0.05$), 相反, 土壤含水率表现为海拔梯度 III 显著大于海拔梯度 I ($P < 0.05$)。不同海拔植被群落特征见表 3。

2.2 秦岭海拔梯度土壤酶活性及计量比值变化

BG、NAG 和 ACP 酶活性在海拔梯度上的变化趋势基本一致, 均为海拔梯度 I 显著大于 II 和 III, 其中 BG 酶活性 I 分别显著大于 II 116.14% ($P < 0.05$, 95% CI: 84.32% ~ 147.96%) 和 III 101.16% ($P < 0.05$, 95% CI: 71.55% ~ 130.78%); NAG 酶活性 I 分别显著大于 II 249.11% ($P < 0.05$, 95% CI: 211.23% ~ 286.98%) 和 III 319.93% ($P < 0.05$, 95% CI: 274.37% ~ 365.49%); ACP 酶活性 I 分别

表 2 不同海拔的土壤理化性质¹⁾

Table 2 Physical and chemical properties of soil at different altitudes

土壤理化性质	海拔梯度		
	I	II	III
有机碳/g·kg ⁻¹	47.41 ± 2.81c	58.11 ± 2.07b	62.63 ± 0.52a
全氮/g·kg ⁻¹	2.49 ± 0.09c	3.12 ± 0.11b	3.96 ± 0.07a
全磷/g·kg ⁻¹	0.38 ± 0.01c	0.61 ± 0.01b	0.86 ± 0.03a
碳氮比	19.01 ± 1.09a	18.61 ± 0.39a	15.79 ± 0.18b
碳磷比	121.99 ± 7.00a	94.00 ± 3.73b	72.74 ± 1.75c
氮磷比	6.42 ± 0.23a	5.06 ± 0.25b	4.60 ± 0.06b
容重/g·cm ⁻³	1.45 ± 0.04a	1.06 ± 0.02b	1.03 ± 0.01b
含水率/%	25.96 ± 2.21b	25.50 ± 1.54b	36.27 ± 2.46a
pH	6.06 ± 0.03a	5.98 ± 0.05ab	5.87 ± 0.01b

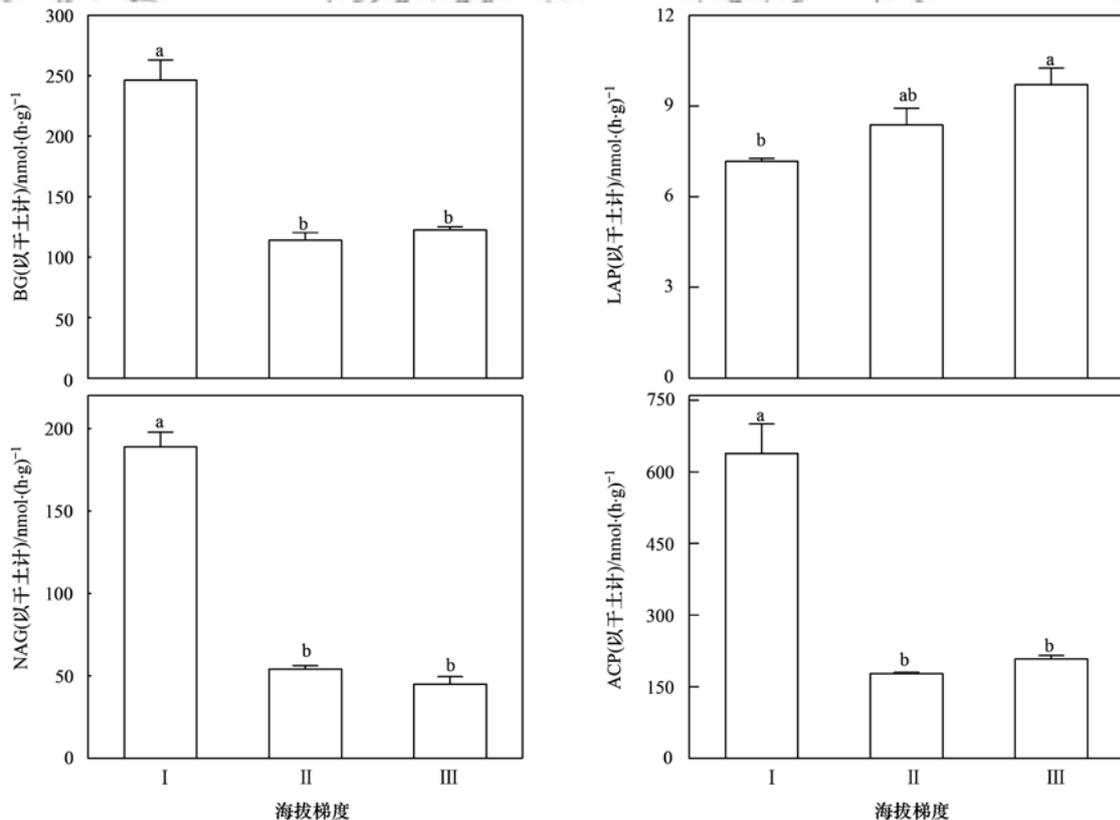
1) 海拔梯度 I 为锐齿栎林, 1 503 m, 海拔梯度 II 为辽东栎林, 1 915 m, 海拔梯度 III 为红桦林, 2 405 m; 不同小写字母代表海拔间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

表 3 不同海拔的植被群落特征

Table 3 Characteristics of vegetation communities at different altitudes

植被多样性	海拔梯度		
	I	II	III
丰富度	8.00 ± 0.58b	10.00 ± 0.58a	6.00 ± 0.58c
乔木 Simpson 指数	0.32 ± 0.02a	0.21 ± 0.02b	0.35 ± 0.01a
Shannon 指数	1.37 ± 0.04b	1.69 ± 0.06a	1.20 ± 0.01c
丰富度	8.00 ± 0.58c	12.00 ± 0.58b	15.00 ± 0.58a
灌木 Simpson 指数	0.24 ± 0.01a	0.17 ± 0.02b	0.12 ± 0.01b
Shannon 指数	1.49 ± 0.03b	1.98 ± 0.02a	2.08 ± 0.08a
丰富度	16.00 ± 0.58a	9.00 ± 0.58c	13.00 ± 0.58b
草本 Simpson 指数	0.16 ± 0.01c	0.24 ± 0.01a	0.20 ± 0.01b
Shannon 指数	2.05 ± 0.04a	1.69 ± 0.05c	1.88 ± 0.01b

显著大于 II 260.06% ($P < 0.05$, 95% CI: 190.11% ~ 330.01%) 和 III 206.89% ($P < 0.05$, 95% CI: 147.27% ~ 266.51%)。而 LAP 酶活性表现为 III 显著大于 I 35.49% ($P < 0.05$, 95% CI: 13.54% ~ 57.44%), 在 I 和 II ($P > 0.05$, 95% CI: 4.93% ~ 31.53%) 或 II 和 III ($P > 0.05$, 95% CI: 1.91% ~ 26.03%) 之间差异性不显著 (图 1)。土壤酶活性计量比在不同海拔间都具有显著差异 ($P < 0.05$)。总体上来说, 海拔梯度 III 具有相对较高 BG: (NAG + LAP) 值、BG: ACP 值和相对较低的 (NAG + LAP):

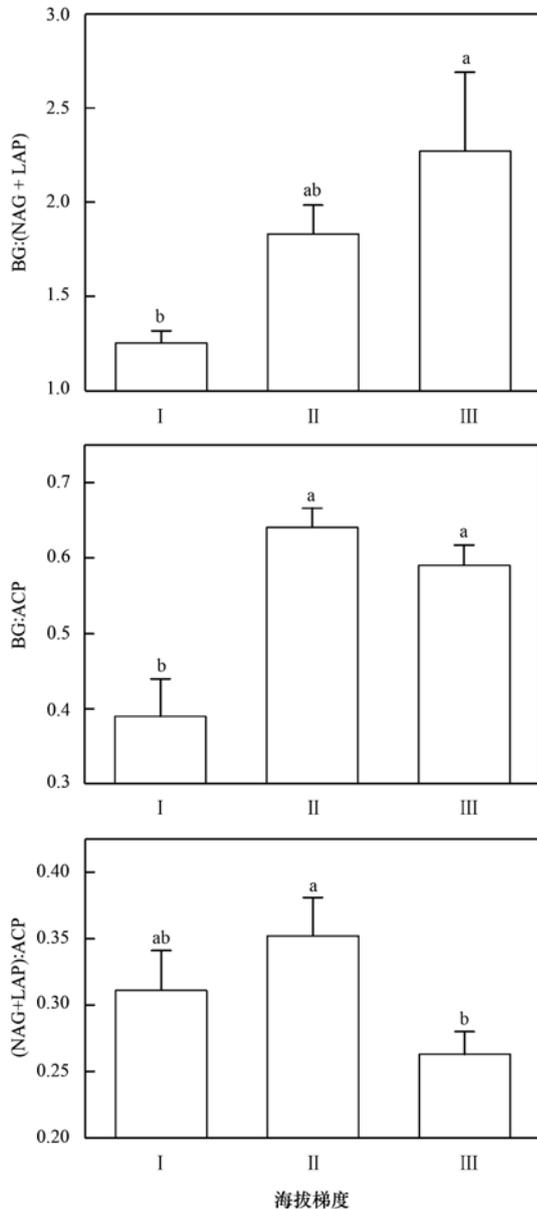


海拔梯度 I 为锐齿栎林, 1 503 m, 海拔梯度 II 为辽东栎林, 1 915 m, 海拔梯度 III 为红桦林, 2 405 m; 不同小写字母代表海拔间差异显著 ($P < 0.05$), 下同; BG 表示 β -1,4-葡萄糖苷酶, NAG 表示 β -1,4-N-乙酰葡萄糖氨糖苷酶, LAP 表示亮氨酸氨基肽酶, ACP 表示酸性磷酸酶

图 1 不同海拔土壤酶活性

Fig. 1 Soil enzyme activities at different altitudes

ACP 值; 而海拔梯度 I 具有相对较低的 BG:(NAG + LAP) 值、BG: ACP 值和相对较高的 (NAG + LAP): ACP 值(图 2).



BG:(NAG + LAP) 表示碳氮比, BG: ACP 表示碳磷比, (NAG + LAP): ACP 表示氮磷比

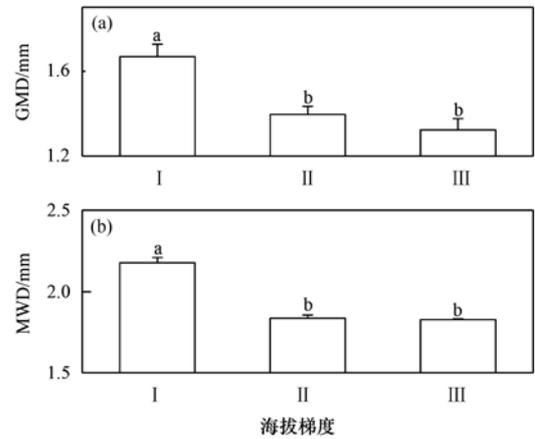
图 2 不同海拔土壤酶活性比差异

Fig. 2 Variation of soil enzymatic ratios at different altitudes

2.3 秦岭海拔梯度上土壤团聚体稳定性及影响因素

土壤团聚体稳定性指标 GMD 在海拔梯度 I、II 和 III 上分别为 1.66 mm、1.39 mm 和 1.32 mm; MWD 在海拔梯度 I、II 和 III 上分别为 2.17 mm、1.83 mm 和 1.82 mm; 二者均表现为海拔梯度 I 显著大于 II 和 III ($P < 0.05$, 图 3). 稳态分析结果表明, 在海拔梯度上, $\ln(\text{SOC}:\text{TN})$ 与 $\ln(\text{MBC}:\text{MBN})$ 和 $\ln(\text{SOC}:\text{TP})$ 与 $\ln(\text{MBC}:\text{MBP})$ 之间存在 H' 大于 1 或不显著相关性(表 4). 对微生物养分限制而言, 海拔

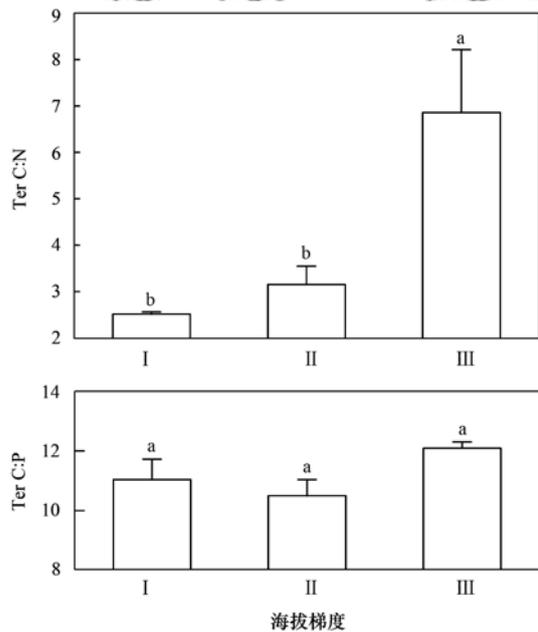
梯度 III 的元素阈值 Ter C:N 为 6.54, 显著高于 I 的 2.51 和 II 的 3.15 ($P < 0.05$), 而海拔梯度 I、II 和 III 的 Ter C:P 分别为 11.03、10.49 和 12.08, 三者 Ter C:P 的差距未达到显著水平 ($P > 0.05$, 图 4).



(a) GMD 表示几何平均直径, (b) MWD 表示平均重量直径

图 3 不同海拔的团聚体稳定性指标

Fig. 3 Stability index of aggregates at different altitudes



Ter C:N 表示碳氮阈值元素比, Ter C:P 表示碳磷阈值元素比

图 4 不同海拔的元素阈值 (Ter C:N 和 Ter C:P)

Fig. 4 Threshold elemental ratio at different altitudes

本研究的结果表明乔木、灌木和草本多样性在海拔上的变化不会显著影响土壤团聚体稳定性在海拔上的变化 ($P > 0.05$, 表 5). 偏最小二乘路径模型 (partial least squares path models, PLS-PM) 结果表明, 海拔梯度的变化不会直接显著影响土壤团聚体稳定性, 但会通过影响土壤理化性质、微生物量和胞外酶活性等环境因子间接影响土壤团聚体稳定性. 其中, 土壤团聚体稳定性指标与土壤理化性质 (SOC、C:N 和 C:P, 路径系数为 -0.176) 和元素阈值 (路径系数为 -0.725) 呈负相关关系, 与微生物

表 4 不同海拔土壤微生物群落水平上 C:N 和 C:P 的化学计量稳态¹⁾

Table 4 Stoichiometric steady state of C:N and C:P at the level of soil microbial communities at different altitudes

稳态	植被带	回归方程	R ²	P	H'
C:N	锐齿栎	y = 0.283x + 0.924	0.085	0.41	—
C:N	辽东栎	y = 0.597x - 0.419	0.771	<0.01*	1.68
C:N	红桦	y = 0.133x + 1.521	0.003	0.88	—
C:P	锐齿栎	y = 0.898x + 0.087	0.280	0.12	—
C:P	辽东栎	y = -0.045x + 5.027	0.039	0.59	—
C:P	红桦	y = 0.400x + 3.321	0.525	0.01*	2.50

1) y 表示 ln(SOC:TN) 或 ln(SOC:TP), x 表示 ln(MBC:MBN) 或 ln(MBC:MBP); * 表示回归方程拟合显著 (P < 0.05); “—” 表示因为回归方程拟合不显著 (P > 0.05), H' 无意义

表 5 植物群落特征与土壤团聚体稳定性的相关性分析¹⁾

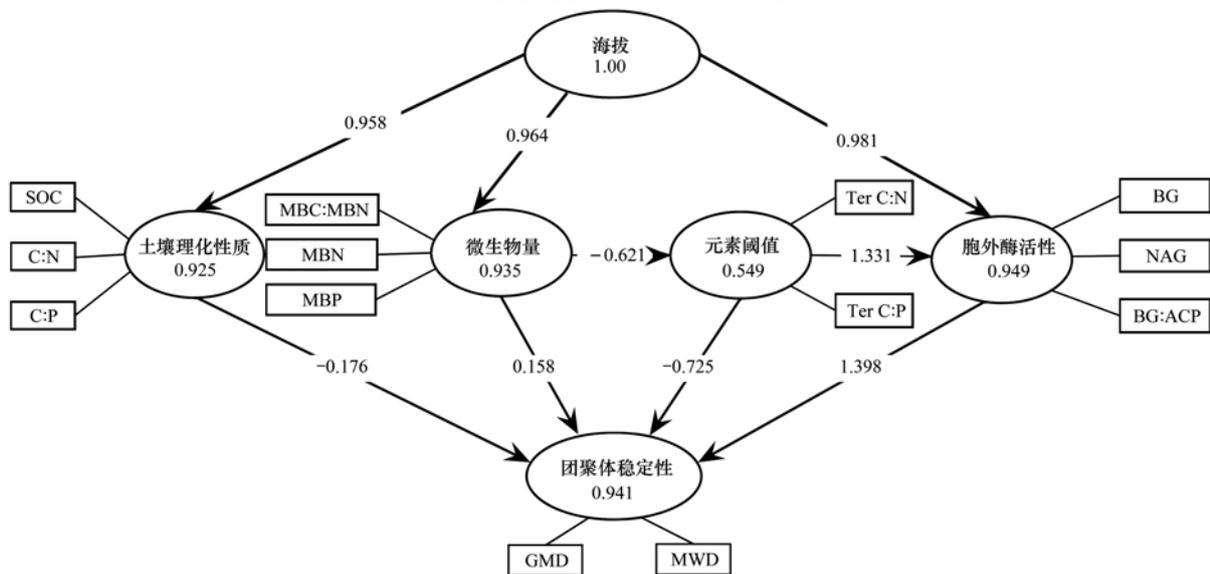
Table 5 Correlation analysis of plant community characteristics and soil aggregate stability

项目	乔木			灌木			草本		
	丰富度	Simpson 指数	Shannon 指数	丰富度	Simpson 指数	Shannon 指数	丰富度	Simpson 指数	Shannon 指数
GMD	0.022	0.292	-0.152	-0.914	0.919	-0.991	0.809	-0.855	0.837
MWD	0.201	0.116	0.028	-0.972	0.975	-0.999*	0.691	-0.748	0.726

1) GMD 表示土壤团聚体几何平均直径, MWD 表示土壤团聚体平均重量直径

量 (MBN、MBP 和 MBC:MBN, 路径系数为 0.158) 和胞外酶活性 [BG、NAG、BG:ACP 和 (NAG + LAP):ACP, 路径系数为 1.398] 均呈正相关关系。此

外, 元素阈值除对团聚体稳定性有直接影响外, 也通过影响胞外酶活性而间接影响团聚体稳定性 (路径系数为 1.331, 图 5)。



椭圆内数字表示 R²; 箭头上数字表示正 (正数) 或负 (负数) 影响的路径系数; 土壤理化性质指有机碳、碳氮比和碳磷比; 微生物量指微生物量氮、微生物量磷和微生物量碳氮比; 元素阈值指 Ter C:N 和 Ter C:P; 胞外酶活性指 BG、NAG 和 BG:ACP

图 5 土壤团聚体稳定性驱动因素的偏最小二乘路径模型

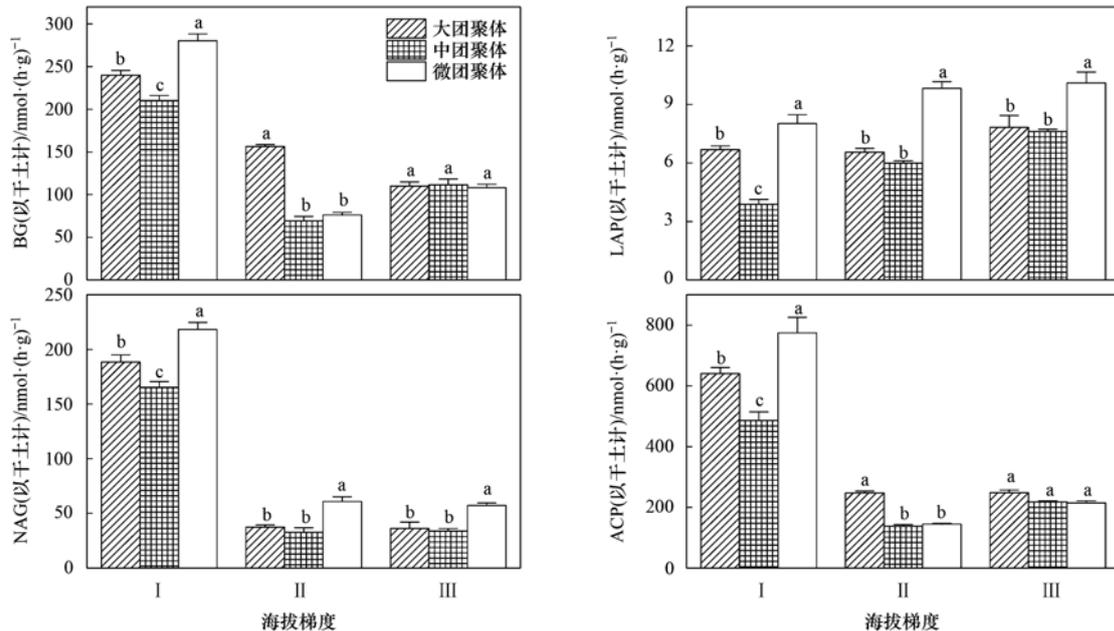
Fig. 5 Partial least squares path models (PLS-PM) of the drivers of soil aggregate stability

团聚体分级对土壤酶活性有显著影响。总体来说, 微团聚体酶活性显著高于大团聚体和中团聚体 (图 6)。2.2 节的分析结果表明, 酶活性是影响土壤团聚体稳定性的重要环境因子。因此本节进一步探究团聚体酶对 GMD 和 NWD 的影响。逐步回归结果表明 (表 6), 土壤团聚体稳定性指标 GMD、MWD 与中团聚体 NAG 酶活性和小团聚体 BG 酶活性呈极显著相关 (P < 0.01)。

3 讨论

3.1 土壤理化性质及团聚体稳定性沿海拔梯度差异性

本研究的结果表明, 土壤有机碳、全氮和全磷含量随着海拔的升高而增加 (表 2), 这与李丹维等^[28]的研究结果一致。这主要是由于随着海拔的升高, 温度降低, 微生物活动减弱, 土壤有机碳全氮矿化速率



BG 表示 β -1,4-葡萄糖苷酶, NAG 表示 β -1,4-N-乙酰葡萄糖苷酶, LAP 表示亮氨酸氨基肽酶, ACP 表示酸性磷酸酶

图 6 不同海拔土壤团聚体酶活性

Fig. 6 Soil aggregate enzyme activity at different altitudes

表 6 土壤团聚体酶活性对土壤团聚体稳定性的逐步回归方程¹⁾

Table 6 Stepwise regression equation of the relationship between soil aggregate enzyme activity and soil aggregate stability

回归方程	R^2	$P < 0.01$
$GMD = 0.000NAG2 + 0.000BG3 + 1.397$	> 0.99	中团聚体乙酰葡萄糖苷酶、微团聚体葡萄糖苷酶
$MWD = 0.000NAG2 + 1.744$	> 0.99	中团聚体乙酰葡萄糖苷酶

1) GMD 表示几何平均直径, MWD 表示平均重量直径, NAG2 表示中团聚体乙酰葡萄糖苷酶, BG3 表示微团聚体葡萄糖苷酶; 0.000 表示值小于 0.001

减慢,动植物残体分解速率减缓,使得土壤中有机碳和全氮累积量增加^[29]. 土壤团聚体稳定性结果表明,低海拔(海拔梯度 I)土壤团聚体稳定性显著高于高海拔土壤团聚体稳定性(图 3),该研究结果与 Zhu 等^[9]在四川雪宝顶山得出的结果相反. 出现这种相异结果的原因一方面可能是由于研究区域的气候、纬度等方面存在差异,另一方面也有可能是不同土壤微生物的群落构成、养分限制等引起的. 土壤团聚体稳定性的影响因素复杂多样,需综合考虑影响因素.

3.2 海拔梯度上土壤酶活性变化特征

本研究中土壤碳获取酶(BG)、氮获取酶(NAG + LAP)和磷获取酶(ACP)的活性随着海拔升高而降低(图 2),这与笔者以前的研究结果一致^[30]. 值得注意的是, NAG 和 LAP 同属于氮获取酶,但二者对海拔的响应却截然不同(图 1). 对此,本研究提出了两种可能的解释. 第一,根据 Michaelis-Menten 理论,胞外酶的活性取决于底物的可利用性^[12,31]. NAG 主要在几丁质和其他 β -1,4-连接的葡糖胺聚合物中起作用,而 LAP 主要水解多肽氮末端的亮氨

酸和其他疏水氨基酸^[32]. 由于两种 N 获取酶水解的底物不同,微生物群落的策略也随之改变,即低海拔的土壤更倾向可以产生 NAG 酶的微生物,而高海拔的土壤更适合可以产生 LAP 酶的微生物. 第二,由海拔梯度引起的土壤微气候^[33,34]、凋落物输入^[35,36]和植物群落组成^[37,38]等的变化都会引起微生物群落的改变,从而导致 NAG 和 LAP 在海拔上存在差异.

3.3 影响土壤团聚体稳定性的因素分析

PLS-PM 表明,土壤团聚体稳定性在海拔上的变化主要受到了土壤胞外酶活性的影响(图 5). 可能的解释是土壤微生物作为土壤团聚体形成最活跃的生物因素^[6],其生产的胞外酶活性可以指示微生物群落结构和养分需求的变化^[25]. 具体而言,低海拔土壤可能通过增加微生物量和多样性、根系生物量和分泌物、菌根菌丝体及其分泌的多糖类物质等多方面促进团聚体间的黏结作用,从而提高团聚体稳定性^[39].

微生物群落对养分的需求在海拔上的变化(即元素阈值 Ter 的变化)将通过调控胞外酶的产生,来

间接地影响土壤团聚体稳定性在海拔上的变化趋势. 生态化学计量理论 (ecological stoichiometry theory, EST) 表明, 胞外酶的产生极大程度上受到微生物群落的养分限制的影响, 这是由于土壤养分 (如 SOC、TN 和 TP) 存在海拔上的空间分布差异 (表 2), 导致不同海拔的微生物将采取不同的策略调整其群落结构和功能, 以达到适应这种差异^[40-42]. 具体来说, 微生物有以下 3 种方式来进行调整: ①微生物通过储存过量养分或改变群落中优势物种进行调整^[43,44]. 这种调整取决于微生物群落的物种分布和生长速率, 使微生物群落趋向弱稳态或稳态^[45]. 稳态分析表明, 在海拔梯度上, $\ln(\text{SOC}:\text{TN})$ 与 $\ln(\text{MBC}:\text{MBN})$ 和 $\ln(\text{SOC}:\text{TP})$ 与 $\ln(\text{MBC}:\text{MBP})$ 之间存在 H' 大于 1 或无显著相关性 (表 4), 这表明在本研究区域内 3 个海拔在微生物群落水平 C:N 和 C:P 均处于稳态. 因此, 笔者认为本研究中没有发生此类调整. 即微生物群落稳态在海拔上的变化不会影响土壤团聚体稳定性在海拔上的变化. ②微生物通过调节其胞外酶的产量来进行调整^[25,46,47]. 由于胞外酶的产生需要消耗能量和氮, 因此只有当调整后的收益远大于其调整成本, 才会发生这类调整. 本研究的结果表明, BG:(NAG+LAP) 平均值分别为 1.25、1.83 和 2.27, 这意味着高海拔土壤具有相对较低的 N 获取酶活性 (基于全球尺度值 1.41), 这或许从侧面反映了随着海拔的升高, 微生物通过这类调整, N 限制的状况得以改善. 因此, 笔者认为, 本研究中发生了此类调整, 并且在高海拔上, 此类调整更为明显. 这表明, 碳和氮获取酶 (BG、NAG 和 LAP) 的活性在海拔上的变化显著地影响团聚体稳定性在海拔上的变化. ③微生物通过调节自身的生理能力 (例如释放过量元素), 从而改变元素利用率, 以达到调整的目的^[48]. EST 理论表明, 较高的元素阈值 Ter C:N 伴随着更高的 C 利用效率和更低的 N 利用效率^[44,49]. 研究区域内 (1 503 ~ 2 405 m) 随着海拔的上升, SOC/TN 的平均值分别为 24.51、20.70 和 20.99, 而 Ter C:N 的值为 2.51、3.15 和 6.54 (图 4). 表明微生物群落由较高的 N 利用率转变为较高的 C 利用率, 即高海拔微生物群落的 N 限制作用减弱. 因此, 笔者认为, 本研究中也发生了此类调整, 这类调整旨在减少微生物对 N 的限制, 并且这类调整在高海拔更加明显. 这表明, 微生物群落通过调节元素阈值 (Ter C:N) 也会影响土壤团聚体稳定性在海拔上的变化.

值得注意的是, 不同等级团聚体通过控制空气、水分以及有机质的可接触性影响土壤酶活性^[17]. 本研究发现, 土壤微团聚体 (< 0.25 mm) 4 种胞外酶

活性显著高于大团聚体 (> 2 mm) 酶活性 (图 6). 这或许是由于团聚体物理结构差异影响的, 微团聚体孔径较小, 养分和水分通过扩散作用进入的速度较快^[50], 为酶促反应提供更多可利用的基质^[51], 从而增强酶活性; 而大团聚体孔隙大, 团聚体稳定性低, 土壤酶活性易受环境变化影响^[52], 从而导致酶活性降低. 这与雷蕾等^[53] 在三峡库区得出的研究结论一致. 进一步通过逐步回归分析得出, 中团聚体 (0.25 ~ 2 mm) NAG 酶和微团聚体 (< 0.25 mm) BG 酶是影响团聚体稳定性的重要因子 (表 6). 这可能是由于 NAG 酶主要水解几丁质^[32], 而这些物质在中团聚体的形成和稳定性中起重要作用^[7]; BG 酶主要水解纤维素, 而多糖类物质在土壤微团聚体的稳定性中起关键作用, 能增加团聚体的稳定性^[14,54].

4 结论

(1) 本研究反映了秦岭太白山区域不同海拔 (1 503 ~ 2 451 m) 土壤团聚体稳定性指标 GMD 和 MWD 随着海拔的上升而降低, 其在海拔上的变化趋势主要受到土壤胞外酶活性的调控.

(2) 微生物通过调节胞外酶的相对产量和改变元素利用效率来进行调整, 使高海拔的 N 限制状况得以改善, 这种调整也会影响土壤团聚体稳定性在海拔上的变化.

(3) 中团聚体 NAG 酶和微团聚体 BG 酶是影响土壤团聚体稳定性的主要驱动因子, 团聚体的稳定性主要依靠多糖类和疏水氨基酸等物质的胶结作用.

参考文献:

- [1] Davidson E A, Trumbore S E, Amundson R. Biogeochemistry: soil warming and organic carbon content [J]. *Nature*, 2000, **408** (6814): 789-790.
- [2] 陈仕奇, 吕盛, 高明, 等. 缙云山不同林分下土壤有机碳及矿化特征 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(2): 953-960.
Chen S Q, Lü S, Gao M, *et al.* Characteristics of soil organic carbon and mineralization with different stands in Jinyun Mountain [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 953-960.
- [3] Six J, Conant R T, Paul E A, *et al.* Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils [J]. *Plant and Soil*, 2002, **241**(2): 155-176.
- [4] Guo Z C, Zhang Z B, Zhou H, *et al.* The effect of 34-year continuous fertilization on the SOC physical fractions and its chemical composition in a Vertisol [J]. *Scientific Reports*, 2019, **9**(1), doi: 10.1038/s41598-019-38952-6.
- [5] Carrillo-Saucedo S M, Gavito M E. Resilience of soil aggregation and extracellular enzymatic functions associated with arbuscular mycorrhizal fungal communities along a successional gradient in a tropical dry forest [J]. *Mycorrhiza*, 2020, **30**(1): 109-120.
- [6] 王清奎, 汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素 [J]. *土壤通报*, 2005, **36**(3): 415-421.
Wang Q K, Wang S L. Forming and stable mechanism of soil

- aggregate and influencing factors [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, **36**(3): 415-421.
- [7] 吴梦瑶, 陈林, 庞丹波, 等. 贺兰山不同海拔植被下土壤团聚体分布及其稳定性研究[J]. 水土保持学报, 2021, **35**(2): 210-216.
- [8] Bordoloi R, Das B, Yam G, *et al.* Modeling of water holding capacity using readily available soil characteristics [J]. Agricultural Research, 2019, **8**(3): 347-355.
- [9] Zhu M K, Yang S Q, Ai S H, *et al.* Artificial soil nutrient, aggregate stability and soil quality index of restored cut slopes along altitude gradient in southwest China [J]. Chemosphere, 2020, **246**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125687.
- [10] Murugan R, Djukic I, Keiblinger K, *et al.* Spatial distribution of microbial biomass and residues across soil aggregate fractions at different elevations in the Central Austrian Alps [J]. Geoderma, 2019, **339**: 1-8.
- [11] Li G L, Vogel J, He Z L, *et al.* Association of soil aggregation with the distribution and quality of organic carbon in soil along an elevation gradient on Wuyi Mountain in China [J]. PLoS One, 2016, **11**(3), doi: 10.1371/journal.pone.0150898.
- [12] 瞿晴, 徐红伟, 吴旋, 等. 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[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2904-2911.
Qu Q, Xu H W, Wu X, *et al.* Soil aggregate stability and its stoichiometric characteristics in Robinia pseudoacacia forest within different vegetation zones on the Loess Plateau, China [J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2904-2911.
- [13] Steffens M, Kölbl A, Kögel-Knabner I. Alteration of soil organic matter pools and aggregation in semi-arid steppe topsoils as driven by organic matter input [J]. European Journal of Soil Science, 2009, **60**(2): 198-212.
- [14] Six J, Bossuyt H, Degryze S, *et al.* A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics [J]. Soil and Tillage Research, 2004, **79**(1): 7-31.
- [15] 王兴, 钟泽坤, 张欣怡, 等. 长期撂荒恢复土壤团聚体组成与有机碳分布关系 [J]. 环境科学, 2020, **41**(5): 2416-2424.
Wang X, Zhong Z K, Zhang X Y, *et al.* Relationship between the composition of soil aggregates and the distribution of organic carbon under long-term abandoned restoration [J]. Environmental Science, 2020, **41**(5): 2416-2424.
- [16] Deng L, Kim D G, Peng C H, *et al.* Controls of soil and aggregate-associated organic carbon variations following natural vegetation restoration on the Loess Plateau in China [J]. Land Degradation & Development, 2018, **29**(11): 3974-3984.
- [17] Six J, Paustian K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, **68**: A4-A9.
- [18] 唐志尧, 方精云, 张玲. 秦岭太白山木本植物物种多样性的梯度格局及环境解释 [J]. 生物多样性, 2004, **12**(1): 115-122.
Tang Z Y, Fang J Y, Zhang L. Patterns of woody plant species diversity along environmental gradients on Mt. Taibai, Qinling Mountains [J]. Biodiversity Science, 2004, **12**(1): 115-122.
- [19] Nelson D W, Sommers L E. Total carbon, organic carbon, and organic matter [A]. In: Sparks D L, Page A L, Helmke P A, *et al.* (Eds.). Methods of Soil Analysis [M]. Madison: Soil Science Society of America, 1996. 961-1010.
- [20] 钟泽坤, 杨改河, 任成杰, 等. 黄土丘陵区撂荒农田土壤酶活性及酶化学计量变化特征 [J]. 环境科学, 2020, **42**(1): 411-421.
- Zhong Z K, Yang G H, Ren C J, *et al.* Effects of farmland abandonment on soil enzymatic activity and enzymatic stoichiometry in the Loess Hilly Region, China [J]. Environmental Science, 2020, **42**(1): 411-421.
- [21] Brookes P C, Landman A, Pruden G, *et al.* Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1985, **17**(6): 837-842.
- [22] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1987, **19**(6): 703-707.
- [23] Saiya-Cork K R, Sinsabaugh R L, Zak D R. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, **34**(9): 1309-1315.
- [24] Sterner R W, Elser J J. Ecological stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere [M]. Princeton: Princeton University Press, 2002.
- [25] Sinsabaugh R L, Hill B H, Follstad Shah J J. Ecoenzymatic stoichiometry of microbial organic nutrient acquisition in soil and sediment [J]. Nature, 2009, **462**(7274): 795-798.
- [26] Kemper W D, Koch E J. Aggregate stability of soils from western United States and Canada: measurement procedure, correlations with soil constituents [R]. Washington: USDA, 1996.
- [27] Ali H E, Reineking B, Münkemüller T. Effects of plant functional traits on soil stability: intraspecific variability matters [J]. Plant and Soil, 2017, **411**(1-2): 359-375.
- [28] 李丹维, 王紫泉, 田海霞, 等. 太白山不同海拔土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征 [J]. 土壤学报, 2017, **54**(1): 160-170.
Li D W, Wang Z Q, Tian H X, *et al.* Carbon, nitrogen and phosphorus contents in soils on Taibai mountain and their ecological stoichiometry relative to elevation [J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, **54**(1): 160-170.
- [29] 张广帅, 邓浩俊, 杜锟, 等. 泥石流频发区山地不同海拔土壤化学计量特征——以云南省小江流域为例 [J]. 生态学报, 2016, **36**(3): 675-687.
Zhang G S, Deng H J, Du K, *et al.* Soil stoichiometry characteristics at different elevation gradients of a mountain in an area with high frequency debris flow: a case study in Xiaojiang Watershed, Yunnan [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(3): 675-687.
- [30] 胡汗, 马寰菲, 白红英, 等. 秦岭太白山不同林带土壤微生物呼吸速率及其影响因素 [J]. 生态学报, 2021, **41**(1): 135-148.
Hu H, Ma H F, Bai H Y, *et al.* The soil microbial respiration rate and its influencing factors in different forest belts of Taibai Mountain, Qinling Mountains [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, **41**(1): 135-148.
- [31] Sinsabaugh R L, Lauber C L, Weintraub M N, *et al.* Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale [J]. Ecology Letters, 2008, **11**(11): 1252-1264.
- [32] Sinsabaugh R L, Gallo M E, Lauber C, *et al.* Extracellular enzyme activities and soil organic matter dynamics for northern hardwood forests receiving simulated nitrogen deposition [J]. Biogeochemistry, 2005, **75**(2): 201-215.
- [33] Domínguez M T, Holthof E, Smith A R, *et al.* Contrasting response of summer soil respiration and enzyme activities to long-term warming and drought in a wet shrubland (NE Wales, UK) [J]. Applied Soil Ecology, 2017, **110**: 151-155.

- [34] Zhou X Q, Chen C R, Wang Y F, *et al.* Warming and increased precipitation have differential effects on soil extracellular enzyme activities in a temperate grassland [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **444**: 552-558.
- [35] Bhattacharyya P, Roy K S, Neogi S, *et al.* Influence of elevated carbon dioxide and temperature on belowground carbon allocation and enzyme activities in tropical flooded soil planted with rice [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, **185** (10): 8659-8671.
- [36] Yin H J, Li Y F, Xiao J, *et al.* Enhanced root exudation stimulates soil nitrogen transformations in a subalpine coniferous forest under experimental warming [J]. *Global Change Biology*, 2013, **19**(7): 2158-2167.
- [37] Kardol P, Cregger M A, Campy C E, *et al.* Soil ecosystem functioning under climate change: plant species and community effects [J]. *Ecology*, 2010, **91**(3): 767-781.
- [38] Steinauer K, Tilman D, Wragg P D, *et al.* Plant diversity effects on soil microbial functions and enzymes are stronger than warming in a grassland experiment [J]. *Ecology*, 2015, **96**(1): 99-112.
- [39] Pères G, Cluzeau D, Menasseri S, *et al.* Mechanisms linking plant community properties to soil aggregate stability in an experimental grassland plant diversity gradient [J]. *Plant and Soil*, 2013, **373**(1-2): 285-299.
- [40] Zechmeister-Boltenstern S, Keiblinger K M, Mooshammer M, *et al.* The application of ecological stoichiometry to plant-microbial-soil organic matter transformations [J]. *Ecological Monographs*, 2015, **85**(2): 133-155.
- [41] Buchkowski R W, Schmitz O J, Bradford M A, *et al.* Microbial stoichiometry overrides biomass as a regulator of soil carbon and nitrogen cycling [J]. *Ecology*, 2015, **96**(4): 1139-1149.
- [42] 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.
- [43] Fanin N, Fromin N, Buatois B, *et al.* An experimental test of the hypothesis of non-homeostatic consumer stoichiometry in a plant litter-microbe system [J]. *Ecology Letters*, 2013, **16**(6): 764-772.
- [44] Scott J T, Cotner J B, Lapara T M. Variable stoichiometry and homeostatic regulation of bacterial biomass elemental composition [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2012, **3**, doi: 10.3389/fmicb.2012.00042.
- [45] Yuan X B, Niu D C, Gherardi L A, *et al.* Linkages of stoichiometric imbalances to soil microbial respiration with increasing nitrogen addition: evidence from a long-term grassland experiment [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, **138**, doi: 10.1016/j.soilbio.2019.107580.
- [46] Allison S D, Vitousek P M. Responses of extracellular enzymes to simple and complex nutrient inputs [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **37**(5): 937-944.
- [47] Waring B G, Weintraub S R, Sinsabaugh R L. Ecoenzymatic stoichiometry of microbial nutrient acquisition in tropical soils [J]. *Biogeochemistry*, 2014, **117**(1): 101-113.
- [48] Manzoni S, Porporato A. Soil carbon and nitrogen mineralization: theory and models across scales [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**(7): 1355-1379.
- [49] Sinsabaugh R L, Manzoni S, Moorhead D L, *et al.* Carbon use efficiency of microbial communities: stoichiometry, methodology and modelling [J]. *Ecology Letters*, 2013, **16**(7): 930-939.
- [50] Six J, Paustian K, Elliott E T, *et al.* Soil structure and organic matter I. distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, **64**(2): 681-689.
- [51] Steffens M, Kölbl A, Schörk E, *et al.* Distribution of soil organic matter between fractions and aggregate size classes in grazed semiarid steppe soil profiles [J]. *Plant and Soil*, 2011, **338**(1-2): 63-81.
- [52] 钟晓兰, 李江涛, 李小嘉, 等. 模拟氮沉降增加条件下土壤团聚体对酶活性的影响 [J]. *生态学报*, 2015, **35**(5): 1422-1433.
- Zhong X L, Li J T, Li X J, *et al.* Early effect of soil aggregates on enzyme activities in a forest soil with simulated N deposition elevation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(5): 1422-1433.
- [53] 雷蕾, 肖文发, 曾立雄, 等. 三峡库区 2 种马尾松混交林土壤团聚体酶活性分布特征 [J]. *生态学报*, 2020, **40**(17): 6179-6188.
- Lei L, Xiao W F, Zeng L X, *et al.* Distribution of enzymatic activities within soil aggregates in two types of *Pinus massoniana* mixed plantations in the Three Gorges Reservoir area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(17): 6179-6188.
- [54] 罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 等. 土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(8): 3816-3824.
- Luo X H, Wang Z F, Lu C, *et al.* Effects of land use type on the content and stability of organic carbon in soil aggregates [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3816-3824.

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Health Impacts of PM _{2.5} and O ₃ in Beijing, from 2014 to 2020	CHEN Jing, PENG Jin-long, XU Yan-sen (4071)
High-resolution Estimation of Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, FAN Li-hang, <i>et al.</i> (4083)
Impacts of Anthropogenic Emission Reduction and Meteorological Conditions on PM _{2.5} Pollution in Typical Cities of Beijing-Tianjin-Hebei in Winter	SHAO Xuan-yi, WANG Xiao-qi, ZHONG Yi-sheng, <i>et al.</i> (4095)
Influence of Pollutant Transport from Both Sides of the Taihang Mountains on Cross-Valley Urban Aerosols	WANG Yan, GUO Wei, YAN Shi-ming, <i>et al.</i> (4104)
Variation Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in Winter in Jiashan	ZHANG Ying-long, LI Li, WU Wei-chao, <i>et al.</i> (4116)
Simulation Analysis of the Impact of COVID-19 Pandemic Control on Air Quality in Henan Province based on Machine Learning Algorithm	WEI Yu, XU Qi-xiang, ZHAO Jin-shuai, <i>et al.</i> (4126)
Seasonal Variation, Source Identification, and Health Risk of PM _{2.5} -bound Metals in Xinxiang	LIU Huan-jia, JIA Meng-ke, LIU Yong-li, <i>et al.</i> (4140)
Distribution Characteristics and Seasonal Variations of Arsenic in Atmospheric Aerosols over the Yellow Sea and Bohai Sea	YUAN Shuai, WANG Yan, LIU Ru-hai, <i>et al.</i> (4151)
Extinction Characteristics of Aerosols and the Contribution of Pollution Sources to Light Extinction During Three Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2020 in Tianjin	LI Li-wei, XIAO Zhi-mei, YANG Ning, <i>et al.</i> (4158)
Spatial Variation of Surface Ozone Concentration During the Warm Season and Its Meteorological Driving Factors in China	HE Chao, MU Hang, YANG Lu, <i>et al.</i> (4168)
Exploring Characteristics and Causes of Summer Ozone Pollution Based on Process Analysis in Wuhai	ZHANG Rui-xin, CHEN Qiang, XIA Jia-qi, <i>et al.</i> (4180)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric VOCs in the Coastal Background of the Pearl River Delta	YUN Long, LI Cheng-liu, ZHANG Ming-di, <i>et al.</i> (4191)
Hydrochemical Characteristics and Factors of Surface Water and Groundwater in the Upper Yongding River Basin	KONG Xiao-le, YANG Yong-hui, CAO Bo, <i>et al.</i> (4202)
Temporal and Spatial Variations in Water Quality of Hanjiang River and Its Influencing Factors in Recent Years	CHENG Bing-fen, ZHANG Yuan, XIA Rui, <i>et al.</i> (4211)
Pollution Level, Distribution Characteristic, and Ecological Risk Assessment of Environmentally Persistent Pharmaceutical Pollutants in Surface Water of Jiangsu Province	ZHAO Mei-mei, FAN De-ling, GU Wen, <i>et al.</i> (4222)
Spatial and Temporal Distribution and Pollution Evaluation of Soluble Heavy Metals in Liujiang River Basin	ZHANG Wan-jun, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4234)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Groundwater of Leizhou Peninsula	SHI Huan-huan, PAN Yu-jie, ZENG Min, <i>et al.</i> (4246)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements in Groundwater of Longzici Spring Area	XIE Hao, LIANG Yong-ping, LI Jun, <i>et al.</i> (4257)
Seasonal Variation and Sources Identification of Dissolved Sulfate in a Typical Karst Subterranean Stream Basin Using Sulfur and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LAN Gan-jiang, <i>et al.</i> (4267)
Phosphorus Fractions and Quantitative Identification of Pollution Sources in Nanhai Wetland, Baotou	BAI Ya-hong, QIAN Chen-ge, YUAN Si-jing, <i>et al.</i> (4275)
Release Risk of Phosphorus by Sediments and Its Influencing Factors in Ponds and Ditches of a New Urban District Park	LI Ru-zhong, SONG Min, YANG Ji-wei (4287)
Effect of Hydraulic Residence Time on Removal Efficiency of Pollutants in Subsurface Flow Constructed Wetlands and Analysis of Denitrification Mechanism	QI Ran, ZHANG Ling, YANG Fan, <i>et al.</i> (4296)
Enhanced Removal of Pollutants in Constructed Wetlands with Manganese Sands	MA Quan, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (4304)
Application Effect of Four Typical Submerged Macrophytes on Removing Cadmium from Polluted Sediment	TAO Li, WANG Pei-fang, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i> (4311)
Structure of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Response to Dissolved Organic Matter in Baiyangdian Lake During the Water Delivery Period	ZHOU Shi-lei, ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (4319)
Nitrogen and Phosphorus Leaching Characteristics and Adsorption Properties of Hardwood Biochar in Stormwater Runoff	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue (4332)
Indicator Function of Ragworm (Nereididae) on Sediment Microplastic in Haizhou Bay Intertidal Zone	WANG Jia-xuan, SONG Ke-xin, SUN Yi-xin, <i>et al.</i> (4341)
Antagonistic Effect and Mechanism of Nano Titanium Dioxide and Cadmium on the Growth of <i>Scenedesmus obliquus</i>	WANG Pu, ZHAO Li-hong, ZHU Xiao-shan (4350)
Mutual Influence Between Microbial Community, Wastewater Characteristics, and Antibiotic Resistance Genes During Spiramycin Production Wastewater Treatment	WU Cai-yun, LI Hui-li, QIN Cai-xia, <i>et al.</i> (4358)
Effect of Chelated Iron on Nitrogen Removal Efficiency and Microbial Community Structure in the Anaerobic Ferric Ammonium Oxidation	LIAO Hong-yan, SONG Cheng, WAN Liu-yang, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Dissolved Oxygen on Nutrient Removal Performance and Microbial Community in Low Carbon/Nitrogen Municipal Wastewater Treatment Process	CHI Yu-lei, SHI Xuan, REN Tong, <i>et al.</i> (4374)
Shortening SRT of Intermittent Gradient Aeration to Realize Nitrogen and Phosphorus Removal in Short-range SNEDPR System	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (4383)
Characteristics of Partial Denitrification in Biofilm System	YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, ZHANG Qiong, <i>et al.</i> (4390)
Effect of Anaerobic Plug-flow on Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Aerobic Granular Sludge with Intermittent Aeration	LI Dong, CAO Si-yu, WANG Qi, <i>et al.</i> (4399)
Combining Different Aerobic/Anoxic Durations with Zoned Sludge Discharge to Optimize Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules in Domestic Sewage	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (4406)
Meta-analysis of the Effects of Metal Mining on Soil Heavy Metal Concentrations in Southwest China	ZHANG Jian-lin, QU Ming-kai, CHEN Jian, <i>et al.</i> (4414)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Watersheds of the Qinghai-Tibet Plateau	DU Hao-lin, WANG Ying, WANG Jin-song, <i>et al.</i> (4422)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Cadmium Pollution in Soil-crops system of an E-waste Dismantling Area	ZHANG Lu-yao, ZHAO Ke-li, FU Wei-jun (4432)
Characteristics of Modified Biochars and Their Immobilization Effect on Cu and Cd in Polluted Farmland Soil Around Smelter	WANG Xin-yu, MENG Hai-bo, SHEN Yu-jun, <i>et al.</i> (4441)
Combined Effects of Soil Amendment and Zinc Fertilizer on Accumulation and Transportation of Cadmium in Soil-Rice System	ZHOU Kun-hua, ZHOU Hang, WANG Zi-yu, <i>et al.</i> (4452)
Effects of Different Soil Conditioners on Rice Growth and Heavy Metal Uptake in Soil Contaminated with Copper and Cadmium	WEI Wei, LI Ping, LANG Man (4462)
Isolation and Identification of the Plant Endophyte R-13 and Its Effect on Cadmium Accumulation in <i>Solanum nigrum</i> L.	PANG Jie, LIU Yue-min, HUANG Yong-chun, <i>et al.</i> (4471)
Response of Soil Archaeal Community to Heavy Metal Pollution in Different Typical Regions	LI Yu-tong, YANG Shan, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4481)
High-throughput Sequencing Analysis of Soil Bacterial Community in the Grain for Green Project Areas of the Loess Plateau	LIU Xiao-hua, WEI Tian-xing (4489)
Experimental Influence of Food Waste Fermentation Broth on the Soil Quality in a Loess Hilly Area	SHAO Li-ming, REN Jun-da, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4500)
Stability of Soil Aggregates at Different Altitudes in Qinling Mountains and Its Coupling Relationship with Soil Enzyme Activities	MA Huan-fei, HU Han, LI Yi, <i>et al.</i> (4510)
Reactivation of Passivated Biochar/Nanoscale Zero-Valent Iron by an Electroactive Microorganism for Cooperative Hexavalent Chromium Removal and Mechanisms	LIAO Cong-jian, ZHAO Xiao-lei, LIU Kai, <i>et al.</i> (4520)
Influence of Precipitation Change on Soil Respiration in Desert Grassland	HAO Lian-yi, ZHANG Li-hua, XIE Zhong-kui, <i>et al.</i> (4527)
Effects of Nitrogen Fertilizer Application Times and Nitrification Inhibitor on N ₂ O Emission from Potted Maize	FU Pei-jiao, JI Heng-kuan, HE Qiu-xiang, <i>et al.</i> (4538)
Gaseous Nitrogen Emission from Soil After Application of NH ₄ ⁺ -N Loaded Biochar	MA Xiao-gang, HE Jian-qiao, CHEN Yu-lan, <i>et al.</i> (4548)
Effects of Microplastics Addition on Soil Organic Carbon Mineralization in Citrus Orchard	ZHANG Xiu-ling, YAN Zi-wei, WANG Feng, <i>et al.</i> (4558)
Dynamic Material Flow Analysis of Perfluorooctane Sulfonate in China, 1985-2019	WANG Jia-yu, CHEN Jing-wen, TANG Wei-hao, <i>et al.</i> (4566)