

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

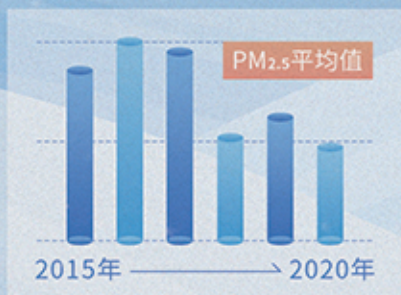
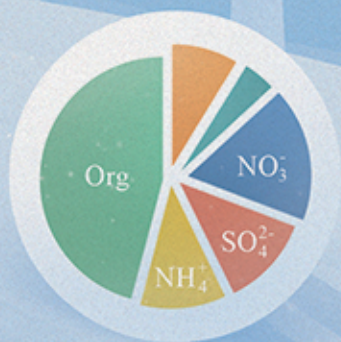
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

北京冬季奥运会历史同期大气PM_{2.5}污染特征分析

刘玥晨, 满睿琪, 裴彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意,
曾立民, 吴志军, 胡敏



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年8月

第43卷 第8期
Vol.43 No.8

目次

北京冬季奥运会历史同期大气 PM _{2.5} 污染特征分析·····	刘玥晨, 满睿琪, 袁彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意, 曾立民, 吴志军, 胡敏 (3895)
天津城区 2019 年 2~3 月气溶胶粒径分布特征观测分析·····	郝团, 蔡子颖, 刘敬乐, 王晓佳, 姚青 (3903)
长江中游地区 PM _{2.5} 重污染过程的典型天气环流分型及区域传输影响·····	王莹, 智协飞, 白永清, 董甫, 张玲 (3913)
滇中典型工矿城市大气干湿沉降重金属等元素特征及健康风险评价·····	范晨子, 刘永兵, 袁继海, 郭威, 孙冬阳, 刘成海 (3923)
典型工业城市夏季 VOCs 污染特征及反应活性·····	秦涛, 李丽明, 王信梧, 杨文, 王晓丽, 徐勃, 耿春梅 (3934)
大连市夏季 VOCs 化学反应活性及来源·····	朱轲欣, 刘立忠, 刘焕武, 罗静期, 高冉冉 (3944)
河南省 18 个城市大气污染物分布特征、区域来源和传输路径·····	刘光瑾, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 王克 (3953)
京津冀臭氧污染特征、气象影响及基于神经网络的预报效果评估·····	朱媛媛, 刘冰, 桂海林, 李健军, 汪巍 (3966)
2006~2020 年中国大气本底站 BC 气溶胶的时空分布特征·····	王红磊, 颜雪, 沈利娟, 柳竞先, 赵天良, 管小彬, 赵德龙 (3977)
钢铁生产行业二噁英污染特征变化及其排放因子·····	杨艳艳, 谢丹平, 付建平, 陈晓燕, 尹文华, 韩静磊, 张素坤, 张璐, 肖滔 (3990)
长江流域着生藻类群落结构的格局及其生态评价·····	胡愈忻, 曹亮, 屈仁超, 黄杰, 胡圣, 周正, 王英才, 张静 (3998)
基于蒙特卡罗模拟与 PMF 模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析·····	庞阔, 李敏, 刘璐, 杨璐, 赵洪军 (4008)
梯级拦河堰对典型山地城市河流重金属元素的滞留效应: 以重庆市梁滩河为例·····	王超, 贾伯阳, 潘成勇, 何文战, 叶秋, 罗杉山, 张夏武 (4018)
基于土壤流失的农业面源 TN 和 TP 排海系数估算·····	王有霄, 黄翀, 刘高焕, 赵忠贺, 李贺, 刘庆生 (4032)
河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响·····	李好好, 黄懿梅, 郭威, 侯宏洋, 范梦苑, 齐照平, 贾鹏辉, 郭庆波 (4042)
联合 PMF 模型与稳定同位素的地下水污染溯源·····	张涵, 杜昕宇, 高菲, 曾卓, 程思茜, 许懿 (4054)
江西锦江流域抗生素污染特征与生态风险评价·····	李佳乐, 王萌, 胡发旺, 董一慧, 孙占学, 王瑶, 卫承芳, 燕雯 (4064)
天津市地表水中新型优先污染物筛选与管控对策·····	吴颜岐, 宋帅, 史雅娟, 刘莹, 杨胜杰 (4074)
宁夏第三排水沟中药物和个人护理品 (PPCPs) 的污染特征与生态风险评估·····	李富娟, 高礼, 李凌云, 郑兰香, 马兰, 杨桂钦 (4087)
再生水河道浮游生物多样性季节变化分析: 以北运河为例·····	袁训超, 王敏, 郭道宇, 吴东丽 (4097)
太湖草、藻湖区沉积物 WSOM 组成和分子结构分析·····	杜瑛珣, 戴家如, 张巧颖, 刘静静, 黄秀琳, 安世林, 文帅龙 (4108)
太湖氧化亚氮 (N ₂ O) 排放特征及潜在驱动因素·····	刘朝荣, 朱俊羽, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 杨艳, 周永强 (4118)
海绵城市生物滞留带重金属污染特征及风险评价·····	雷晓玲, 邱丽娜, 魏泽军, 杨程, 何博 (4127)
玉米芯和稻草秸秆强化潜流人工湿地对低 C/N 污水的处理效果·····	胡曼利, 郝庆菊, 马容真, 陈柯沁, 罗师旭, 江长胜 (4136)
环境 pH 条件下 Fe ²⁺ 活化过二硫酸盐降解有机污染物的效能与影响因素·····	刘颖, 郭依玮, 乔俊莲, 孙远奎 (4146)
新疆沙雅县不同植物类型农田环境中典型农药残留及其风险评价·····	谢宣宣, 艾力江·努尔拉, 买合木提·巴拉提, 仲乃福, 李南鑫 (4154)
宁夏养鸡场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征·····	沈聪, 张俊华, 刘吉利, 韩新宁, 尚天浩, 代金霞 (4166)
宁夏石嘴山市农用地土壤硒的富集因素·····	王莹, 刘海燕, 王泽晶, 张晓东, 王登红 (4179)
地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法·····	王锐, 余京, 李瑜, 周蛟, 贾中民, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (4190)
姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评价·····	于林松, 万方, 范海印, 康桂玲, 刘辉, 王东平, 徐佳 (4199)
基于特定源风险评估模型的小麦籽粒铅超标风险预测·····	杨阳, 李艳玲, 牛硕, 陈卫平, 王天齐, 王美娥 (4212)
柳州地源性镉异常区稻米重金属累积效应与健康风险·····	朱亮亮, 王佛鹏, 唐乐斌, 肖乃川, 董心月, 韦美溜, 宋波 (4219)
不同玉米品种 Cd、Pb、Zn 和 As 积累与转运特性·····	任超, 肖建辉, 李竞天, 杜倩倩, 朱利文, 王浩, 朱瑞颖, 赵海洋 (4232)
橡胶草 (TKS) 对铅镉污染农田土壤的修复潜力·····	张恒, 熊明彪, 王乾鑫, 孙博文, 饶逸驰, 程章, 徐小逊, 杨占彪, 鲜骏仁, 朱雪梅, 杨绍平, 杨远祥 (4253)
3 种地被竹对重金属复合污染农田土壤的修复潜力·····	张颖, 赵欣, 张圣虎, 漆丹, 王博, 陈引, 陆建刚 (4262)
连续施肥对双季稻镉硅累积效应的影响·····	彭华, 邓凯, 石宇, 魏维, 柳赛花, 纪雄辉 (4271)
改性壳聚糖负载氧化硅调控水稻对砷吸收与转运的影响·····	杨嘉仪, 孙梦强, 肖羽堂, 韦行, 张建强, 陈志良 (4282)
不同螯合剂和有机酸对苍耳修复镉复合污染土壤的影响·····	张雅睿, 黄益宗, 保琼莉, 魏祥东, 铁柏清, 张盛楠, 韩甘, 黄永春 (4292)
水分管理对稻田土壤铁氧化物形态转化的影响及其与酶活性变化的耦合关系·····	李明远, 张小婷, 刘汉斌, 魏世强 (4301)
外源 Fe 调控根系微生物群落结构和功能对水稻 Cd 积累的影响·····	郑沈, 黄道友, 李波, 马天池, 许超, 朱奇宏, 朱捍华, 张泉 (4313)
不同降水下覆盖与缓释肥减量对油菜土壤微生物群落结构的影响·····	冯军, 石超, Hafiz Athar Hussain, 刘永波, 刘天朋, 李永洪, 刘俊峰, 王龙昌 (4322)
基于高通量测序和代谢组学解析重金属污染对农田微生物群落组成和功能的影响·····	庞发虎, 李晓琦, 段莉阳, 陈彦, 姬明飞, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (4333)
汞矿区周边农田土壤微生物群落结构特征及其环境驱动因子·····	陈芬, 余高, 孙约兵, 张红丽, 田霞, 夏蓓 (4342)
岩溶湿地与稻田土壤团聚体细菌群落结构的比较·····	冷蒙, 靳振江, 肖筱怡, 熊丽媛, 李雪松 (4353)
戴云山土壤微生物碳源利用效率的海拔变异规律及影响因素·····	吕坤, 王晶晶, 吴国朋, 林思诺, 苏延桂, 黄刚 (4364)
长期秸秆还田对水稻根系碳矿化与激发效应的影响·····	刘峰, 王云秋, 张昀, 祝贞科, 吴金水, 葛体达, 李宇虹 (4372)
秸秆还田配施生物炭对关中平原夏玉米产量和土壤 N ₂ O 排放的影响·····	白金泽, 刘镇远, 宋佳杰, 李娜, 于琦, 郝嘉琪, 许宏伟, 程博豪, 王兴, 冯永忠 (4379)
聚苯乙烯纳米塑料对大蒜生长生理的影响·····	邱陈陈, 李国新, 李青松, 颜昌宙 (4387)
微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响·····	王志超, 张博文, 倪嘉轩, 杨文焕, 李卫平 (4394)
氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比·····	陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 付佩 (4402)
《环境科学》征订启事 (4211) 《环境科学》征稿简则 (4312) 信息 (3922, 4031, 4107)	

戴云山土壤微生物碳源利用效率的海拔变异规律及影响因素

吕坤¹, 王晶晶¹, 吴国朋¹, 林思诺¹, 苏延桂^{1,2}, 黄刚^{1,2*}

(1. 福建师范大学地理研究所, 福州 350007; 2. 福建师范大学湿润亚热带生态-地理过程教育部重点实验室, 福州 350007)

摘要: 微生物碳源利用效率 (CUE) 是指微生物将吸收的碳 (C) 转化为自身生物量 C 的效率, 土壤微生物 CUE 的研究对深入认识土壤 C 循环过程十分重要. 利用¹⁸O-H₂O-DNA 标记法, 研究戴云山不同海拔 (980 ~ 1 765 m) 天然林土壤微生物 CUE、微生物生长速率 (C_{growth}) 和呼吸速率 ($C_{\text{respiration}}$) 的变化特征和影响机制. 结果表明, 微生物 CUE 在 0.1 ~ 0.4 之间变化, 并随海拔升高而增加; 微生物 CUE 与 C_{growth} 、 $C_{\text{respiration}}$ 和单位微生物生长正相关, 而与呼吸熵负相关, 说明随海拔的增加, 微生物通过增加个体生长和抑制个体呼吸来提高 CUE; 温度是影响 CUE 的主要因素, 微生物 CUE 与温度负相关, 说明随海拔增加, 温度下降是促进土壤微生物 CUE 升高的关键因素.

关键词: 温度; 土壤元素计量比; 土壤-微生物计量不平衡; 亚热带; 山地森林

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)08-4364-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202110064

Elevational Pattern and Control Factors of Soil Microbial Carbon Use Efficiency in the Daiyun Mountain

LÜ Kun¹, WANG Jing-jing¹, WU Guo-peng¹, LIN Si-nuo¹, SU Yan-gui^{1,2}, HUANG Gang^{1,2*}

(1. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. Key Laboratory for Humid Sub-tropical Eco-Geographical Processes of the Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: Microbial carbon use efficiency (CUE) refers to the C transformation to microbial biomass from C uptake. The study of soil microbial CUE is very important for understanding the soil C cycle. Here, CUE, C_{growth} , and $C_{\text{respiration}}$ were measured using the ¹⁸O-H₂O-DNA labeling method at six elevational sites (980-1 765 m) in Daiyun Mountain, a subtropical montane forest, to understand the variation characteristics and influencing mechanisms. The results showed that: CUE varied from 0.1 to 0.4 and increased linearly with elevation; CUE was positively correlated with C_{growth} , $C_{\text{respiration}}$, and q_{growth} but negatively correlated with q_{CO_2} , indicating that CUE increased with elevation by increasing microbial growth and inhibiting respiration; and temperature was the first controlling factor for the elevation variation in microbial CUE in the subtropical forest ecosystem.

Key words: temperature; soil element stoichiometric ratio; soil-microbial stoichiometric imbalance; subtropical region; montane forest

土壤微生物在生物地球化学循环中扮演着重要角色, 是土壤有机质和养分循环的主要驱动者^[1]. 微生物碳源利用效率 (carbon use efficiency, CUE) 反映了微生物对有机碳的利用和向大气排放 CO₂ 的速率^[2], 同时, 由于微生物死亡后的残体高达土壤有机碳储的 80%^[3], CUE 也反映了微生物将 C 转化为生物量的能力和固碳潜力^[4]. 微生物 CUE 对外界环境变化表现出很强的敏感性^[5,6], 但现有陆地生物地球化学循环模型中 CUE 多为稳定的常数, 忽略了气候变化下微生物生理的调节作用^[7]. 实际上, 微生物 CUE 在 0.2 ~ 0.8 之间变化^[5,7,8]. 因此, 准确测定土壤微生物 CUE 将有利于评估土壤碳库对气候变化的反馈.

微生物 CUE 对温度变化的研究通常来源于增温实验, 且结果不一致. 通常认为增温对微生物的生长和呼吸均有促进作用, 但微生物生长的温度敏感性低于呼吸的温度敏感性^[9], CUE 对增温表现出负反馈^[10,11]. 如连续 30 a 的增温实验表明, 增温降低

了微生物生长的 C 分配, CUE 从 0.31 下降到 0.23^[10]; 也有研究表明, 随温度升高, 土壤 CUE 未发生明显变化^[12,13]. 差异的原因一方面可能是各研究中人工增温的时间不同, 另一方面微生物 CUE 沿环境梯度的研究还很缺乏. 沿海拔梯度对理解植物生理、多样性和生产对温度变化的响应具有重要价值^[14,15], 当前还未有直接测定的微生物 CUE 随海拔变化的报道. 微生物 CUE 沿纬度变化的研究发现, 同微生物多样性一样, CUE 表现出一致的地理变异规律^[16]. 除温度外, 土壤有机碳和养分含量也随海拔变动, 它们也是影响 CUE 的重要因素^[17]. 因此, 在海拔梯度上, 探究微生物 CUE 的变化及其影响因素, 对于认识森林生态系统生物地球化学循环具有重要意义.

收稿日期: 2021-10-11; 修订日期: 2021-12-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41671115, 32171643); NSFC-新疆联合基金项目 (U1703332)

作者简介: 吕坤 (1995 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤微生物生态学, E-mail: 2476213442n@qq.com

* 通信作者, E-mail: hg80@fjnu.edu.cn

热带亚热带森林占全球总碳储量的 34% ~ 55%^[18], 热带亚热带森林土壤微生物 CUE 的研究对认识森林土壤有机碳动态变化具有重要意义^[19]. 本研究利用¹⁸O-H₂O-DNA 标记法^[20], 通过测量戴云山 6 个海拔位点 (980 ~ 1 765 m) 的土壤微生物 CUE、微生物生长速率 (C_{growth}) 和呼吸速率 ($C_{\text{respiration}}$) 的变化, 探究微生物 CUE 随海拔的变化规律, 分离微生物生长和呼吸对 CUE 变化的相对作用强度, 并确定影响亚热带森林土壤 CUE 变化的主要环境因素, 结果可提高对森林土壤地下碳过程的认识.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地点位于亚热带典型山地的戴云山自然保

护区 (25°37' ~ 25°40'N, 118°07' ~ 118°11'E), 该地属亚热带季风气候, 年平均气温 20℃, 年平均降雨量 1 700 ~ 2 000 mm, 降雨集中在 3 ~ 9 月, 相对湿度高于 80%^[21]. 戴云山为闽中最高山峰, 植被为自然恢复的天然次生林, 随海拔增加, 林地类型由马尾松混交林转变为以米槠、丝栗栲和南岭栲为优势种的常绿阔叶林, 峰顶为矮黄山松林. 土壤类型依次为红壤、黄红壤和黄壤 (表 1).

1.2 样品采集、土壤理化性质和微生物生物量测定

依据沿海拔梯度的主要植被类型, 本研究沿戴云山阳坡从低至高选取 980、1 143、1 204、1 306、1 587 和 1 765 m 的 6 个海拔作为取样点 (表 1), 于每个海拔下设置 6 个 10 m × 10 m 样地, 间隔距离 5 m. 为了减少根际土对测定结果的影响, 土壤的采集尽量在远离乔木的区域开展. 在每个样地内去除地

表 1 不同海拔土壤样地基本概况

Table 1 Summary of site characteristics along the elevation gradient

海拔/m	年均温/℃	植被类型	优势种	土壤类型
980	18. 89	针阔混交林	马尾松 <i>Pinus massoniana</i> Lamb. 黄山松 <i>Pinus taiwanensis</i> Hayata	红壤
1 143	17. 98	常绿阔叶林	米槠 <i>Castanopsis carlesii</i> (Hemsl.) Hay 丝栗栲 <i>Castanopsis fargesii</i>	红壤
1 204	17. 65	常绿阔叶林	米槠和丝栗栲	黄红壤
1 306	17. 08	常绿阔叶林	米槠和丝栗栲	黄壤
1 587	15. 52	针阔混交林	黄山松和莎草 <i>Cyperus rotundus</i> L.	黄壤
1 765	14. 54	矮黄山松林	黄山松	黄壤

表凋落物后, 随机选取 5 个样点, 用小铲挖取 0 ~ 20 cm 的表层土壤, 去除较大石粒后均匀混合成一份混合土样、装袋并尽快带回实验室. 将获取的土壤分成两份, 一份自然风干, 用于测定土壤理化性质, 一份过 2 mm 筛后置于 4℃ 冰箱中, 并尽快用于土壤微生物生物量和微生物 CUE 的测定^[22].

土壤有机碳 (SOC)、总氮 (TN) 用碳氮元素分析仪 (Elementar Vario MAX, 德国) 测定. 总磷 (TP) 采用 HClO₄-H₂SO₄ 消煮^[23], 并用连续流动分析仪 (Skalar San ++, Skalar, 荷兰) 测定. 土壤 pH 利用 pH 计 (STARTER 300, OHAUS, 美国) 测定, 水土比为 5:1.

土壤微生物生物量的碳 (MBC)、氮 (MBN) 和磷 (MBP) 利用氯仿熏蒸法^[24]测定. 利用总有机碳分析仪 (TOC-VCPH/CPN, 日本) 测定浸提液中有有机碳含量, 用连续流动分析仪 (Skalar San ++, 荷兰) 测定浸提液中 N 含量. MBP 使用 0.5 mol·L⁻¹ 的 NaHCO₃ 浸提 (浸提之前需调节 pH 至 8.5), 用连续流动分析仪 (Skalar San ++, 荷兰) 测定浸提

液中 P 含量. MBC, MBN 和 MBP 的矫正系数分别为 0.45、0.54 和 0.40^[24]. 土壤-微生物碳-氮 (C:N_{imbalance}) 和碳-磷 (C:P_{imbalance}) 不平衡见式 (1) 和式 (2)^[25].

$$C:N_{\text{imbalance}} = (\text{SOC}/\text{TN})/(\text{MBC}/\text{MBN}) \quad (1)$$

$$C:P_{\text{imbalance}} = (\text{SOC}/\text{TP})/(\text{MBC}/\text{MBP}) \quad (2)$$

1.3 微生物 CUE 测定与计算

土壤微生物 CUE 测定利用¹⁸O-H₂O-DNA 标记法^[22,26]. 首先将土壤过 2 mm 筛, 手动捡去根、腐殖质等动植物残体并将土壤含水量调至饱和含水率的 60%, 在 25℃ 培养两周. 将预培养后的 450 mg (以干土计) 土壤置于 2 mL 带盖小瓶. 将丰度为 99% 的¹⁸O-H₂O 用移液枪小心加入到带盖小瓶, 以使土壤水中的¹⁸O 丰度达到 20%, 同样于对照中加入相同体积的去离子水. 将加水小瓶在涡旋仪上轻轻混匀, 打开螺帽, 立即转移至 50 mL 培养瓶中, 密封培养瓶. 恒温培养箱 25℃ 培养 24 h 后, 从 50 mL 培养瓶抽取 10 mL 气体用岛津气相色谱仪 (SHIMADZU GC-2030) 测定 CO₂ 浓度, 并立即取出 2 mL 小管, 提取土壤 DNA.

土壤 DNA 利用 DNA 试剂盒提取 (Fast DNA SPIN Kit for Soil). DNA 浓度用 Qubit 4 Fluorometer 测定 (Invitrogen, 美国), DNA 中¹⁸O 丰度用 MAT253 型稳定同位素比率质谱仪 (Thermo MAT 253, 美国) 测定: 首先吸取 30 μL 提取的 DNA 置于银杯中, 于 60℃ 干燥 2 h 后上机测定. 微生物 CUE、微生物生长速率 (C_{growth})、呼吸速率 ($C_{\text{respiration}}$)、单位微生物生长 (q_{growth}) 和呼吸熵 ($q\text{CO}_2$) 按如下公式计算.

¹⁸O 在土壤溶液中的相对丰度 (at%_{label}) 见式 (3):

$$\text{at}\%_{\text{label}} = \frac{\text{at}\%_{\text{added}} \times A + 0.2 \times W}{W + A} \quad (3)$$

式中, at%_{added} 和 A 分别为添加到土壤中的标记水的¹⁸O 相对丰度和体积 (mL). W 为土壤含水量 (SWC, mL), 0.2 为自然界水中¹⁸O 相对丰度.

土样培养期间产生的总 DNA (DNA_{produced}, μg) 见式 (4):

$$\text{DNA}_{\text{produced}} = \text{O}_{\text{total}} \times (\text{at}\%_{\text{excess}} / 100) \times \frac{100}{\text{at}\%_{\text{label}}} \times \frac{100}{31.21} \quad (4)$$

式中, O_{total} 为烘干 DNA 提取物的总 O 含量 (μg), at%_{excess} 为标记样品与未标记样品的¹⁸O 丰度的差值, 31.21 为土壤微生物 DNA 中 O 的平均质量比 (C₃₉H₄₄O₂₄N₁₅P₄).

土壤微生物 DNA 含量和土壤微生物生物量的转换系数 (f_{DNA}) 为 MBC 除以 DNA 浓度.

微生物生长速率 [C_{growth} , 以 C 计, ng·(g·h)⁻¹] 计算如式 (5):

$$C_{\text{growth}} = \frac{f_{\text{DNA}} \times \text{DNA}_{\text{produced}} \times 1000}{\text{DW} \times t} \quad (5)$$

式中, DW 为土壤干重 (g), t 为培养时间 (h).

微生物基础呼吸速率 [$C_{\text{respiration}}$, 以 C 计, ng·(g·h)⁻¹] 计算如式 (6):

$$C_{\text{respiration}} = \frac{D(\text{CO}_2)}{\text{DW} \times t} \times \frac{p \times M_r}{R \times T} \times V_{\text{hs}} \times 1000 \quad (6)$$

式中, t 为土壤微生物培养时间 (h), p 为大气压力 (kPa), M_r 为 C 的相对分子质量 (12.01 g·mol⁻¹), R 为理想气体常数 [8.314 J·(mol·K)⁻¹], T 为气体绝对温度 (295.15 K), V_{hs} 为空瓶的体积 (L), D(CO₂) 为培养 24 h 期间 CO₂ 浓度的增加量 (× 10⁻⁶), 计算如式 (7):

$$D(\text{CO}_2) = \frac{(V_{\text{hs}} - 0.005) \times C_{-t_0} + 0.005 \times C_k - C_{-t_{24}}}{V_{\text{hs}}} \quad (7)$$

式中, C_{-t₀} 和 C_{-t₂₄} 分别为培养开始 (t₀) 和结束

(t₂₄) 时测得的 CO₂ 浓度 (× 10⁻⁶). C_k 和 0.005 分别为开始时间 (t₀) 时培养瓶的 CO₂ 浓度 (× 10⁻⁶) 和空瓶体积 (L). 微生物 CUE^[5] 计算见式 (8):

$$\text{CUE} = \frac{C_{\text{growth}}}{C_{\text{growth}} + C_{\text{respiration}}} \quad (8)$$

单位微生物生长 [q_{growth} , 以 C/MBC 计, ng·(μg·h)⁻¹] 和呼吸熵 [$q\text{CO}_2$, 以 C/MBC 计, ng·(μg·h)⁻¹] 计算如式 (9) 和式 (10):

$$q_{\text{growth}} = C_{\text{growth}} / \text{MBC} \quad (9)$$

$$q\text{CO}_2 = C_{\text{respiration}} / \text{MBC} \quad (10)$$

1.4 数据分析

利用单因素方差分析检验海拔对土壤微生物生理参数、以及土壤、微生物生物量等参数的影响, 并应用 Duncan 法比较不同海拔位点间的差异. 利用最小二乘回归分析微生物 CUE、 C_{growth} 、 $C_{\text{respiration}}$ 、 q_{growth} 和 $q\text{CO}_2$ 随海拔和温度的变化, 和微生物 CUE 随 C_{growth} 、 $C_{\text{respiration}}$ 、 q_{growth} 和 $q\text{CO}_2$ 的变化; 利用 Spearman 相关性分析评价微生物 CUE、 C_{growth} 、 $C_{\text{respiration}}$ 、 q_{growth} 和 $q\text{CO}_2$ 与各指标的相关性; 利用逐步回归分析确认影响微生物 CUE、 C_{growth} 、 $C_{\text{respiration}}$ 、 q_{growth} 和 $q\text{CO}_2$ 的主要因素. 所有分析均采用 SPSS 19.0 软件进行.

2 结果与分析

2.1 土壤理化、微生物生物量和土壤-微生物计量不平衡随海拔的变化

SOC、TN、TP、MBC、MBN 和 MBP 随海拔升高逐渐增加. 海拔对土壤 C:N 没有显著影响, 土壤 C:P 先增加后减少 (表 2). 海拔对土壤 MBC:MBN 和 MBC:MBP 存在显著影响 ($P < 0.001$), 整体上在较高海拔 (1306 ~ 1765 m) 小于较低海拔 (980 ~ 1143 m). 海拔对计量不平衡具有显著影响 ($P < 0.001$), 整体上高海拔 (1306 ~ 1765 m) 大于低海拔 (980 ~ 1143 m).

2.2 微生物 CUE、生长速率和呼吸速率随海拔的变化规律

表层 0 ~ 20 cm 土壤微生物 CUE 的变异区间为 0.1 ~ 0.4 (图 1), 且随海拔的增加呈线性增加 [图 1 (a), $R^2 = 0.28$, $P = 0.001$]. 与之相应, 微生物 CUE 随温度的增加而减小 [图 1 (b), $R^2 = 0.25$, $P = 0.001$]. 微生物的生长速率和呼吸速率随海拔而增加 [图 2 (a), C_{growth} : $R^2 = 0.57$, $P < 0.001$, $C_{\text{respiration}}$: $R^2 = 0.53$, $P < 0.001$]. q_{growth} 随海拔升高变化不显著, $q\text{CO}_2$ 随海拔增加而下降 [图 2 (b), $R^2 = 0.18$, $P = 0.01$].

表 2 戴云山土壤理化性质和土壤微生物生物量¹⁾

Table 2 Soil chemical properties and soil microbial biomass of the Daiyun Mountain

土壤参数	海拔/m						F	P
	980	1 143	1 204	1 306	1 587	1 765		
pH	4.70 ± 0.00	4.75 ± 0.00	4.73 ± 0.01	4.75 ± 0.01	4.52 ± 0.01	4.68 ± 0.02	56.110	< 0.001
ω(SOC)/g·kg ⁻¹	46.08 ± 0.14	48.16 ± 1.95	52.59 ± 0.94	57.19 ± 1.68	59.31 ± 0.68	68.25 ± 0.62	47.452	< 0.001
ω(TN)/g·kg ⁻¹	3.11 ± 0.01	3.18 ± 0.08	4.00 ± 0.01	3.37 ± 0.35	3.89 ± 0.07	4.91 ± 0.02	20.111	< 0.001
ω(TP)/g·kg ⁻¹	0.33 ± 0.02	0.28 ± 0.01	0.38 ± 0.01	0.37 ± 0.01	0.41 ± 0.00	0.56 ± 0.00	67.151	< 0.001
ω(MBC)/mg·kg ⁻¹	333.83 ± 25.99	592.81 ± 12.16	466.92 ± 11.04	598.43 ± 12.70	614.50 ± 28.70	827.45 ± 27.32	60.947	< 0.001
ω(MBN)/mg·kg ⁻¹	29.30 ± 4.13	141.68 ± 7.58	49.43 ± 4.90	27.07 ± 6.40	98.60 ± 9.96	136.85 ± 15.12	29.113	< 0.001
ω(MBP)/mg·kg ⁻¹	97.59 ± 3.14	80.74 ± 3.79	126.01 ± 8.36	146.20 ± 7.39	207.94 ± 44.08	118.29 ± 1.80	5.709	0.001
C:N	14.83 ± 0.01	15.14 ± 0.23	14.82 ± 0.75	16.33 ± 0.71	14.45 ± 0.78	13.89 ± 0.06	2.312	0.069
C:P	142.10 ± 8.91	174.09 ± 13.90	155.65 ± 9.57	148.77 ± 13.82	134.72 ± 4.72	122.48 ± 1.34	3.282	0.018
MBC:MBN	12.62 ± 2.20	4.27 ± 0.31	9.86 ± 0.87	4.76 ± 0.21	6.44 ± 0.47	6.58 ± .02	8.874	< 0.001
MBC:MBP	6.31 ± 0.26	7.45 ± 0.48	3.83 ± 0.37	4.13 ± 0.16	3.51 ± 0.90	7.02 ± 0.33	13.282	< 0.001
C:N _{imbalance}	1.32 ± 0.18	3.65 ± 0.30	1.55 ± 0.14	3.49 ± 0.28	2.30 ± 0.21	2.29 ± 0.23	17.522	< 0.001
C:P _{imbalance}	22.82 ± 2.05	23.69 ± 2.14	43.32 ± 5.66	36.23 ± 3.48	48.86 ± 9.32	17.65 ± 0.82	6.741	< 0.001

1)SOC 表示土壤有机碳含量,TN 表示土壤总氮含量,TP 表示土壤总磷含量,MBC 表示土壤微生物生物量碳,MBN 表示土壤微生物生物量氮,MBP 表示土壤微生物生物量磷,C:N 表示土壤碳氮比,C:P 表示土壤碳磷比,C:N_{imbalance} 表示土壤-微生物碳氮不平衡,C:P_{imbalance} 表示土壤-微生物碳磷不平衡;所有值都是均值 ± 标准差

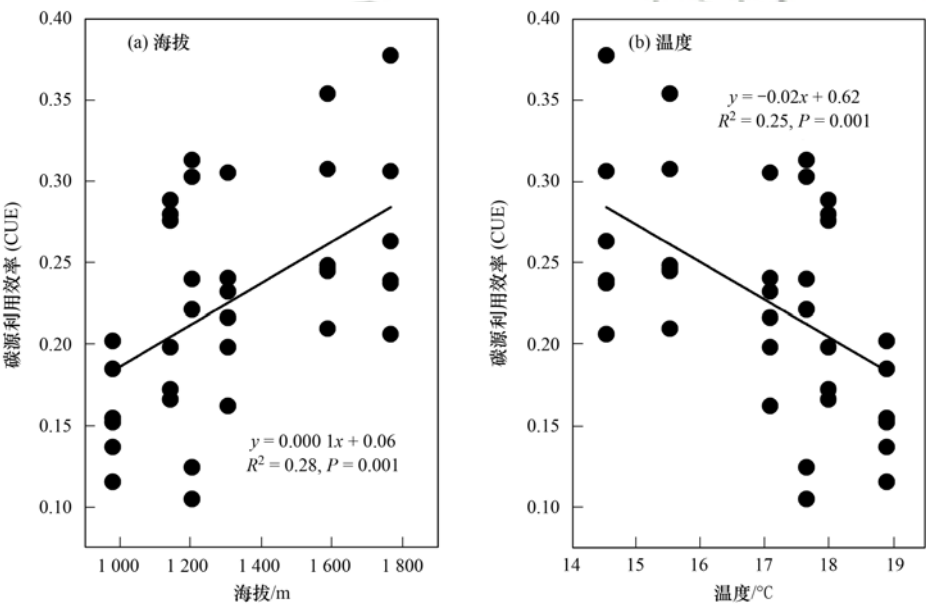


图 1 微生物碳源利用效率随海拔的变化

Fig. 1 Elevational pattern of microbial carbon use efficiency

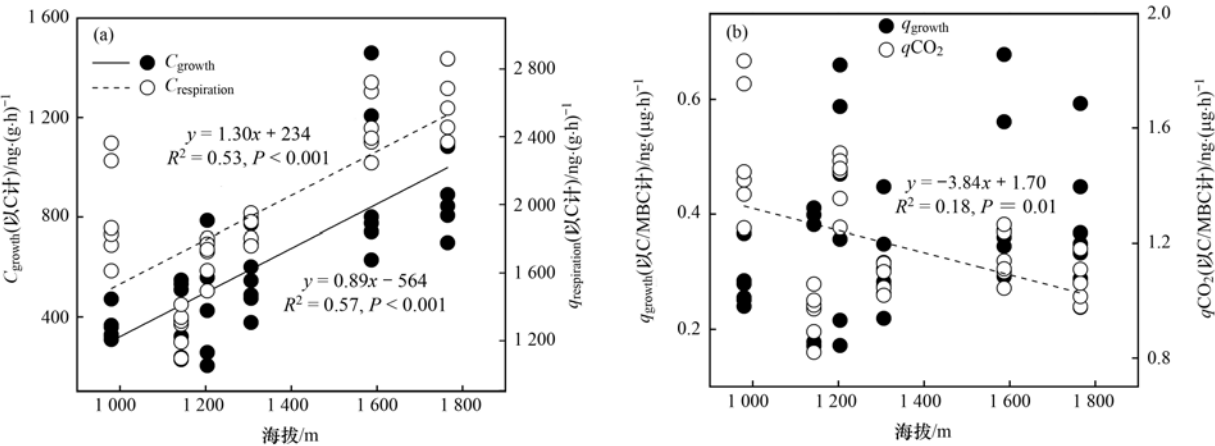


图 2 微生物生长速率 (C_{growth})、微生物呼吸速率 ($C_{\text{respiration}}$)、单位微生物生长 (q_{growth})和呼吸熵 (q_{CO_2}) 随海拔的变化

Fig. 2 Elevational pattern of microbial growth (C_{growth}), microbial respiration ($C_{\text{respiration}}$), microbial biomass based growth (q_{growth}), and metabolic quotients (q_{CO_2})

2.3 微生物生长速率和呼吸速率对 CUE 的影响

土壤微生物 CUE 随 C_{growth} 的增加而增加; 而与

$C_{\text{respiration}}$ 无显著关系 (图 3). 微生物 CUE 随 q_{growth} 增加而增加, 但随 $q\text{CO}_2$ 增加而减少 [图 3 (c) 和 3 (d)].

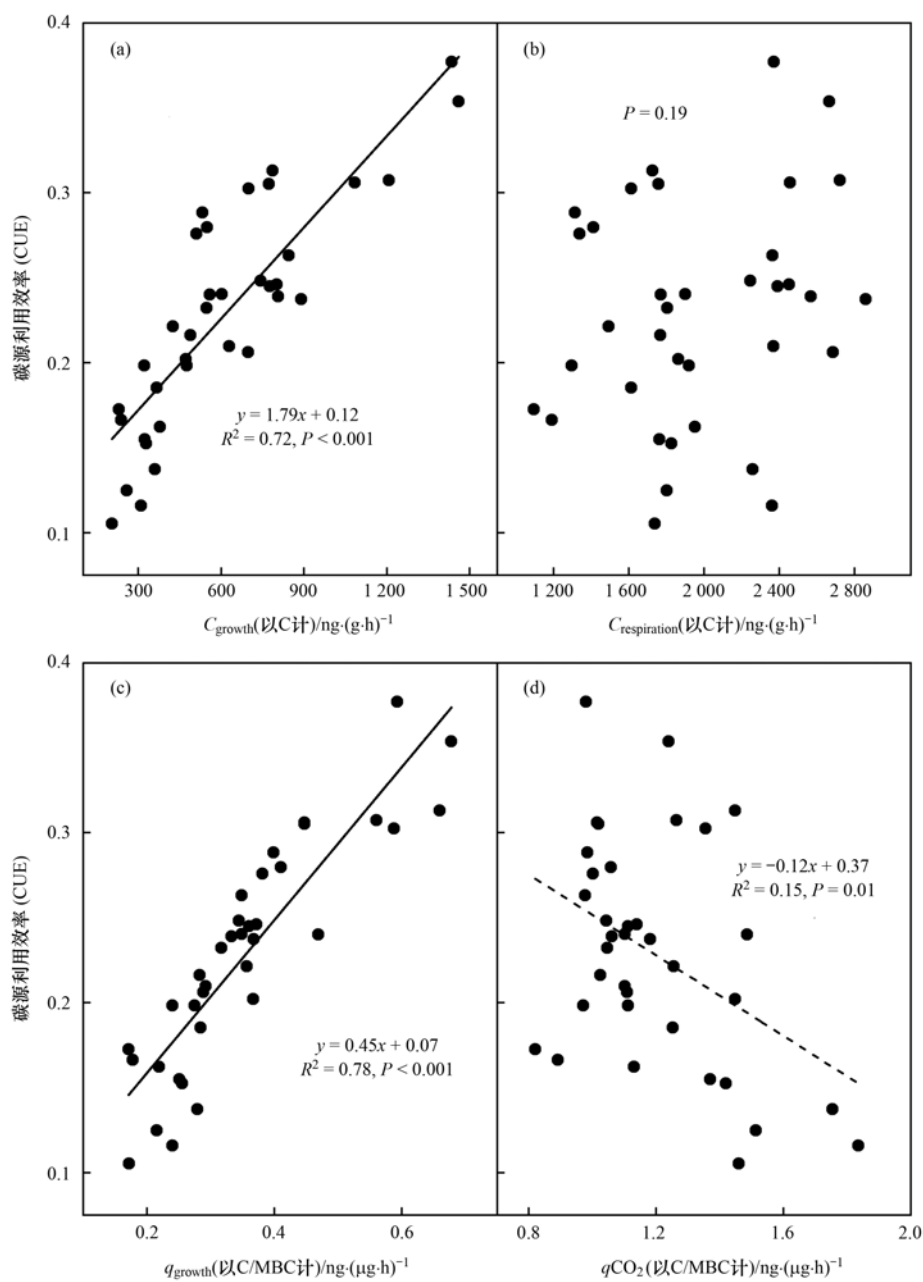


图3 土壤微生物生长速率 (C_{growth})、呼吸速率 ($C_{\text{respiration}}$)、单位微生物生长 (q_{growth}) 和呼吸熵 ($q\text{CO}_2$) 与微生物 CUE 的回归分析

Fig. 3 Regression analysis results between microbial CUE and microbial growth (C_{growth}), microbial respiration ($C_{\text{respiration}}$), microbial biomass based growth (q_{growth}), and metabolic quotients ($q\text{CO}_2$)

2.4 CUE、微生物生长和呼吸与土壤环境因素的相关性分析

土壤微生物 CUE 与 MAT 负相关, 与 SOC、TP、MBC 和 MBN 正相关 (图 4). C_{growth} 和 $C_{\text{respiration}}$ 与 MAT 和 pH 负相关, 与 SOC、TN、TP 和 MBC 正相关. q_{growth} 与 MAT 负相关, 与 SOC 正相关. $q\text{CO}_2$ 与 MAT 和 MBC: MBN 正相关, 与 SOC、MBC、MBN 和 C: N_{imbalance} 负相关 (图 4).

逐步回归分析表明 (表 3), MAT 是影响微生物 CUE 与 C_{growth} 变化的主要因素. TP 和 pH 是 $C_{\text{respiration}}$

的主要影响因素.

表3 微生物 CUE、 C_{growth} 和 $C_{\text{respiration}}$ 与各指标的逐步回归分析

Table 3 Stepwise regression analysis between microbial CUE, C_{growth} , and $C_{\text{respiration}}$ and other parameters		
线性模型方程	R^2	P
$\text{CUE} = -0.023\text{MAT} + 0.62$	0.39	0.001
$C_{\text{growth}} = -159.82\text{MAT} + 3\,321.74$	0.56	<0.001
$C_{\text{respiration}} = 3\,324.19\text{TP} - 2\,405.68\text{pH} + 11\,950.32$	0.74	<0.001

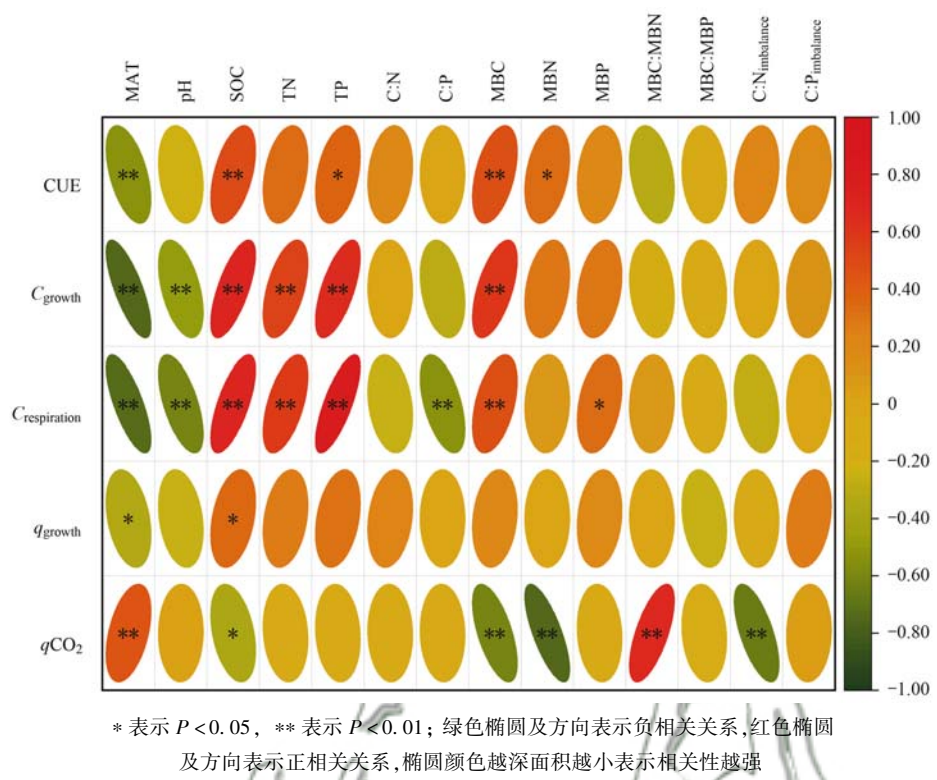


Fig. 4 Correlation coefficients between microbial CUE, C_{growth} , $C_{\text{respiration}}$, q_{growth} , and q_{CO_2} and other parameters

3 讨论

3.1 微生物生长速率、呼吸速率和 CUE 随海拔的变化

本研究中, C_{growth} 和 $C_{\text{respiration}}$ 均随海拔增加而增加, 这可能与土壤底物供应增加有关^[27,28], 这一点由 C_{growth} 和 $C_{\text{respiration}}$ 与 MBC 和 SOC 正相关可以证明. pH 显著抑制了微生物生长和呼吸, 然而对 CUE 并没有显著影响. 这同一些 pH 是影响土壤微生物的主要因素不完全一致^[29]. 以往研究中 q_{growth} 随温度的增加呈指数增长或呈二次项变化^[27], 但本研究中 q_{growth} 随海拔升高而显著变化. 另外, 有研究发现 q_{CO_2} 都随温度呈指数增长^[30] 或保持不变^[31], 本研究中 q_{CO_2} 随海拔升高而降低, 表明其与温度的正相关关系. 这可能说明微生物通过降低个体消耗的投入来应对环境变化, 并且相关分析表明这一应对策略是通过 SOC 调整微生物化学计量而实现的. 本研究中, 土壤微生物 CUE 随海拔的上升从 0.1 增至 0.40, 即在高海拔较低的温度环境中, 微生物 CUE 较高. 这一研究结果与以往的室内增温控制实验的结果相一致^[11,32,33]. 理论上, 微生物生长和呼吸速率与温度的关系以 Arrhenius 方程的形式呈现^[34]. 增温对微生物生长和呼吸均有促进作用, 但由于微生物生长对温度的敏感性低于呼吸, 使得 CUE 对升温表现出负反馈^[6,11]. 由于土壤温度是调节土壤微生物

活性的主要因素, 本研究中温度的下降显著提高了微生物 CUE, 这对预测碳循环如何响应气候变化十分重要.

3.2 微生物生长和呼吸对 CUE 的相对控制作用

本研究中微生物 CUE 与 C_{growth} 和 q_{growth} 呈正相关关系, 这与 Zheng 等^[30] 的研究结果一致. 他们发现短期增温下微生物 CUE 主要由微生物生长决定, 较少受呼吸作用的影响^[30]. 但 Pirt^[35] 的研究认为 CUE 与 q_{growth} 的正相关关系仅在微生物生长受到外界环境限制时才有所表现^[36,37]. 也有研究表明, 微生物 CUE 与 q_{growth} 的关系依赖于资源的有效性^[38]. 如 Panikov 等^[39] 的研究发现土壤微生物 CUE 和 q_{growth} 的关系受温度调节, 在 5 ~ 25℃, q_{growth} 随培养温度的增加而增加; 在 -35 ~ -18℃, q_{growth} 与 CUE 无相关性. 本研究中, 微生物 CUE 与 C_{growth} 和 q_{growth} 呈正相关, 这说明微生物可能在个体和群落两个水平的生长变化影响微生物 CUE. 另外, 本研究中微生物 CUE 与 $C_{\text{respiration}}$ 正相关, 而与 q_{CO_2} 负相关, 反映了在微生物个体层面沿海拔升高, SOC 和养分有效性增加, 呼吸代谢降低了. 因此, 综合来看, 沿海拔升高, 微生物 CUE 的增加是通过降低 q_{CO_2} 和增加 q_{growth} 的方式来实现的^[40], 这可能是高海拔位点土壤有机碳累积较高的一个重要原因.

3.3 环境因素对微生物 CUE 沿海拔变异的影响机制

微生物 CUE 变异受诸多因素的影响, 包括

SOC、养分含量^[33]、养分计量比^[1]、土壤微生物群落结构^[5]、土壤水分和温度^[41,42]. 本研究中,微生物 CUE 与 SOC 和 TP 正相关,说明增加的 SOC 和养分含量有利于微生物 CUE 的提高. 这一结果在模拟控制实验中也得到了证实,如模拟 N 沉降实验中,N 添加会降低微生物的呼吸代谢,提高微生物 CUE,促进微生物对易变碳的利用^[43,44]. 有研究也表明,当微生物生长受 P 限制时,微生物会增加 P 的吸收从而降低 CUE^[5,45]. 有研究也证实,土壤元素计量比对微生物 CUE 具有主导作用^[5],这是因为,微生物在受养分限制的环境中,会以呼吸或分泌胞外酶的形式释放碳,以获取受限的养分,这降低了微生物 CUE. 但本研究中土壤 C:N 比和 C:P 比对微生物 CUE 无显著影响,说明戴云山土壤微生物 CUE 主要受土壤有机碳和养分含量控制,而非化学计量比.

4 结论

(1)戴云山森林土壤微生物 CUE 随海拔的上升从 0.10 增加至 0.40. 微生物 CUE 与 C_{growth} 、 $C_{\text{respiration}}$ 和 q_{growth} 正相关,而与 q_{CO_2} 负相关,说明随着海拔的增加,微生物通过增加个体生长和抑制个体呼吸的策略增加微生物 CUE.

(2)微生物 CUE 与土壤有机碳和全磷含量正相关,与 MAT 负相关,说明随海拔增加,底物可利用性增加促进了微生物 CUE. 整体上,温度是控制 CUE 的最主要因素.

参考文献:

- [1] Sinsabaugh R L, Follstad Shah J J. Eoenzymatic stoichiometry and ecological theory[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2012, **43**(1): 313-343.
- [2] Tucker C L, Bell J, Pendall E, *et al.* Does declining carbon-use efficiency explain thermal acclimation of soil respiration with warming? [J]. *Global Change Biology*, 2013, **19**(1): 252-263.
- [3] Liang C, Schimel J P, Jastrow J D. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage [J]. *Nature Microbiology*, 2017, **2**(8), doi: 10.1038/nmicrobiol.2017.105.
- [4] Sinsabaugh R L, Moorhead D L, Xu X F, *et al.* Plant, microbial and ecosystem carbon use efficiencies interact to stabilize microbial growth as a fraction of gross primary production[J]. *New Phytologist*, 2017, **214**(4): 1518-1526.
- [5] 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.
- [6] Ye J S, Bradford M A, Dacal M, *et al.* Increasing microbial carbon use efficiency with warming predicts soil heterotrophic respiration globally[J]. *Global Change Biology*, 2019, **25**(10): 3354-3364.
- [7] 陈智,于贵瑞. 土壤微生物碳素利用效率研究进展[J]. *生态学报*, 2020, **40**(3): 756-767.
Chen Z, Yu G R. Advances in the soil microbial carbon use efficiency[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(3): 756-767.
- [8] Qiao Y, Wang J, Liang G P, *et al.* Global variation of soil microbial carbon-use efficiency in relation to growth temperature and substrate supply[J]. *Scientific Reports*, 2019, **9**(1), doi: 10.1038/s41598-019-42145-6.
- [9] Ratkowsky D A, Olley J, Mcmeekin T A, *et al.* Relationship between temperature and growth rate of bacterial cultures[J]. *Journal of Bacteriology*, 1982, **149**(1): 1-5.
- [10] Allison S D, Wallenstein M D, Bradford M A. Soil-carbon response to warming dependent on microbial physiology [J]. *Nature Geoscience*, 2010, **3**(5): 336-340.
- [11] Wetterstedt J Å M, Ågren G I. Quality or decomposer efficiency - which is most important in the temperature response of litter decomposition? a modelling study using the GLUE methodology [J]. *Biogeosciences*, 2011, **8**(2): 477-487.
- [12] Dijkstra P, Thomas S C, Heinrich P L, *et al.* Effect of temperature on metabolic activity of intact microbial communities: evidence for altered metabolic pathway activity but not for increased maintenance respiration and reduced carbon use efficiency[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**(10): 2023-2031.
- [13] Hagerty S B, Van Groenigen K J, Allison S D, *et al.* Accelerated microbial turnover but constant growth efficiency with warming in soil [J]. *Nature Climate Change*, 2014, **4**(10): 903-906.
- [14] 郭志明,张心昱,李丹丹,等. 温带森林不同海拔土壤有机碳及相关胞外酶活性特征[J]. *应用生态学报*, 2017, **28**(9): 2888-2896.
Guo Z M, Zhang X Y, Li D D, *et al.* Characteristics of soil organic carbon and related exo-enzyme activities at different altitudes in temperate forests [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(9): 2888-2896.
- [15] 曹瑞,吴福忠,杨万勤,等. 海拔对高山峡谷区土壤微生物生物量和酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, **27**(4): 1257-1264.
Cao R, Wu F Z, Yang W Q, *et al.* Effects of altitudes on soil microbial biomass and enzyme activity in alpine-gorge regions [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(4): 1257-1264.
- [16] Jones D L, Hill P W, Smith A R, *et al.* Role of substrate supply on microbial carbon use efficiency and its role in interpreting soil microbial community-level physiological profiles (CLPP) [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, **123**: 1-6.
- [17] Takriti M, Wild B, Schneckner J, *et al.* Soil organic matter quality exerts a stronger control than stoichiometry on microbial substrate use efficiency along a latitudinal transect [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, **121**: 212-220.
- [18] Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, *et al.* A large and persistent carbon sink in the world's forests [J]. *Science*, 2011, **333**(6045): 988-993.
- [19] Thüring E, Kaufmann E. Increasing carbon sinks through forest management: a model-based comparison for Switzerland with its eastern plateau and Eastern Alps[J]. *European Journal of Forest Research*, 2010, **129**(4): 563-572.
- [20] Qu L R, Wang C, Bai E. Evaluation of the ^{18}O - H_2O incubation method for measurement of soil microbial carbon use efficiency [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, **145**, doi: 10.1016/j.soilbio.2020.107802.
- [21] 袁磊,李文周,陈文伟,等. 戴云山国家级自然保护区大气氮沉降特点[J]. *环境科学学报*, 2016, **37**(11): 4142-4146.
Yuan L, Li W Z, Chen W W, *et al.* Characteristics of nitrogen

- deposition in Daiyun Mountain national nature reserve [J]. Environmental Science, 2016, **37**(11): 4142-4146.
- [22] Spohn M, Pötsch E M, Eichorst S A, *et al.* Soil microbial carbon use efficiency and biomass turnover in a long-term fertilization experiment in a temperate grassland[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, **97**: 168-175.
- [23] Guo M X. Soil sampling and methods of analysis[J]. Journal of Environmental Quality, 2009, **38**(1): 375.
- [24] Joergensen R G, Brookes P C, Jenkinson D S. Survival of the soil microbial biomass at elevated temperatures[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1990, **22**(8): 1129-1136.
- [25] Mooshammer M, Wanek W, Zechmeister-Boltenstern S, *et al.* Stoichiometric imbalances between terrestrial decomposer communities and their resources: mechanisms and implications of microbial adaptations to their resources [J]. Frontiers in Microbiology, 2014, **5**, doi: 10.3389/fmicb.2014.00022.
- [26] 宁赵, 程爱武, 唐海明, 等. 长期施肥下水稻根际和非根际土壤微生物碳源利用特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1475-1482.
- Ning Z, Cheng A W, Tang H M, *et al.* Microbial carbon source metabolic profile in rice rhizosphere and non-rhizosphere soils with different long-term fertilization management [J]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1475-1482.
- [27] Sinsabaugh R L, Turner B L, Talbot J M, *et al.* Stoichiometry of microbial carbon use efficiency in soils [J]. Ecological Monographs, 2016, **86**(2): 172-189.
- [28] Zhou Z Y, Zhang H, Yuan Z, *et al.* The nutrient release rate accounts for the effect of organic matter type on soil microbial carbon use efficiency of a *Pinus tabulaeformis* forest in Northern China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2020, **20**(1): 352-364.
- [29] Jones D L, Coolidge E C, Hoyle F C, *et al.* pH and exchangeable aluminum are major regulators of microbial energy flow and carbon use efficiency in soil microbial communities[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2019, **138**, doi: 10.1016/j.soilbio.2019.107584.
- [30] Zheng Q, Hu Y T, Zhang S S, *et al.* Growth explains microbial carbon use efficiency across soils differing in land use and geology [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2019, **128**: 45-55.
- [31] Xu X K, Inubushi K, Sakamoto K. Effect of vegetations and temperature on microbial biomass carbon and metabolic quotients of temperate volcanic forest soils[J]. Geoderma, 2006, **136**(1-2): 310-319.
- [32] Frey S D, Lee J, Melillo J M, *et al.* The temperature response of soil microbial efficiency and its feedback to climate[J]. Nature Climate Change, 2013, **3**(4): 395-398.
- [33] Manzoni S, Taylor P, Richter A, *et al.* Environmental and stoichiometric controls on microbial carbon-use efficiency in soils [J]. New Phytologist, 2012, **196**(1): 79-91.
- [34] Price P B, Sowers T. Temperature dependence of metabolic rates for microbial growth, maintenance, and survival [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, **101**(13): 4631-4636.
- [35] Pirt S J. The maintenance energy of bacteria in growing cultures [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1965, **163**(991): 224-231.
- [36] Koussémon M, Combet-Blanc Y, Ollivier B. Glucose fermentation by *Propionibacterium microaerophilum*: effect of pH on metabolism and bioenergetic [J]. Current Microbiology, 2003, **46**(2): 141-145.
- [37] Monod J. Recherches sur la croissance des cultures bactériennes [M]. Paris: Hermann, 1942.
- [38] Kreft J U, Bonhoeffer S. The evolution of groups of cooperating bacteria and the growth rate versus yield trade-off [J]. Microbiology, 2005, **151**(3): 637-641.
- [39] Panikov N S, Sizova M V. Growth kinetics of microorganisms isolated from Alaskan soil and permafrost in solid media frozen down to -35°C [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2007, **59**(2): 500-512.
- [40] Lipson D A. The complex relationship between microbial growth rate and yield and its implications for ecosystem processes[J]. Frontiers in Microbiology, 2015, **6**, doi: 10.3389/fmicb.2015.00615.
- [41] Xu X F, Schimel J P, Janssens I A, *et al.* Global pattern and controls of soil microbial metabolic quotient [J]. Ecological Monographs, 2017, **87**(3): 429-441.
- [42] Zhou L Y, Zhou X H, Shao J J, *et al.* Interactive effects of global change factors on soil respiration and its components: a meta-analysis[J]. Global Change Biology, 2016, **22**(9): 3157-3769.
- [43] Liu W X, Qiao C L, Yang S, *et al.* Microbial carbon use efficiency and priming effect regulate soil carbon storage under nitrogen deposition by slowing soil organic matter decomposition [J]. Geoderma, 2018, **332**: 37-44.
- [44] Sinsabaugh R L, Follstad Shah J J, Findlay S G, *et al.* Scaling microbial biomass, metabolism and resource supply [J]. Biogeochemistry, 2015, **122**(2): 175-190.
- [45] Shiah F K, Gong G C, Chen T Y, *et al.* Temperature dependence of bacterial specific growth rates on the continental shelf of the East China Sea and its potential application in estimating bacterial production[J]. Aquatic Microbial Ecology, 2000, **22**(2): 155-162.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution in Beijing During the Historical Period of the 2022 Olympic Winter Games	LIU Yue-chen, MAN Rui-qi, QIU Yan-ting, <i>et al.</i> (3895)
Observation Analyses of Aerosol Size Distribution Properties from February to March, 2019 in Tianjin Urban Area	HAO Jian, CAI Zi-ying, LIU Jing-le, <i>et al.</i> (3903)
Analysis of Typical Weather Circulation Patterns of Heavy PM _{2.5} Pollution and the Transport Pattern in the Yangtze River Middle Basin	WANG Ying, ZHI Xie-fei, BAI Yong-qing, <i>et al.</i> (3913)
Characteristics of Heavy Metals and Other Elements in Atmospheric Dry and Wet Deposition and Health Risk Assessment of a Typical Industrial and Mining City in Central Yunnan	FAN Chen-zi, LIU Yong-bing, YUAN Ji-hai, <i>et al.</i> (3923)
Characteristics and Reactivity of VOCs in a Typical Industrial City in Summer	QIN Tao, LI Li-ming, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (3934)
Chemical Reaction Activity and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Summer in Dalian	ZHU Ke-xin, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3944)
One-year Simulation of Air Pollution in Central China, Characteristics, Distribution, Inner Region Cross-transmission, and Pathway Research in 18 Cities	LIU Guang-jin, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (3953)
Characteristics of Ozone Pollution, Meteorological Impact, and Evaluation of Forecasting Results Based on a Neural Network Model in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (3966)
Temporal and Spatial Variations in Black Carbon Aerosol in Different Atmospheric Background Stations in China from 2006 to 2020	WANG Hong-lei, YAN Xue, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (3977)
Pollution Characteristics and Emission Factors of PCDD/Fs from Iron and Steel Industry	YANG Yan-yan, XIE Dan-ping, FU Jian-ping, <i>et al.</i> (3990)
Community Composition and Assessment of the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, CAO Liang, QU Ren-chao, <i>et al.</i> (3998)
Evaluation and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Sediments of the Yellow River Basin Based on Monte Carlo Simulation and PMF Model	PANG Kuo, LI Min, LIU Lu, <i>et al.</i> (4008)
Retention Effect of Heavy Metals in Rivers of a Typical Mountainous City by Cascade Weirs; A Case Study of Liangtan River in Chongqing	WANG Chao, JIA Bo-yang, PAN Cheng-yong, <i>et al.</i> (4018)
Estimation of Agricultural Non-point Source TN and TP Export Coefficients Based on Soil Loss	WANG You-xiao, HUANG Chong, LIU Gao-huan, <i>et al.</i> (4032)
Influence of Land Use and Land Cover Patterns on Water Quality at Different Spatio-temporal Scales in Hehuang Valley	LI Hao-hao, HUANG Yi-mei, GUO Wei, <i>et al.</i> (4042)
Groundwater Pollution Source Identification by Combination of PMF Model and Stable Isotope Technology	ZHANG Han, DU Xin-yu, GAO Fei, <i>et al.</i> (4054)
Antibiotic Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment in Jinjiang River Basin, Jiangxi Province	LI Jia-le, WANG Meng, HU Fa-wang, <i>et al.</i> (4064)
Screening and Control Measures for New Priority Pollutants in Surface Water of Tianjin	WU Yan-qi, SONG Shuai, SHI Ya-juan, <i>et al.</i> (4074)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i> (4087)
Analysis of the Seasonal Changes in Planktonic Microbial Diversity in Urban River Supplied with Reclaimed Water: A Case Study of the North Canal River	YUAN Xun-chao, WANG Min, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (4097)
Spectroscopic and Molecular Characterization of Water Soluble Organic Matter from Sediments in the Macrophyte-dominated and Algae-dominated Zones of Taihu Lake	DU Ying-xun, DAI Jia-ru, ZHANG Qiao-ying, <i>et al.</i> (4108)
Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) from Lake Taihu and the Corresponding Potential Driving Factors	LIU Chao-rong, ZHU Jun-yu, LI Yu-yang, <i>et al.</i> (4118)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Bioretention Systems of Sponge Cities	LEI Xiao-ling, QIU Li-na, WEI Ze-jun, <i>et al.</i> (4127)
Treatment Effect of Corncob and Rice Straw Enhanced Subsurface Flow Constructed Wetland on Low C/N Ratio Wastewater	HU Man-li, HAO Qing-ju, MA Rong-zhen, <i>et al.</i> (4136)
Investigation of the Performance of Organic Contaminant Degradation by Fe ²⁺ /PDS Under Environmentally Relevant pH Conditions	LIU Ying, GUO Yi-wei, QIAO Jun-lian, <i>et al.</i> (4146)
Typical Pesticide Residues and Their Risk Assessment in Farmland Environment of Different Plant Types in Shayu County, Xinjiang	XIE Xuan-xuan, NUERLA Ailijiang, BALATI Maihemuti, <i>et al.</i> (4154)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Poultry Farm in Ningxia	SHEN Cong, ZHANG Jun-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (4166)
Enrichment Factors of Soil-Se in the Farmland in Shizuishan City, Ningxia	WANG Ying, LIU Hai-yan, WANG Ze-jing, <i>et al.</i> (4179)
Zoning and Safe Utilization Method of Heavy Metal Contaminated Cultivated Land at Block Scale	WANG Rui, YU Jing, LI Yu, <i>et al.</i> (4190)
Spatial Distribution, Source Apportionment, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Jianghugongmi Producing Area, Shandong Province	YU Lin-song, WAN Fang, FAN Hai-yin, <i>et al.</i> (4199)
Assessing the Lead Accumulation Risks of Wheat Grain by Developing a Source-Specific Accumulation Risk Assessment Model	YANG Yang, LI Yan-ling, NIU Shuo, <i>et al.</i> (4212)
Accumulation Effects and Health Risks of Heavy Metals in Rice in Location-based Cadmium Anomaly Area in Liuzhou	ZHU Liang-liang, WANG Fu-peng, TANG Le-bin, <i>et al.</i> (4219)
Accumulation and Transport Characteristics of Cd, Pb, Zn, and As in Different Maize Varieties	REN Chao, XIAO Jian-hui, LI Jing-tian, <i>et al.</i> (4232)
Remediation Potential of <i>Taraxacum kok-saghyz</i> Rodin on Lead and Cadmium Contaminated Farmland Soil	ZHANG Heng, XIONG Ming-biao, WANG Qian-xin, <i>et al.</i> (4253)
Remediation Potential of Three Dwarf Bamboos on Farmland Soils Contaminated with Mixed Heavy Metals	ZHANG Ying, ZHAO Xin, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (4262)
Impacts of Uptake and Accumulation of Cd on Double Rice-Paddy Soil by Silicon Fertilizer Continuous Application	PENG Hua, DENG Kai, SHI Yu, <i>et al.</i> (4271)
Effect of Modified Chitosan Loaded with Silica on Arsenic Uptake and Transport in Rice	YANG Jia-yi, SUN Meng-qiang, XIAO Yu-tang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Chelating Agents and Organic Acids on Remediation of Cadmium and Arsenic Complex Contaminated Soil Using <i>Xanthium sibiricum</i>	ZHANG Ya-rui, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i> (4292)
Effects of Water Management on the Transformation of Iron Oxide Forms in Paddy Soils and Its Coupling with Changes in Cadmium Activity	LI Ming-yuan, ZHANG Xiao-ting, LIU Han-yi, <i>et al.</i> (4301)
Effects of Iron Intensity-regulated Root Microbial Community Structure and Function on Cadmium Accumulation in Rice	ZHENG Shen, HUANG Dao-you, LI Bo, <i>et al.</i> (4313)
Effects of Mulching and Slow-release Fertilizer Application Reduction on Soil Microbial Community Structure in Rapeseed Field Under Two Different Rainfall Conditions	FENG Jun, SHI Chao, Hafiz Athar Hussain, <i>et al.</i> (4322)
High-Throughput Sequencing Combined with Metabonomics to Analyze the Effect of Heavy Metal Contamination on Farmland Soil Microbial Community and Function	PANG Fa-hu, LI Xiao-qi, DUAN Li-yang, <i>et al.</i> (4333)
Characteristics of Microbial Community Structure in the Surrounding Farmlands of a Mercury Mining Area and Its Environmental Driving Factors	CHEN Fen, YU Gao, SUN Yue-bing, <i>et al.</i> (4342)
Comparison of Bacterial Community Structure in Soil Aggregates Between Natural Karst Wetland and Paddy Field	LENG Meng, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4353)
Elevational Pattern and Control Factors of Soil Microbial Carbon Use Efficiency in the Daiyun Mountain	LÜ Kun, WANG Jing-jing, WU Guo-peng, <i>et al.</i> (4364)
Effect of Long-term Straw Returning on the Mineralization and Priming Effect of Rice Root-carbon	LIU Feng, WANG Yun-qiu, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Straw Returning and Biochar Application on Summer Maize Yield and Soil N ₂ O Emission in Guanzhong Plain	BAI Jin-ze, LIU Zhen-yuan, SONG Jia-jie, <i>et al.</i> (4379)
Effects of Polystyrene Nanoplastics (PS-NPs) on the Physiology of <i>Allium sativum</i> L.	QIU Chen-chen, LI Guo-xin, LI Qing-song, <i>et al.</i> (4387)
Effect of Microplastics on Soil Water Infiltration and Evaporation	WANG Zhi-chao, ZHANG Bo-wen, NI Jia-xuan, <i>et al.</i> (4394)
Life Cycle Assessment and Key Parameter Comparison of Hydrogen Fuel Cell Vehicles Power Systems	CHEN Yi-song, LAN Li-bo, HAO Zhuo, <i>et al.</i> (4402)