

引用格式:巢林,曾鑫,欧梦菲,黄忻婷,张建兵,刘艳艳.喀斯特山区不同土地利用方式对土壤微生物量、酶活性及其化学计量的影响[J].山地学报,2023,41(1):28-40.

CHAO Lin, ZENG Xin, OU Mengfei, HUANG Xinting, ZHANG Jianbing, LIU Yanyan. Effects of different land use patterns on soil microbial biomass, enzyme activity and stoichiometry in the mountainous karst areas of China [J]. Mountain Research, 2023, 41(1): 28-40.

## 喀斯特山区不同土地利用方式对土壤微生物 生物量、酶活性及其化学计量的影响

巢林<sup>1a, 1b, 2, 3</sup>, 曾鑫<sup>1c</sup>, 欧梦菲<sup>1c</sup>, 黄忻婷<sup>1c</sup>, 张建兵<sup>1a, 1b</sup>, 刘艳艳<sup>1a, 1b\*</sup>

(1. 南宁师范大学 a. 北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室; b. 广西地表过程与智能模拟重点实验室;  
c. 地理科学与规划学院, 南宁 530001; 2. 中国科学院华南植物园 中国科学院退化生态系统植被恢复与管理重点实验室,  
广州 510650; 3. 湖南会同森林生态系统国家野外科学观测研究站, 湖南 会同 4183072)

**摘要:**土地利用改变土壤理化性质,显著影响土壤微生物属性。在中国喀斯特地区,针对不同土地利用方式下土壤酶活性及其化学计量特征与土壤环境因子之间的关系,仍缺乏精确的定量认知,无法科学指导土地利用结构的优化与生态系统功能的维持。本文选取中国广西弄岗自然保护区4种土地利用方式(农田、草地、灌木林和森林)地块,采用土壤生物化学、酶学等方法,探讨不同土地利用方式对喀斯特土壤基本理化性质、微生物生物量、微生物酶活性及酶化学计量的影响。结果表明:(1)土地利用方式显著影响土壤基础理化性质,土壤pH、有机碳(SOC)和全氮(N)含量表现为灌木林和森林显著高于农田和草地,而农田和草地土壤有效磷(AP)含量则显著高于森林和灌木林;(2)土壤微生物碳(MBC)和微生物氮(MBN)表现为灌木林>农田>森林>草地,且灌木林MBC和MBN显著高于其他土地利用方式,微生物磷(MBP)在农田土壤中最高;冗余分析(RDA)表明有效氮(AN)和pH是驱动土壤微生物生物量变化的主要环境因子;(3)微生物碳氮比(qMBC)和微生物氮磷比(qMBN)均表现为农田>灌木林>草地>森林,且农田土壤qMBC和qMBN显著高于森林,而不同土地利用方式土壤微生物磷(qMBP)无显著差异;(4)不同土地利用方式显著影响N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(NAG)、 $\beta$ -葡萄糖苷酶(BG)和酚氧化酶(PhO)活性,土壤酶活性变化受土壤C:N、SOC、pH和P含量调控;(5)不同土地利用方式对土壤酶化学计量碳氮比(eC:N)、碳磷比(eC:P)、氮磷比(eN:P)和微生物资源限制程度具有显著影响,磷是喀斯特地区土壤微生物最为受限的元素,由农田、草地到灌木林,微生物碳限制逐步增加,森林土壤碳限制程度最低。喀斯特地区不同土地利用方式引起土壤理化性质的改变是土壤微生物生物量、酶活性和酶化学计量变化的主要驱动力。研究结果可为喀斯特地区土地利用的科学规划提供参考,对预测喀斯特地区土壤微生物属性如何响应全球变化背景下土地利用与覆被变化具有重要作用。

**关键词:**土地利用;土壤性质;土壤养分;微生物酶;冗余分析;中国喀斯特山区

**中图分类号:** Q148

**文献标志码:** A

收稿日期(Received date): 2022-09-17; 改回日期(Accepted date): 2023-02-20

基金项目(Foundation item): 中央引导地方科技发展基金项目(桂科AD19245133;桂科AD20238078);中国博士后科学基金(2022M713194);南宁师范大学科研启动项目(602021239257, 602021239137);北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室开放课题(NNNU-KLOP-X1917, GTEU-KLOP-X1709)。[Local Science and Technology Development in Central Government Guides (AD19245133, AD20238078);China Postdoctoral Science Foundation (2022M713194);Project for Science Research Initiation of Nanning Normal University (602021239257, 602021239137);Opening Foundation of Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf Ministry of Education (NNNU-KLOP-X1917, GTEU-KLOP-X1709)]

作者简介(Biography): 巢林(1988-),男,博士,安徽六安人,助理研究员,主要研究方向:森林生态学。[CHAO Lin (1988-), male, Ph.D., born in Lu'an, Anhui province, assistant professor of research, research on forest ecology] E-mail: fjchaolin@126.com

\* 通讯作者(Corresponding author): 刘艳艳(1986-),女,博士,助理研究员,主要研究方向:植物生理生态。[LIU Yanyan (1986-), female, Ph.D., assistant professor of research, research on plant physiology ecology] E-mail: liuyanyan5000@163.com

土壤微生物是陆地生态系统植物多样性和生产力的重要驱动者<sup>[1]</sup>,对陆地生态系统生物地球化学循环过程和生态系统功能服务的发挥至关重要<sup>[2-3]</sup>。土壤微生物代谢活动取决于微生物生物量和酶活性<sup>[4-5]</sup>,而微生物的生长和活性则受土壤碳和养分有效性的制约(微生物资源限制)<sup>[6-7]</sup>。土壤酶化学计量比可以表征土壤微生物是受限于能量还是养分<sup>[8]</sup>。因此,借助酶生态化学计量比对于准确评估土壤生态系统微生物代谢与养分循环之间的关系尤为重要。此外,土壤微生物过程与土地利用方式密切相关<sup>[9]</sup>,例如土地利用方式的变化会引起土壤物理化学性质的改变,从而对土壤微生物生物量、酶活性和酶化学计量产生深刻影响<sup>[10]</sup>。因此,了解土壤微生物生物量、酶活性及其化学计量特征可以揭示土壤微生物与环境因子之间的相互关系以及土壤微生物对人为干扰的响应机制<sup>[11]</sup>。

喀斯特生态系统是陆地生态系统的重要组成部分<sup>[12]</sup>。中国西南喀斯特地区是全球三大岩溶集中分布区中面积最大、岩溶作用最为强烈的地区,同时也是石漠化最严重和生态环境最脆弱的地区之一<sup>[13]</sup>。与非喀斯特地区相比,喀斯特生态系统具有岩石裸露率高、土层浅薄不连续、土壤富钙偏碱、养分总量不足且易流失等特征<sup>[14]</sup>。因此喀斯特地区土壤微生物特征及其与土壤环境因子之间的关系具有一定的独特性。土壤微生物作为喀斯特生态系统的重要组成部分,在喀斯特石漠化治理与植被恢复过程中具有十分重要的地位与作用。

近年来,对喀斯特地区土壤微生物相关研究集中于微生物生物量和酶活性<sup>[15]</sup>、微生物群落组成和多样性<sup>[16-17]</sup>等方面。针对不同土地利用方式下土壤微生物研究表明,喀斯特地区土壤微生物特征与土地利用方式高度相关,如喀斯特森林土壤微生物生物量最高,其次为灌木林和草地<sup>[12,18]</sup>;此外,也有研究显示喀斯特山区林地和梯田土壤养分状况和酶活性显著高于坡耕地<sup>[19]</sup>。贵州省喀斯特地区土壤微生物酶活性主要受土壤 N 含量、C:N、C:P 和 pH 调控<sup>[19]</sup>。酶化学计量研究显示<sup>[12]</sup>,喀斯特生态系统土壤微生物主要受碳和磷的限制,且与非喀斯特森林相比,喀斯特森林受磷限制更为严重<sup>[20]</sup>。实践表明<sup>[21]</sup>,土地利用方式的转化或调整不仅有利于喀斯特地区水土流失与石漠化的治理,还有助于土壤性质和质量的改善与提升。然而,由于区域环境的

空间异质性,喀斯特山区不同土地利用方式土壤理化性质、微生物生物量、酶活性以及酶化学计量变化过程及其驱动机制仍不明确。因此,明确喀斯特山区不同土地利用方式土壤微生物生物量、酶活性及其化学计量特征与土壤性质之间的内在联系有助于上述问题的解决。

本研究以广西弄岗国家级自然保护区为研究区,选择农田、草地、灌木林和森林 4 种土地利用方式下的地块,对比不同土地利用方式土壤理化性质、微生物生物量、微生物酶活性及其化学计量特征的差异,采用土壤生物化学、酶学等方法探究土壤环境因子与微生物生物量、酶活性及酶化学计量之间的关联,以揭示喀斯特山区不同土地利用方式对土壤生物和非生物环境的影响及其内在驱动机制,为喀斯特地区土壤利用方式的科学规划与可持续发展提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区域位于广西弄岗国家级自然保护区,地理位置为 106°42'28" ~ 107°4'54"E, 22°13'56" ~ 22°39'9"N,属北热带季风气候,年均温 22℃,平均最高气温(7月)28℃,平均最低气温(1月)13℃,≥10℃积温 7400℃~7900℃,年均日照时数 1500~1800 h,年降雨量 1150~1550 mm,干湿季节明显,其中 75% 的降水量集中在 5—9 月。地貌类型为典型的喀斯特峰丛洼地和峰丛谷地,海拔 150~500 m,土壤为石灰岩发育而成的石灰土,植被类型为北热带喀斯特季节性雨林,生物多样性极其丰富。

### 1.2 样品采集与处理

2021 年 7 月,在广西弄岗国家级自然保护区弄岗保护站选择相邻 4 种不同土地利用方式地块,即农田、草地、灌丛和森林(图 1)。其中农田种植甘蔗(*Saccharum officinarum*),连续种植甘蔗时间约 50 a,草地形成时间大约为 30 a,原先也为甘蔗用地,目前以鬼针草(*Bidens pilosa*)为主;灌木林以宿萼木(*Strophoblachia fimbriatylx*)、蜜花美登木(*Gymnosporia confertiflora*)、垂茉莉(*Clerodendrum wallichii*)等为优势种;森林主要树种组成为东京桐(*Deutzianthus tonkinensis*)、海南椴(*Diplodiscus trichospermus*)、木蝴蝶(*Oroxylum indicum*)等。连续



图 1 不同土地利用方式土壤取样区域景观图

Fig. 1 Landscape of soil sampling under different land use patterns

晴朗天气条件下,在每种土地利用方式下用土钻随机钻取 15 个表层(0 ~ 10 cm)土壤,土壤样品充分混合,剔除可见的植物根系和杂质,过 2 mm 筛后分成两部分,一部分土壤样品立即放入 4 ℃ 冰箱用于土壤微生物生物量和酶活性测定,另一部分土壤样品自然风干研磨后用于测定土壤基础理化性质。

### 1.3 土壤指标测定

采用烘干法测定土壤含水率,土壤 pH 值采用电位法测定(1:2.5 土水比浸提液),土壤有机碳(SOC)和全氮含量采用 CN 元素分析仪(ElementarVario, Hanau, Germany)测定;土壤有效氮和有效磷含量分别用氯化钾和氟化铵-盐酸浸提后运用流动注射分析仪(AA3, BRAN + LUEBBE, Norderstedt, Germany)测定;土壤总磷测定采用钼锑抗比色法;采用氯仿熏蒸法测定土壤微生物碳氮磷;微生物熵碳(qMBC)、微生物熵氮(qMBN)和微生物熵磷(qMBP)分别为 MBC/SOC、MBN/N、MBP/P 的比值。

采取底物诱导法用多功能酶标仪测定土壤酶活性<sup>[22]</sup>,包括 3 种水解酶,即 N-乙酰氨基葡萄糖苷(NAG)、β-葡萄糖苷酶(BG)和酸性磷酸酶(AP);2 种氧化酶,即酚氧化酶(PHO)和过氧化物酶(PER)。水解酶活性和氧化酶活性测定分别用伞形酮(MUB)和 L-二羟基苯丙氨酸(L-DOPA)为底物标示。具体测定步骤如下:称 1.5 g 鲜土加入 125 mL 50 mM 的醋酸盐缓冲液(pH = 5),使用磁力搅拌器搅拌 10 min 使其均质化,用移液器吸取 200 μL 移入 96 孔微孔板。水解酶微孔板置于暗环境下 20 ℃ 恒温培养 4 h 后,加入 10 μL NaOH(1.0 mol · L<sup>-1</sup>)使其反应停止,运用多功能酶标仪(SpectraMax M5, Molecular Devices, USA)配备的 365 nm 激发光谱和 450 nm 荧光扫描滤片的微孔板荧光光度计测定其荧光度。氧化酶采用微孔板分光光度计测定其在

450 nm 处的吸光度,酶活性用每小时每克干土产生的酶的摩尔质量(μmol)来表征。

### 1.4 数据分析

利用土壤酶化学计量(长度和角度)的矢量分析土壤微生物资源限制状况公式如下<sup>[5]</sup>:

$$eC : N = BG/NAG \quad (1)$$

$$eC : P = BG/AP \quad (2)$$

$$eN : P = NAG/AP \quad (3)$$

$$VL = \sqrt{(BG/(BG + AP))^2 + (BG/(BG + NAG))^2} \quad (4)$$

$$VA = \text{Degrass}(\text{ATAN2}(BG/(BG + AP)), BG/(BG + NAG)) \quad (5)$$

式中,eC:N、eC:P、eN:P 分别表示土壤酶化学计量碳氮比、碳磷比和氮磷比;VL 为矢量长度,表示微生物能量相对于养分的限制,矢量长度值越大,微生物相对碳限制越严重;VA 为矢量角度,表示磷元素相对于氮元素的限制程度,VA > 45° 和 < 45° 分别表示微生物 N 限制和 P 限制的相对程度。

采用 SPSS 26.0 进行单因素方差分析(One-way ANOVA)比较不同土地利用方式土壤理化性质、微生物生物量、酶活性以及酶化学计量等各指标的差异,运用 Turkey HSD 进行显著性检验(α = 0.05);利用 Pearson 相关分析、逐步回归分析和冗余分析(RDA)探索土壤理化因子与微生物生物量、酶活性和酶化学计量之间的关系;RDA 分析在 Canoco 5.0 软件中进行,Pearson 相关分析在 R 4.2.1 软件中完成,图表用 OriginPro 2018 绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同土地利用方式土壤理化性质

不同土地利用方式土壤碳和养分化学特征差异显著(表 1)。灌木林土壤含水率、pH、SOC、TN、AN

表 1 不同土地利用方式土壤理化性质

Tab. 1 Physical and chemical properties of soil under different land use patterns

土地利 用方式	含水率/%	pH	总有机碳/ (g · kg <sup>-1</sup> )	全氮/ (g · kg <sup>-1</sup> )	总磷/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	有效氮/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	有效磷/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	碳氮比
农田	14.96 ± 0.22 c	4.88 ± 0.03 c	18.89 ± 0.05 c	2.19 ± 0.01 d	141.74 ± 27.53 ab	104.02 ± 10.63 b	16.86 ± 0.74 a	8.63 ± 0.04 c
草地	19.35 ± 0.13 b	6.11 ± 0.01 b	18.48 ± 0.13 c	1.79 ± 0.02 c	124.57 ± 18.53 ab	87.66 ± 4.03 b	6.21 ± 0.34 b	10.31 ± 0.05 b
灌木林	34.57 ± 0.50 a	7.13 ± 0.12 a	91.21 ± 0.39 a	6.36 ± 0.02 a	61.03 ± 10.94 b	1207.68 ± 66.77 a	2.60 ± 0.16 c	14.35 ± 0.10 a
森林	15.31 ± 0.17 c	6.82 ± 0.06 a	44.12 ± 0.09 b	5.31 ± 0.01 b	152.33 ± 12.28 a	51.50 ± 2.92 b	2.75 ± 0.22 c	8.30 ± 0.03 d

注:同列数据后不同小写字母表示不同土地利用方式间差异显著( $P < 0.05$ )。

和 C/N 均显著高于其余 3 种土地利用方式土壤;TP 含量最高的为森林土壤( $152\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),显著高于灌木林土壤( $61\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),是灌木林 TP 含量的 2.5 倍,但 TP 在农田、草地和森林土壤三者之间无显著差异;土壤 AP 含量表现为农田 > 草地 > 森林 > 灌木林,农田和草地土壤 AP 含量显著高于森林和灌木林土壤,但森林和灌木林土壤二者之间 AP 含量无显著差异。

2.2 不同土地利用方式土壤微生物生物量

4 种土地利用方式土壤微生物生物量与微生物熵见图 2。不同土地利用方式对 MBC、MBN、MBP 以及 qMBC、qMBN 均具有显著影响( $P <$

$0.05$ ),然而不同土地利用方式土壤之间 qMBP 无显著差异。灌木林 MBC 含量( $799\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )显著高于农田( $277\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、森林( $203\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )和草地( $130\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )土壤,但农田、森林和草地土壤三者之间 MBC 含量差异不显著(图 2a);土壤 MBN 含量同样表现为灌木林 > 农田 > 森林 > 草地,灌木林最高( $186\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),显著高于其他土地利用类型(图 2b);农田 MBP 含量最高( $11\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),分别是草地、灌木林和森林的 2.5、8.6 和 8.5 倍(图 2c);农田的 qMBC 最高,为森林的 3 倍,但与草地、灌木林无显著差异(图 1d,  $P > 0.05$ );qMBN 表现出与 qMBC 结果一致,均为农田 > 灌木林 > 草地 > 森

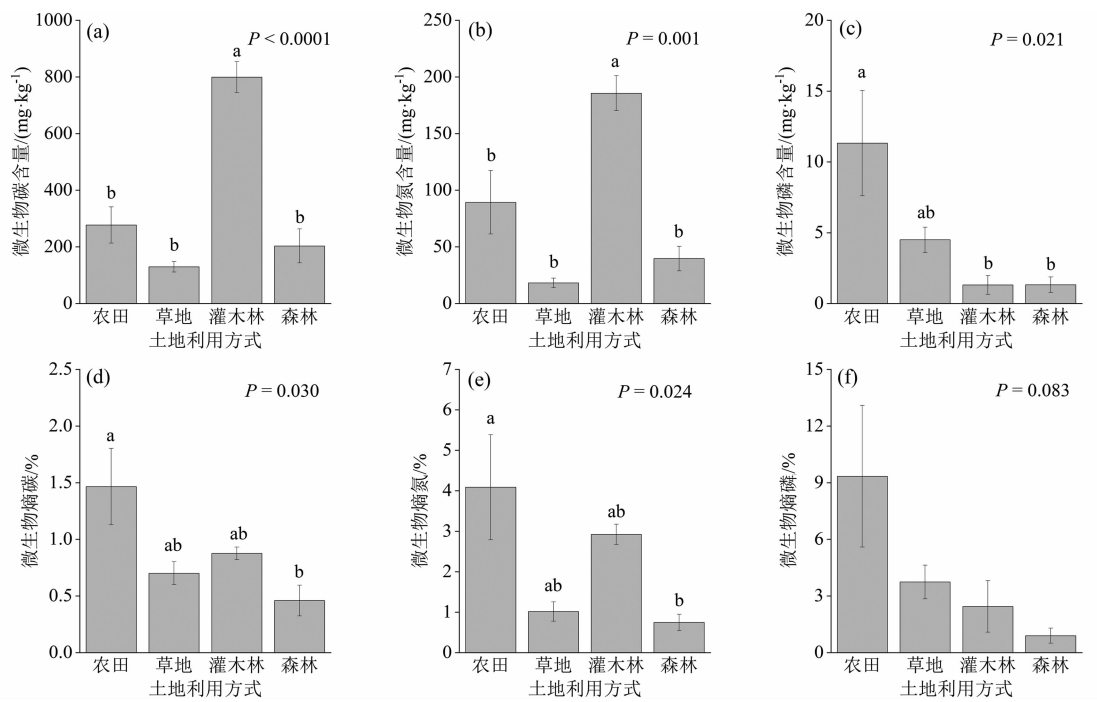


图 2 不同土地利用方式土壤微生物生物量与微生物熵:

(a) 微生物碳; (b) 微生物氮; (c) 微生物磷; (d) 微生物熵碳; (e) 微生物熵氮; (f) 微生物熵磷

Fig. 2 Microbial biomass and quotients under different land use patterns: (a) microbial carbon; (b) microbial nitrogen; (c) microbial phosphorus; (d) microbial quotient carbon; (e) microbial quotient nitrogen; (f) microbial quotient phosphorus

林(图 2e)。然而,不同土地利用方式土壤 qMBP 无显著差异(图 2f)。

2.3 不同土地利用方式土壤微生物酶活性及其化学计量

不同土地利用方式土壤 BG、NAG 和 PHO 活性差异极显著( $P < 0.01$ ),但 PER 活性无显著差异(表 2)。灌木林土壤 BG 活性为  $210 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ,分别为农田和森林的 4.5 和 1.7 倍,但灌木林与草地的 BG 活性无显著差异;森林土壤 NAG 活性显著高于其他土地利用方式土壤,但农田、草地和灌木林 3 种土壤利用方式之间 NAG 差异不显著;森林土壤 AP 活性 ( $2488 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) 最高,灌木林 ( $380 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) 最低,但与农田和草地无显著差异;草地和灌木林 PHO 活性均显著高于农田和森林,且草地 ( $0.14 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) 最高,是其他三种土地利用方式土壤的 1.4~2.5 倍。

与土壤酶活性类似,不同土地利用方式土壤 eN:P 差异显著( $P < 0.05$ ),eC:N 和 eC:P 差异达极显著水平( $P < 0.01$ )。灌木林土壤 eC:N(4.66)和 eC:P(0.63)均显著高于其他三种土地利用方式土壤,森林土壤 eC:N 最低(0.34),而农田土壤 eC:P

最低(0.03)(表 2);森林土壤 eN:P 最高(0.19),是农田(0.04)和森林土壤(0.04)的 4.6 倍、灌木林土壤的 1.3 倍。

不同土地利用方式土壤酶化学计量存在差异,这表明不同土地利用方式强烈影响土壤微生物养分的供应。如图 3a 所示,4 种土地利用方式下土壤所有数据点均高于 1:1 线,表明土壤微生物群落受到磷元素的严重限制。酶化学计量研究显示,不同土地利用方式土壤矢量长度和矢量角度存在极显著差异( $P < 0.01$ )。从农田、草地到灌木林,矢量长度呈增加趋势,森林土壤矢量长度最小(图 3b)。不同土地利用方式土壤矢量角度均大于  $45^\circ$ ,表明不同土地利用方式土壤微生物受磷元素限制,其中农田和草地土壤矢量角度相对更大,受磷元素限制更为强烈。

2.4 土壤环境因子与微生物生物量、酶活性和酶化学计量的相关性

MBC 和 MBN 与土壤含水率(SWC)、SOC、全氮、有效 N 和 C/N 呈显著正相关,与总磷含量呈显著负相关(图 4);MBP 含量与土壤 pH 和全氮呈显著负相关,而与有效 P 呈显著正相关;qMBC 和

表 2 不同土地利用方式土壤酶活性和化学计量

Tab. 2 Soil enzyme activities and stoichiometry under different land use patterns

土地 利用 方式	土壤酶活性/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ )					酶化学计量		
	$\beta$ -葡萄糖 苷酶	N-乙酰氨基 葡萄糖苷酶	酸性磷酸酶	过氧化物酶	酚氧化酶	酶 C:N	酶 C:P	酶 N:P
农田	46.23 $\pm$ 5.79 c	63.57 $\pm$ 7.57 b	1434.08 $\pm$ 149.72 ab	0.13 $\pm$ 0.01	0.06 $\pm$ 0.01 c	0.73 $\pm$ 0.07 bc	0.03 $\pm$ 0.00 b	0.04 $\pm$ 0.00 b
草地	180.01 $\pm$ 0.90 ab	71.25 $\pm$ 10.10 b	1731.97 $\pm$ 260.65 ab	0.15 $\pm$ 0.01	0.14 $\pm$ 0.01 a	2.54 $\pm$ 0.06 b	0.11 $\pm$ 0.00 b	0.04 $\pm$ 0.00 b
灌木林	209.50 $\pm$ 14.06 a	47.74 $\pm$ 9.14 b	380.06 $\pm$ 94.90 b	0.10 $\pm$ 0.01	0.10 $\pm$ 0.00 b	4.66 $\pm$ 0.79 a	0.63 $\pm$ 0.15 a	0.15 $\pm$ 0.05 ab
森林	124.60 $\pm$ 2.11 b	416.10 $\pm$ 99.81 a	2488.29 $\pm$ 817.95 a	0.09 $\pm$ 0.01	0.07 $\pm$ 0.00 c	0.34 $\pm$ 0.10 c	0.07 $\pm$ 0.03 b	0.19 $\pm$ 0.04 a

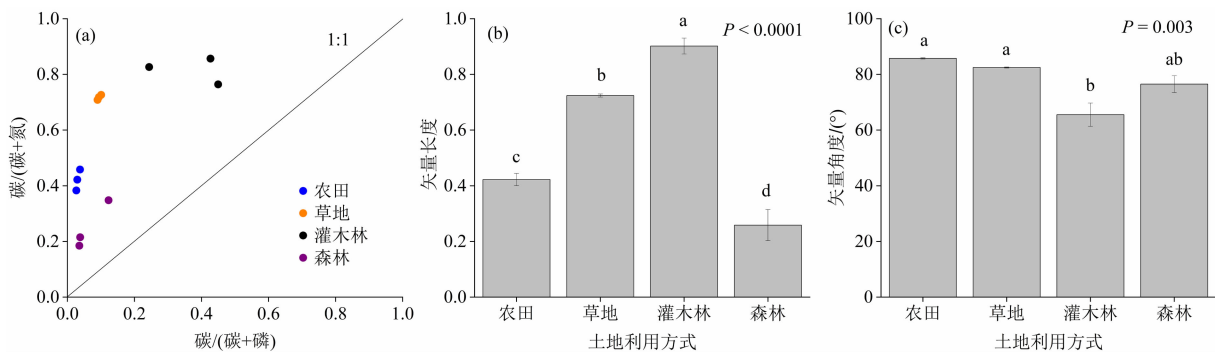


图 3 酶化学计量特征:(a)碳氮获取酶与碳磷获取酶相对比例;(b)矢量长度;(c)矢量角度

Fig. 3 Eco-enzyme stoichiometry trait:(a) the relative proportions of C to P acquisition versus C to N acquisition;(b) vector lengths;(c) vector angles



qMBP 与土壤 pH 呈显著负相关,而 qMBC、qMBN 以及 qMBP 均与土壤有效 P 含量呈显著正相关。NAG 和 PHO 活性与土壤环境因子不相关;BG 与土壤 pH、SWC、SOC、有效 N 和 C/N 显著正相关,与有效 P 和总磷呈显著负相关;AP 活性与 SWC、有效 N 以及 C/N 呈显著负相关,与总磷呈显著正相关;PER 仅与全氮含量呈显著负相关。酶化学计量与土壤理化性质也具有较好相关性,诸如 eC: N 和 eC: P 均与土壤 SWC、SOC、有效 N 和 C/N 比呈显著正相关,与总 P 含量呈显著负相关;eN: P 则与土壤 pH 和全 N 含量显著正相关,而与有效 P 呈显著负相关。

以 MBC、MBN 和 MBP 为响应变量,土壤环境因子为解释变量进行逐步回归分析和冗余分析(RDA)。有效 N 可以解释 MBC 含量变异的 90%,有效 N 和土壤含水率相结合,可以解释 MBN 含量 85% 的变异,土壤 pH 解释了 MBP 含量 65% 以上的变异(表 3)。RDA 分析结果显示前两个排序轴共同解释了微生物生物量变异的 95%(图 5a),且有效 N 和 pH 是解释度较高的 2 个环境因子,分别解释了微生物生物量变异的 58.5% 和 20.6%,是土壤微生物生物量变化的关键因子。

以 5 种酶活性为响应变量,土壤环境因子和微生物生物量为解释变量进行逐步回归分析和 RDA 分析。有效 P、C/N 和 SOC 相结合,可以解释 BG 活性 90% 以上的变异,MBN 解释了 AP 活性变化的

表 3 微生物生物量、酶活性和酶化学计量与土壤环境因子之间逐步回归分析

Tab. 3 Outcome of determination of stepwise regression between microbial biomass, soil enzyme activities, enzyme stoichiometry and soil environmental factors

微生物指标	回归方程	$R^2$	$P$
MBC	$y = 0.527 * \text{Available N} + 161.102$	0.894	0.000
MBN	$y = 0.320 * \text{Available N} - 12.504 * \text{SWC} + 230.317$	0.851	0.000
MBP	$y = -4.603 * \text{pH} + 33.311$	0.662	0.001
BG	$y = -0.009 * \text{AP} + 0.025 * \text{C/N} - 0.001 * \text{SOC} + 0.001$	0.934	0.000
AP	$y = -0.010 * \text{MBN} + 2.328$	0.481	0.012
PER	$y = -0.014 * \text{N} - 0.0004 * \text{P} + 0.213$	0.695	0.005
eC: N	$y = 0.697 * \text{C/N} - 5.182$	0.868	0.000
eC: P	$y = 0.001 * \text{available N} + 0.029$	0.836	0.000
eN: P	$y = 0.03 * \text{N} - 0.012$	0.545	0.000

48%,全氮和总磷共同解释了 PER 活性变异的 70%(表 3)。RDA 分析结果显示,前两个排序轴共同解释了土壤酶活性变异的 75.2%,其中 C/N、SOC 和 pH 分别可以解释土壤酶活性 30.1%、27.6% 和 21% 的变异(图 5b),是土壤酶活性变化的关键因子。RDA 第一轴与氮磷代谢酶(NAG 和 AP)关系密切,且沿 RDA1 增大的方向土壤中 P 含量增加,

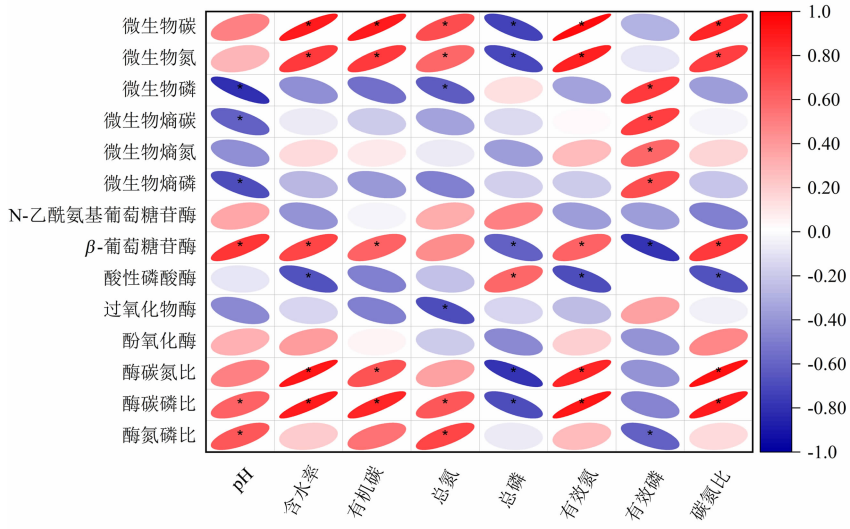


图 4 土壤环境因子与微生物生物量、酶活性和酶化学计量之间的相关性

Fig. 4 Matrix of Pearson correlation coefficients among soil environmental factors, microbial biomass, enzyme activities and enzyme stoichiometry

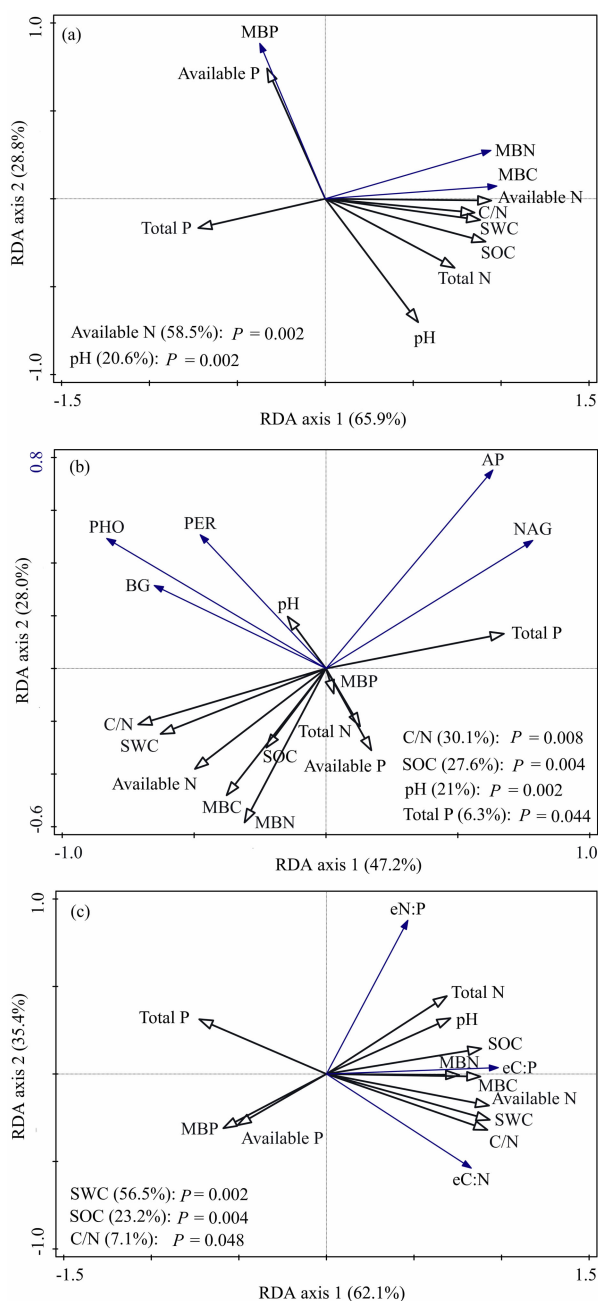


图5 土壤微生物与环境因子关系的冗余分析:

(a) 微生物生物量; (b) 酶活性; (c) 酶化学计量

Fig. 5 Redundancy analysis (RDA) of soil microbial;

(a) microbial biomass; (b) enzyme activities;

(c) enzyme stoichiometry and environmental factors

C/N 和 SOC 降低; RDA 第二轴与碳代谢酶 (BG、PER 和 PHO) 关系密切, 且沿 RDA2 增大方向土壤 pH 增加。

以土壤酶化学计量比 eC: N、eC: P 和 eN: P 为响应变量, 土壤环境因子和微生物生物量为解释变量进行逐步回归分析和 RDA 分析。土壤 C: N 比可以

解释 eC: N 变化的 87%, 有效 N 含量可以解释 eC: P 变化的 84%, 土壤全 N 含量可以解释 eN: P 变化的 55% (表 3)。RDA 分析结果显示, 前两个排序轴共同解释了土壤酶化学计量 97% 以上的变异, 且土壤 SWC、SOC 和 C/N 是解释度相对较高的 3 个土壤环境因子, 可以分别解释土壤酶化学计量 56.5%、23.2% 和 7.1% 的变异 (图 5c), 是驱动土壤酶化学计量的关键因子。

不同土地利用方式土壤理化性质、微生物生物量和酶活性的非度量多维尺度分析结果见图 6。农田与草地之间无法区分, 但二者与森林和灌木林之间能够很好地进行区分。表明森林和灌木林的土壤性质、微生物生物量和酶活性之间的关系与农田、草地的这 3 项指标之间的关系有较大差异, 这与表 1、表 2 和图 2 的数据差异性分析结果基本一致。

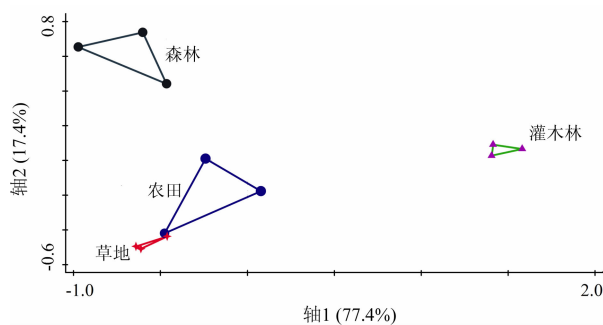


图6 不同土地利用方式土壤理化性质、微生物生物量和酶活性非度量多维尺度分析

Fig. 6 Non-metric multidimensional scaling (NMDS) ordination of soil physicochemical properties, microbial biomass and enzyme activities

### 3 讨论

#### 3.1 不同土地利用方式对土壤基础理化性质的影响

土地利用是人类干扰土壤生态系统功能最为强烈和直接的活动<sup>[10]</sup>, 土地利用和管理方式的改变会导致土地覆被的变化<sup>[23]</sup>, 通过影响植物凋落物和根系分泌物等有机质的输入、土壤温湿度、养分有效性等, 最终影响土壤微生物生物量和酶活性<sup>[19, 24]</sup>。本研究发现不同土地利用方式对所调查的 8 种土壤理化性质均具有显著影响 (表 1), 其中灌木林土壤含水率最高, 森林和灌木林土壤 pH、SOC 和 N 含量显著高于农田和草地。通常情况下, 森林和灌木林土壤有机质高于农田和草地, 有机质分解释放的有机

酸更高,从而导致森林或灌木林具有更低的 pH<sup>[9, 25]</sup>。然而,本研究显示森林和灌木林土壤 pH 呈中性,农田和草地土壤 pH 呈酸性,尤其是农田土壤(pH=4.88),说明森林或灌木林开垦为农田后土壤酸性变强。这主要是由于喀斯特森林或灌木林土壤为发育于石灰岩上的石灰土,富钙偏碱,致使作为土壤有机质重要来源的植物凋落物钙镁含量高;此外,凋落物分解过程中释放的有机酸会对石灰岩颗粒产生溶蚀作用,促进钙离子的溶出<sup>[26]</sup>,中和凋落物分解释放的有机酸,故土壤呈中性。农田土壤受人为干扰强度大,加之喀斯特地区干湿季分明,雨热同期,淋溶作用强烈,易引起土壤酸化<sup>[27]</sup>。本研究中土壤样品采集是在连续晴朗天气条件下,同一天完成,因此灌木林土壤含水率(35%)显著高于其他 3 种土地利用类型土壤(15%~19%)并不是偶然现象,可能是由于灌木林土壤保水能力相对较强。

土壤有机碳含量是生态系统碳输入与分解之间动态平衡的结果<sup>[28]</sup>。本研究中森林和灌木林 SOC 含量是农田和草地的 2.3~5.4 倍,这与前人研究发现森林转化为农田后 SOC 显著降低的结果一致<sup>[10, 24]</sup>。一方面,与森林相比,农田土壤中植物残体等碳输入通常较低<sup>[10]</sup>;另一方面,农田耕作会对土壤团聚体产生破坏作用<sup>[29]</sup>,增加土壤有机质裸露,从而加速 SOC 分解<sup>[30-31]</sup>。森林和灌木林土壤 N 含量显著高于农田和草地,主要是由于农田作物的生长与收获对土壤 N 素的消耗<sup>[32]</sup>以及耕作扰动易引起土壤 N 的损失<sup>[33]</sup>。

### 3.2 不同土地利用方式对土壤微生物生物量和微生物酶的影响

土地利用方式会对多种土壤微环境产生影响,微生物生物量和微生物酶等指标可以反映微生物群落和功能的变化<sup>[34]</sup>。灌木林 MBC(图 2a)和 MBN(图 2b)均显著高于其他 3 种土地利用方式土壤,这可能是不同土地利用方式对人类土地利用管理实践综合响应的结果。不同土地利用方式下,灌木林具有更适宜的土壤湿度、pH 以及更高的养分水平(SOC、全氮和有效 N)(表 1),从而可以支持更多的微生物生物量。多元回归分析表明,有效 N 含量,有效 N 和土壤含水率相结合分别可以解释 MBC 和 MBN 含量 85% 以上的变异(表 3),RDA 分析进一步表明有效 N 和 pH 是调控土壤微生物生物量最重要的因素,这为以上解释提供有力证据(图 5a)。然

而,农田土壤 MBP 含量最高(图 2c),这主要是由于低 pH 土壤对磷的吸附能力更强<sup>[35-36]</sup>,MBP 与土壤 pH 之间具有极好的负相关关系进一步证明这一点(图 4,表 3);此外,农田土壤肥料的使用导致土壤总 P 和有效 P 的含量相对较高,也是其 MBP 高于其他土地利用方式土壤的另一个重要原因<sup>[9]</sup>。

尽管灌木林土壤具有更高的 MBC 和 MBN,但是农田显著增加了土壤微生物熵(图 2d)和微生物熵氮(图 2e),表明农田土壤中 SOC 和 N 向微生物生物量转化的速率更快,从而增加了微生物熵值。这主要是由于农田土壤中 SOC 和 N 素相对贫瘠,土壤微生物代谢较快,要维持地上农作物生长所需的能量和养分,就需要提高微生物生物量在 SOC 和 N 中所占的比例来维持其较高的物质代谢能力<sup>[37-38]</sup>;此外,农田土壤高强度的管理实践活动引起土壤 pH 和湿度的降低(表 1),会导致微生物周转速率的增加,可以提高微生物生物量<sup>[39-40]</sup>,从而增加土壤微生物熵。

### 3.3 不同土地利用方式对土壤酶活性变化的影响

不同土地利用方式显著影响土壤 NAG、BG 和 AP 酶活性。NAG 是调控土壤 N 转化的关键酶,在养分循环过程中起着不可或缺的作用<sup>[34]</sup>。本研究中森林土壤 NAG 活性最高(表 2),已有研究也表明森林 NAG 活性显著高于农田和灌丛<sup>[21]</sup>,因为森林土壤具有相对高的 SOC 和 N 含量,可以为酶反应提供更多的底物和能量<sup>[41-42]</sup>。然而,本研究中 NAG 与 SOC 和 N 含量并未呈现显著的正相关关系,其他土壤环境因子也不能很好解释 NAG 活性的变异(图 4)。在本研究涉及的 5 种酶之中,AP 活性最高,表明 P 矿化在喀斯特土壤生态系统中的重要性。喀斯特生态系统主要受 P 限制<sup>[12]</sup>,微生物通过增加 AP 的生产,促进有机 P 的矿化,从而为微生物和植物提供磷<sup>[43]</sup>。 $\beta$  葡萄糖苷酶被认为是最重要的一种土壤碳水解酶,在将纤维素转化为葡萄糖过程中起着关键作用<sup>[44]</sup>。与农田相比,其他土地利用方式土壤 BG 活性显著增加(表 2),可能与森林或灌木林具有更高的 SOC 含量有关(表 1),这与土壤水解酶活性随 SOC 含量的增加而增加的结果一致<sup>[45-46]</sup>。然而,也有研究表明农田和森林土壤碳水解酶活性无显著差异<sup>[44]</sup>。一方面可能是由于森林 SOM 含量较高,土壤酶可以与腐殖质相结合形成酶-腐殖质复合物,从而抑制土壤酶活性<sup>[47]</sup>;相反,农田



耕作会促进土壤团聚体分解,提高土壤酶活性<sup>[48]</sup>;农田肥料的使用通过促进微生物活性以增加碳分解酶的生产。尽管不同土地利用方式土壤 PER 活性无显著差异(表 2),但是草地和灌木林 PHO 活性显著高于农田和森林(表 2)。前人研究表明氧化酶活性与土壤难分解碳密切相关<sup>[40, 49]</sup>,因此,草地和灌木林具有更高的 PHO 活性可能是由于其土壤中难分解碳含量更高。RDA 分析去除共线性后留下土壤 C:N、SOC、pH 和 P 共 4 个显著影响土壤酶活性的因素(图 5b),说明在不同土地利用方式中,这 4 个因素是驱动土壤酶活性发生变化最重要的因素。这与喀斯特山区不同土地利用方式转化过程中,土壤 N:C:N、N:P 和 pH 对土壤酶活性变化起主要驱动作用的结果相类似<sup>[19]</sup>。从本质上来说,本研究表明土壤酶活性与土壤 C 和养分含量密切相关,并受土壤 pH 调控。

### 3.4 不同土地利用方式对土壤酶化学计量的影响

酶化学计量通常被用来评估土壤微生物资源的相对限制,本研究发现土壤微生物碳限制受土地利用方式的显著影响。土壤酶矢量长度分析发现从农田、草地到灌木林,土壤微生物碳限制程度呈现加重趋势,森林土壤碳限制最低(图 3b)。研究表明 SOC 含量高的土壤能够为微生物生长提供更多的碳源<sup>[5, 50]</sup>。本研究中尽管灌木林 SOC 含量最高,但是其微生物碳限制最严重,并没有缓解微生物碳限制,这可能与灌木林 SOC 不易被微生物利用有关,比如土壤活性碳含量较低等,灌木林土壤 C:N 显著高于其他 3 种土地利用方式也证明这一点(表 1)。森林 SOC 含量显著高于农田和草地土壤,并且 C:N 最低,表明土壤养分含量也相对较高,从而更加容易被微生物分解利用,因此森林土壤碳限制程度最低。此外,酶矢量角度分析表明不同土地利用方式土壤微生物受严重的磷元素限制,表明喀斯特地区土壤微生物普遍受磷元素的限制。此外,经对数转化后,本研究不同土地利用方式土壤酶化学计量比 C:N:P 均值为 1:1.1:1.6,偏离了全球生态系统 1:1:1 的比值<sup>[7]</sup>,表明不同土地利用方式土壤磷转化酶相对较高,意味着喀斯特地区土壤磷元素相对缺乏,这是由于该地区风化、淋溶作用强烈,土壤中有效磷易与碱性阳离子结合,这和人有关喀斯特生态系统土壤微生物养分限制研究结果相一致<sup>[5, 12]</sup>。

## 4 结论

本研究采用土壤生物化学、酶学等方法,分析了喀斯特山区土地利用方式对土壤理化性质和微生物特征的影响,主要结论如下:

(1)不同土地利用方式导致含水率、pH、C 和养分含量等土壤物理化学性质的变化,从而显著影响土壤微生物生物量、微生物熵、酶活性及酶化学计量。

(2)由于耕作活动干扰,如土壤团聚体破坏、秸秆移除、肥料使用等,易引起土壤酸化、降低土壤有机质,导致农田土壤微生物生物量和酶活性较低。与农田相比,森林或灌木林具有更高的 SOC 和养分含量,胞外酶活性也显著提高。土壤 C:N、SOC、pH 和 P 含量是土壤酶活性变化最重要的驱动因素。

(3)酶化学计量矢量分析进一步证明喀斯特地区土壤微生物普遍受到磷元素限制,从农田、草地到灌木林,土壤碳限制程度呈现加重趋势。土壤 SWC、SOC 和 C/N 是土壤酶化学计量最为重要的驱动因子。

(4)本研究为不同土壤环境因子调控不同土地利用方式下土壤微生物特征提供证据,有助于加深对喀斯特地区土地利用/土地覆被变化下土壤微生物属性与环境驱动因素之间相互作用的认知。

## 参考文献(References)

- [1] 沈仁芳, 赵学强. 土壤微生物在植物获得养分中的作用[J]. 生态学报, 2015, **35**(20): 6584–6591. [SHEN Renfang, ZHAO Xueqiang. Role of soil microbes in the acquisition of nutrients by plants [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **35**(20): 6584–6591] DOI: 10.5846/stxb201506051140
- [2] CHENG Xiaoyu, YUN Yuan, WANG Hongmei, et al. Contrasting bacterial communities and their assembly processes in karst soils under different land use [J]. Science of the Total Environment, 2021, **751**: 142263. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142263
- [3] COLEMAN D C, CALLAHAM M A, CROSSLEY D A. Fundamentals of soil ecology [M]. San Diego: Academic Press, 2018.
- [4] 张雅茜, 方晰, 冼应男, 等. 亚热带区 4 种林地土壤微生物生物量碳氮磷及酶活性特征[J]. 生态学报, 2019, **39**(14): 5326–5338. [ZHANG Yaqian, FANG Xi, XIAN Yingnan, et al. Characteristics of soil microbial biomass carbon, nitrogen, phosphorus and enzyme activity in four subtropical forests, China

- [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(14): 5326 – 5338] DOI: 10.5846/stxb201809081925
- [5] JIANG Cong, ZHU Biao, ZENG Hui. Soil extracellular enzyme stoichiometry reflects the unique habitat of karst tiankeng and helps to alleviate the P-limitation of soil microbes [J]. *Ecological Indicators*, 2022, **144**: 109552. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.109552
- [6] SOONG J L, FUCHSLUEGER L, MARAÑON-JIMENEZ S, et al. Microbial carbon limitation: The need for integrating microorganisms into our understanding of ecosystem carbon cycling [J]. *Global Change Biology*, 2020, **26**: 1953 – 1961. DOI: 10.1111/gcb.14962
- [7] 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**: 795 – 798. DOI: 10.1038/nature08632
- [8] 郭银花, 赵洪涛, 高雨, 等. 山西太岳山油松林无机氮添加对土壤微生物养分限制类型的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2022, **28**(1): 137 – 144. [GUO Yinhua, ZHAO Hongtao, GAO Yu, et al. Effect of inorganic nitrogen addition on soil microbial nutrient requirement strategy in the *Pinus tabulaeformis* forest in Taiyue Mountain, Shanxi province [J]. *Chinese Journal of Applied Environment Biology*, 2022, **28**(1): 137 – 144] DOI: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2020.10054
- [9] YAN Yuchun, WANG Chu, ZHANG Jingmin, et al. Response of soil microbial biomass C, N, and P and microbial quotient to agriculture and agricultural abandonment in a meadow steppe of northeast China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, **223**: 105475. DOI: 10.1016/j.still.2022.105475
- [10] TIWARI S, SINGH C, BOUDH S, et al. Land use change: A key ecological disturbance declines soil microbial biomass in dry tropical uplands [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, **242**: 1 – 10. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.04.052
- [11] MENDES L W, DE LIMA BROSSI M J, KURAMAE E E, et al. Land-use system shapes soil bacterial communities in southeastern Amazon region [J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, **95**: 151 – 160. DOI: 10.1016/j.apsoil.2015.06.005
- [12] CHEN Hao, LI Dejun, MAO Qinggong, et al. Resource limitation of soil microbes in karst ecosystems [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **650**: 241 – 248. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.036
- [13] 王克林, 岳跃民, 陈洪松, 等. 喀斯特石漠化综合治理及其区域恢复效应[J]. *生态学报*, 2019, **39**(20): 7432 – 7440. [WANG Kelin, YUE Yuemin, CHEN Hongsong, et al. The comprehensive treatment of karst rocky desertification and its regional restoration effects [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(20): 7432 – 7440] DOI: 10.5846/stxb201909051849
- [14] WANG Kelin, ZHANG Chunhua, CHEN Hongsong, et al. Karst landscapes of China: Patterns, ecosystem processes and services [J]. *Landscape Ecology*, 2019, **34**: 2743 – 2763. DOI: 10.1007/s10980-019-00912-w
- [15] 金章利, 刘高鹏, 周明涛, 等. 喀斯特山地草地土壤酶活性及土壤微生物碳代谢活性研究[J]. *水土保持研究*, 2020, **27**(3): 37 – 44. [JIN Zhangli, LIU Gaopeng, ZHOU Mingtao, et al. Soil enzyme activity and microbial carbon metabolism along an altitude gradient in grasslands of karst mountain [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, **27**(3): 37 – 44] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2020.03.006
- [16] 吴求生, 龙健, 李娟, 等. 茂兰喀斯特森林小生境类型对土壤微生物群落组成的影响[J]. *生态学报*, 2019, **39**(3): 1009 – 1018. [WU Qiusheng, LONG Jian, LI Juan, et al. Effects of different microhabitat types on soil microbial community composition in the Maolan Karst Forest in southwest China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(3): 1009 – 1018] DOI: 10.5846/stxb201801110084
- [17] 杨泽良, 任建行, 况园园, 等. 桂西北喀斯特不同植被演替阶段土壤微生物群落多样性[J]. *水土保持研究*, 2019, **26**(3): 185 – 191. [YANG Zeliang, REN Jianhang, KUANG Yuanyuan, et al. Dynamics of soil microbial communities along vegetation restoration gradient in karst area [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, **26**(3): 185 – 191] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2019.03.027
- [18] ZHAO Chang, LONG Jian, LIAO Hongkai, et al. Dynamics of soil microbial communities following vegetation succession in a karst mountain ecosystem, southwest China [J]. *Scientific Reports*, 2019, **9**: 2160. DOI: 10.1038/s41598-018-36886-z
- [19] 孙彩丽, 王艺伟, 王从军, 等. 喀斯特山区土地利用方式转变对土壤酶活性及其化学计量特征的影响[J]. *生态学报*, 2021, **41**(10): 4140 – 4149. [SUN Caili, WANG Yiwei, WANG Congjun, et al. Effects of land use conversion on soil extracellular enzyme activity and its stoichiometric characteristics in karst mountainous areas [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(10): 4140 – 4149] DOI: 10.5846/stxb202007161864
- [20] CHEN Hao, LI Dejun, XIAO Kongcao, et al. Soil microbial processes and resource limitation in karst and non-karst forests [J]. *Functional Ecology*, 2018, **32**: 1400 – 1409. DOI: 10.1111/1365-2435.13069
- [21] ZHANG Yaohua, XU Xianli, LI Zhenwei, et al. Improvements in soil quality with vegetation succession in subtropical China karst [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **775**: 145876. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145876
- [22] LYU Maokui, NIE Yangyi, GIARDINA C P, et al. Litter quality and site characteristics interact to affect the response of priming effect to temperature in subtropical forests [J]. *Functional Ecology*, 2019, **33**: 2226 – 2238. DOI: 10.1111/1365-2435.13428
- [23] 白娥, 薛冰. 土地利用与土地覆盖变化对生态系统的影响[J]. *植物生态学报*, 2020, **44**(5): 543 – 552. [BAI Edith,

- XUE Bing. A review of influences of land use and land cover change on ecosystems [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2020, **44**(5): 543–552. DOI: 10.17521/cjpe.2020.0071
- [24] CHEN Qiong, YANG Fan, CHENG Xiaoli. Effects of land use change type on soil microbial attributes and their controls: Data synthesis [J]. *Ecological Indicators*, 2022, **138**: 108852. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108852
- [25] ZHANG Dan, ZHOU Zhonghao, ZHANG Bin, et al. The effects of agricultural management on selected soil properties of the arable soils in Tibet, China [J]. *Catena*, 2012, **93**: 1–8. DOI: 10.1016/j.catena.2012.01.004
- [26] 曹建华, 潘根兴, 袁道先. 不同植物凋落物对土壤有机碳淋失的影响及岩溶效应[J]. *第四纪研究*, 2000, **20**(4): 359–366. [CAO Jianhua, PAN Genxing, YUAN Daoxian. Influence of two litters on the soil organic carbon leachings and its karst effect [J]. *Quaternary Sciences*, 2000, **20**(4): 359–366]
- [27] YUN Yuan, WANG Hongmei, MAN Baiying, et al. The relationship between pH and bacterial communities in a single karst ecosystem and its implication for soil acidification [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016, **7**: 1955. DOI: 10.3389/fmicb.2016.01955
- [28] COTRUFO M F, SOONG J L, HORTON A J, et al. Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss [J]. *Nature Geoscience*, 2015, **8**: 776–779. DOI: 10.1038/NGEO2520
- [29] WANG Y, ZHANG J H, ZHANG Z H. Influences of intensive tillage on water-stable aggregate distribution on a steep hillslope [J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, **151**: 82–92. DOI: 10.1016/j.still.2015.03.003
- [30] FANG Xiangmin, WANG Qingli, ZHOU Wangming, et al. Land use effects on soil organic carbon, microbial biomass and microbial activity in Changbai Mountains of northeast China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2014, **24**: 297–306. DOI: 10.1007/s11769-014-0670-9
- [31] 王成宝, 温美娟, 杨思存, 等. 耕作方式对灌耕灰钙土耕层物理性质和玉米产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2022, **40**(3): 170–177. [WANG Chengbao, WEN Meijuan, YANG Sicun, et al. Effects of different tillage practices on physical characteristics of irrigated sierozem soil and maize yield [J]. *Agriculture Research in the Arid Areas*, 2022, **40**(3): 170–177] DOI: 10.7606/j.issn.1000-7601.2022.03.21
- [32] 颜晓元, 夏龙龙, 逆超普. 面向作物产量和环境双赢的氮肥施用策略[J]. *中国科学院院刊*, 2018, **33**(2): 177–183. [YAN Xiaoyuan, XIA Longlong, TI Chaopu. Win-win nitrogen management practices for improving crop yield and environmental sustainability [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, **33**(2): 177–183] DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.2018.02.007
- [33] XIAO Shuangshuang, YE Yingying, XIAO Dan, et al. Effects of tillage on soil N availability, aggregate size, and microbial biomass in a subtropical karst region [J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, **192**: 187–195. DOI: 10.1016/j.still.2019.05.006
- [34] LIU Dong, HUANG Yimei, AN Shaoshan, et al. Soil physicochemical and microbial characteristics of contrasting land-use types along soil depth gradients [J]. *Catena*, 2018, **162**: 345–353. DOI: 10.1016/j.catena.2017.10.028
- [35] 王艳玲, 章永辉, 何园球. 红壤基质组分对磷吸附指数的影响[J]. *土壤学报*, 2012, **49**(3): 552–559. [WANG Yanling, ZHANG Yonghui, HE Yuanqiu. Effect of soil matrix components on phosphate sorption index in red soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, **49**(3): 552–559] DOI: 10.11766/trxb201107140260
- [36] WANG Chu, LI Linghao, YAN Yuchun, et al. Effects of cultivation and agricultural abandonment on soil carbon, nitrogen and phosphorus in a meadow steppe in eastern Inner Mongolia [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2021, **309**: 107284. DOI: 10.1016/j.agee.2020.107284
- [37] 吴秀芝, 刘秉儒, 阎欣, 等. 荒漠草地土壤微生物生物量和微生物熵对沙漠化的响应[J]. *应用生态学报*, 2019, **30**(8): 2691–2698. [WU Xiuzhi, LIU Bingru, YAN Xin, et al. Response of soil microbial biomass and microbial entropy to desertification in desert grassland [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(8): 2691–2698] DOI: 10.13287/j.1001-9332.201908.009
- [38] 夏捷, 陈胜, 吴一凡, 等. 种植竹荪后毛竹林土壤微生物生物量和微生物熵的动态变化[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2022, **46**(4): 127–134. [XIA Jie, CHEN Sheng, WU Yifan, et al. Dynamic changes of soil microbial biomass and microbial entropy after planting Dictyophora indusiata in Phyllostachys edulis forests [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 2022, **46**(4): 127–134] DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202101018
- [39] MALIK A A, PUISSANT J, BUCKERIDGE K M, et al. Land use driven change in soil pH affects microbial carbon cycling processes [J]. *Nature Communications*, 2018, **9**: 1–10. DOI: 10.1038/s41467-018-05980-1
- [40] 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**: 903–906. DOI: 10.1038/NCLIMATE2361
- [41] SCHIMEL J, BECERRA C A, BLANKINSHIP J. Estimating decay dynamics for enzyme activities in soils from different ecosystems [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, **114**: 5–11. DOI: 10.1016/j.soilbio.2017.06.023
- [42] FENG Jiao, WU Junjun, ZHANG Qian, et al. Stimulation of nitrogen-hydrolyzing enzymes in soil aggregates mitigates nitrogen constraint for carbon sequestration following afforestation in subtropical China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, **123**: 136–144. DOI: 10.1016/j.soilbio.2018.05.013
- [43] LI Jiabao, XIE Ting, ZHU He, et al. Alkaline phosphatase

- activity mediates soil organic phosphorus mineralization in a subalpine forest ecosystem [J]. *Geoderma*, 2021, **404**: 115376. DOI: 10.1016/j.geoderma.2021.115376
- [44] ZHANG Qian, FENG Jiao, WU Junjun, et al. Variations in carbon-decomposition enzyme activities respond differently to land use change in central China [J]. *Land Degradation Development*, 2019, **30**: 459–469. DOI: 10.1002/ldr.3240
- [45] WANG Bing, XUE Sha, LIU Guobin, et al. Changes in soil nutrient and enzyme activities under different vegetations in the Loess Plateau area, northwest China [J]. *Catena*, 2012, **92**: 186–195. DOI: 10.1016/j.catena.2011.12.004
- [46] RAIESI F, BEHESHTI A. Soil specific enzyme activity shows more clearly soil responses to paddy rice cultivation than absolute enzyme activity in primary forests of northwest Iran [J]. *Applied Soil Ecology*, 2014, **75**: 63–70. DOI: 10.1016/j.apsoil.2013.10.012
- [47] BOWLES T M, ACOSTA-MARTÍNEZ V, CALDERÓN F, et al. Soil enzyme activities, microbial communities, and carbon and nitrogen availability in organic agroecosystems across an intensively-managed agricultural landscape [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **68**: 252–262. DOI: 10.1016/j.soilbio.2013.10.004
- [48] GARCIA-FRANCO N, MARTÍNEZ-MENA M, GOBERNA M, et al. Changes in soil aggregation and microbial community structure control carbon sequestration after afforestation of semiarid shrublands [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, **87**: 110–121. DOI: 10.1016/j.soilbio.2015.04.012
- [49] CUSACK D F, SILVER W L, TORN M S, et al. Changes in microbial community characteristics and soil organic matter with nitrogen additions in two tropical forests [J]. *Ecology*, 2011, **92**: 621–632. DOI: 10.1890/10-0459.1
- [50] CUI Yongxing, FANG Linchuan, GUO Xiaobin, et al. Ecoenzymatic stoichiometry and microbial nutrient limitation in rhizosphere soil in the arid area of the northern Loess Plateau, China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, **116**: 11–21. DOI: 10.1016/j.soilbio.2017.09.025

## Effects of Different Land Use Patterns on Soil Microbial Biomass, Enzyme Activity and Stoichiometry in the Mountainous Karst Areas of China

CHAO Lin<sup>1a, 1b, 2, 3</sup>, ZENG Xin<sup>1c</sup>, OU Mengfei<sup>1c</sup>, HUANG Xinting<sup>1c</sup>,  
ZHANG Jianbing<sup>1a, 1b</sup>, LIU Yanyan<sup>1a, 1b\*</sup>

(1. a. Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf, Ministry of Education; b. Guangxi Key Laboratory of Earth Surface Processes and Intelligent Simulation; c. School of Geography and Planning, Nanning Normal University, Nanning 530001, China;

2. Key Laboratory of Vegetation Restoration and Management of Degraded Ecosystems, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China;

3. Hunan Huitong National Research Station of Forest Ecosystem, Huitong 418307, Hunan, China)

**Abstract:** Land use changes soil physical and chemical properties and significantly affects soil microbial properties. In the mountainous karst areas of China, there was still a lack of scientific recognition on the correlation between soil enzyme activity and its stoichiometric characteristics and soil environmental factors under different land use patterns, making it hard to scientifically guide the optimization of land use structure and the maintenance of ecosystem function. In this paper, four land use patterns (farmland, grassland, shrubland and forestland) in the Nonggang National Nature Reserve of Guangxi of China were investigated by means of soil biochemistry and enzymology. It examined the effects of the four land use patterns on basic physical and chemical properties, microbial biomass, microbial quotient, enzyme activity and enzyme stoichiometry in karst soils. Following results were obtained: (1) Land use patterns had strong influences on the soil physicochemical properties. The Soil pH, SOC and N contents in the shrubland and forestland were higher than those from the cropland and grassland;

however, the concentrations of soil phosphorus available in the cropland and grassland were higher than those from the shrubland and forestland. (2) The soil microbial biomass carbon (MBC) and microbial biomass nitrogen (MBN) contents were in a descending order of shrubland > cropland > forestland > grassland; The shrubland had higher MBC and MBN as compared with ones in all other land use patterns; microbial biomass phosphorus (MBP) was found the highest in the cropland. The redundancy analysis (RDA) suggested that the content of soil available nitrogen and pH value were the main environmental factors driving soil microbial biomass. (3) The ratio of MBC to SOC (qMBC) and MBN to N (qMBN) both were in a descending order of cropland > shrubland > grassland > forestland, with qMBC and qMBN in the cropland being higher than those from other land use types, but there was no significant difference in the ratio of MBP to P (qMBP) in different land use patterns. (4) The land use patterns had great impact on N-acetylglucosaminidase (NAG),  $\beta$ -glucosidase (BG) and phenol oxidase (PHO) activities; soil C:N, SOC, pH and P concentration were the main factors driving the changes of soil enzyme activities. (5) Soil enzyme stoichiometry C/N ratio (eC:N), C/P ratio (eC:P), N/P ratio (eN:P) and microbial resource limitation were largely affected by the land use patterns. P was the most restricting elements for soil microorganisms in karst areas; soil microbial carbon restriction was the highest in the shrubland and grassland but the lowest in the forestland. Therefore, changes in soil physical-chemical properties induced by varied land use patterns were the main driving force of soil microbial biomass, enzyme activities and enzyme stoichiometry. The results provide references for scientific planning of land use in mountainous karst area, and thus plays a positive role in predicting how soil microbial attributes will respond to land use and land cover change in the context of global change.

**Key words:** land use change; soil properties; soil nutrients; microbial quotient; redundancy analysis; the mountainous karst areas of China

(责任编辑 李嵘)