DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.03.003
胡斯乐,董立国,白晓雄,等.黄土丘陵区典型土地利用类型土壤－微生物量及其生态化学计量特征[J].水土保持学报,2024,38(3):298-305.
HU Sile, DONG Liguo, BAI Xiaoxiong, et al. Soil microbial biomass and ecological stoichiometric characteristics of typical land use types in loess hilly region[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2024,38(3):298-305.

黄土丘陵区典型土地利用类型土壤－微生物量及其生态化学计量特征

胡斯乐[1,2], 董立国[1,2], 白晓雄[2], 许 浩[1], 安 钰[1], 万海霞[1],
韩新生[1], 王月玲[1], 李 妍[2], 郭永忠[1], 余 旋[2]
(1.宁夏农林科学院林业与草地生态研究所,银川 750002;2.西北农林科技大学林学院,陕西 杨凌 712100)

摘　要:[**目的**]为探讨黄土丘陵区"上退下推"典型生态治理模式对土壤－微生物量 C、N、P 及其生态化学计量比的影响。[**方法**]以宁夏黄土丘陵区典型土地利用类型(人工林地、梯田和川道地)为研究对象,研究土壤－微生物量 C、N、P 含量对土地利用变化的响应,并分析其生态化学计量比、微生物熵(qMBC、qMBN、qMBP)及化学计量不平衡性($C:N_{imb}$、$C:P_{imb}$、$N:P_{imb}$)之间的关系。[**结果**](1)3 种典型土地利用类型下,人工林地土壤 SOC、C∶P、N∶P 高于梯田和川道地,而农耕用地(梯田和川道地)土壤 TP 含量则高于人工林地。(2)土壤微生物量 C、N、P 的含量分别为 51.56～133.19,7.97～21.98,4.63～12.81 mg/kg。其中,土壤微生物量 C、N、P 均表现为人工林地＞梯田＞川道地;微生物量 C、N、P 的比值及 $C:N_{imb}$、$C:P_{imb}$、$N:P_{imb}$在各土地利用类型间无显著差异,具有一定的内稳性特征。(3)3 种典型土地利用类型对微生物熵具有显著影响,qMBC 表现为梯田地＞人工林地＞川道地,而 qMBN 和 qMBP 均表现为人工林地＞梯田＞川道地。通过 RDA 和蒙特卡洛置换检验得出,微生物量 C∶P($R^2=0.75$,$p<0.01$)和 $C:P_{imb}$($R^2=0.74$,$p<0.01$)是影响土壤微生物熵变化的关键因素。[**结论**]综上所述,"上退下推"典型生态治理模式引起土壤 C、P 以及微生物量 C、N、P 含量的显著变化,典型土地利用类型下土壤－微生物量 C、N、P 及其化学计量比主要受到 P 元素的影响。

关键词: 土地利用类型;土壤微生物生物量;微生物熵;生态化学计量比
中图分类号:S151.93　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1009-2242-(2024)03-0298-08

Soil Microbial Biomass and Ecological Stoichiometric Characteristics of Typical Land Use Types in Loess Hilly Region

HU Sile[1,2], DONG Liguo[1,2], BAI Xiaoxiong[2], XU Hao[1], AN Yu[1], WAN Haixia[1], HAN Xinsheng[1],
WANG Yueling[1], LI Yan[2], GUO Yongzhong[1], YU Xuan[2]
(1.*Institute of Forestry and Grassland Ecology, NingXia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan* 750002, *China*; 2. *College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: [**Objective**] This study was aimed to investigate the effects of the typical ecological management model of "upward retreat and downward push" on soil-microbial C, N and P and their ecological stoichiometric ratios in loess hilly areas. [**Methods**] Typical land use types (artificial forest land, terrace, and Chuanland) in the loess hilly area of Ningxia were selected to study the response of soil-microbial C, N and P contents to land use changes and to analyze the ecological stoichiometric ratios, microbial entropy (qMBC, qMBN, and qMBP), and stoichiometric imbalances ($C:N_{imb}$, $C:P_{imb}$, and $N:P_{imb}$) among the Relationship. [**Results**] (1) Under the three typical land use types, SOC, C∶P, and N∶P in artificial forest land were higher than those in terraced and Chuanland, while TP content in agricultural land (terraced and Chuanland) was higher than that in artificial forest land. (2) The contents of soil microbial biomass C, N,

收稿日期:2023-07-11　　**修回日期:**2023-09-01　　**录用日期:**2023-12-11　　**网络首发日期**(www.cnki.net):2024-04-28
资助项目:宁夏农业高质量发展和生态保护科技创新示范课题项目(NGSB-2021-11-06,NGSB-2021-14-01);宁夏重点研发计划项目(2023BEG02050,2023BEG02042);宁夏青年拔尖人才培养工程项目(RQ0025)
第一作者:胡斯乐(1998—),男,在读硕士研究生,主要从事水土保持、生态修复研究。E-mail:husile1217@126.com
通信作者:董立国(1980—),男,博士,副研究员,主要从事林业生态和生态修复研究。E-mail:dlg0303@163.com

and P ranged from 51.56 to 133.19, 7.97 to 21.98, and 4.63 to 12.81 mg/kg, respectively. Among them, soil microbial biomass C, N, and P were in the order of artificial forest land > terrace land > Chuanland. The ratio of microbial biomass C, N, P, C : N_{imb}, C : P_{imb}, and N : P_{imb} had certain characteristics of internal stability and had no significant difference among different land use types. (3) The three typical land use types had significant effects on microbial entropy, with the qMBC ranking as terraced land > artificial forest land > Chuanland, while the qMBN and qMBP ranking as artificial forest land > terrace land > Chuanland. Combined with RDA analysis, it was concluded that microbial biomass C : P ($R^2=0.75$, $p<0.01$) and C : P_{imb} ($R^2=0.74$, $p<0.01$) were the key factors affecting the change of qMB. [**Conclusion**] In summary, the typical ecological management mode of "upward retreat and downward push" caused significant changes in soil C, P and microbial C, N and P contents, and the soil-microbial C, N and P and their stoichiometric ratios were mainly influenced by phosphorus under the typical land-use types.

Keywords: land use type; soil microbial biomass; microbial entropy; ecostoichiometric ratio

Received: 2023-07-11　　**Revised**: 2023-09-01　　**Accepted**: 2023-12-11　　**Online**(www.cnki.net): 2024-04-28

土壤微生物量(SMB)是土壤中活体微生物的总量,其微生物量碳(MBC)、氮(MBN)和磷(MBP)是土壤中十分活跃的生物组分,可直接驱动微生物参与到养分循环过程,并调控土壤肥力形成[1-2]。微生物群落的多样性跨越多个生命领域,SMB 可随土壤碳含量的变化而变化,通过土壤－微生物量生态化学计量比可直观反映微生物对土壤养分的固持和利用[3]。有研究[4-5]发现,土地利用类型对生物地球化学循环过程具有重要影响,随着土地利用类型的变化,光照、水分、温度、土壤养分、植物等因子也随之改变,从而引起区域小气候、土壤类型和植被类型等发生变化,进而影响土壤微生物量。研究土壤微生物量随土地利用格局的变化规律,可确定土壤的营养限制条件,从而进一步阐明微生物与土壤资源间的养分平衡机制,对于揭示土地利用格局的生态效应,并对土壤资源管理和可持续性发展具有重要意义。

黄土丘陵沟壑区受自身土壤特性及人类活动的影响,包括施肥不当和土地开垦,造成严重的土壤侵蚀和环境退化[6]。为解决此问题,自 20 世纪 50 年代以来,我国实施大规模的生态修复工程,包括坡地整治、梯田建设、退耕还林还草等,有效改变区域土地利用格局,使林地、农用梯田和川道地等多种类型的土地镶嵌分布,形成多样化的生态格局[7]。目前,有关黄土丘陵区土壤微生物量的变化规律已有报道。蒋跃利等[8]研究黄土区延河流域不同土地利用方式下土壤微生物量变化特征发现,MBP 在农田上最高,MBC、MBN 则在乔木林地上有着较高的分布;赵彤等[9]亦利用相同样地研究 4 种典型植被类型下土壤微生物量的变化规律发现,天然草地 SMB 最高、林地次之,农地最低。然而,由于黄土高原地区生态系统复杂且土壤类型多样,并受到众多因素(如养分、微生物量等)影响,人们对该地区典型治理模式下土壤－微生物量 C、N、P 含量变化规律和对土地利用格局变化的敏感性认识不足。故以黄土丘陵区－典型治理模式"上退下推"所形成的土地利用类型(人工林地、梯田和川道地)为研究对象,探究该区域土壤－微生物量 C、N、P 及其生态化学计量比在土地利用格局上的变化特征及其驱动因子,为该区域生态恢复与土壤质量演变提供依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区固原市彭阳县(106°32′－106°78′E,35°41′－36°14′N),属典型的温带半干旱大陆性季风气候,年平均降水量为 433.6 mm,年平均气温为 7.4～8.5 ℃,无霜期为 140～170 天。土壤以黄绵土为主,养分较为贫瘠,区域 90%的土地是沟坡地,仅 8%是平缓台地,且多数土地坡度为14°～18°。自 2000 年开始实施退耕还林(草)、坡改梯田等生态修复工程以来,该区域形成以林地、农用梯田和川道地为主的土地利用类型。人工林地主要种植树种有山桃、山杏、柠条、沙棘、云杉及刺槐等[7]。梯田和川道地主要种植玉米、燕麦、马铃薯和苜蓿等,每年施农家肥和二胺分别约为 30,0.375 t/hm^2,且在玉米大喇叭口期前进行中耕追肥 0.3 t/hm^{2}左右(以尿素为主)。

1.2　样品采集

采样于 2022 年 9 月雨季末期进行,通过实地调查和走访当地居民,在彭阳县中庄小流域玉洼村选择退耕还林草地(人工林地)、坡改梯田农田(梯田)和川地农田(川道地)各 6 块样点(表 1)。每个采样点布设 20 m×20 m 的样方,沿"S"形线路采集 5 个土样,混匀后装入无菌袋中,垫上冰袋带回实验室。将其中 1 份新

鲜土样过 2 mm 筛分后放入 4 ℃冰箱，在 15 日内测定土壤微生物量 C、N、P；另一部分，经 2，0.15 mm 筛分后进行风干，用于测定土壤 C、N、P。

表 1 研究区样地特征

Table 1 Description of plot characteristics in the study area

样地类型	经度(E)/(°)	纬度(N)/(°)	海拔/m	坡位	植被覆盖
人工林地	106.67	35.94	1 629～1 716	坡中部	山桃、山杏、刺槐等
梯田地	106.69	35.93	1 560～1 689	坡中部	玉米
川道地	106.68	35.93	1 560～1 592	平缓地	玉米

1.3 室内分析

土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)和全磷(TP)含量分别采用重铬酸钾一氧化法、凯氏定氮法和钼锑比色法[10]测定。采用氯仿熏蒸和 0.5 mol/L K_2SO_4 萃取法分别高效提取微生物量碳(MBC)和氮(MBN)。MBC 使用 TOC 分析仪测定，MBN 使用 AA3 连续流动分析仪测定，其转换因子分别为 0.45，0.25。微生物量磷(MBP)通过氯仿熏蒸和乙醇萃取的方法[11]提取，随后采用钼蓝比色法精确定量。

1.4 统计分析

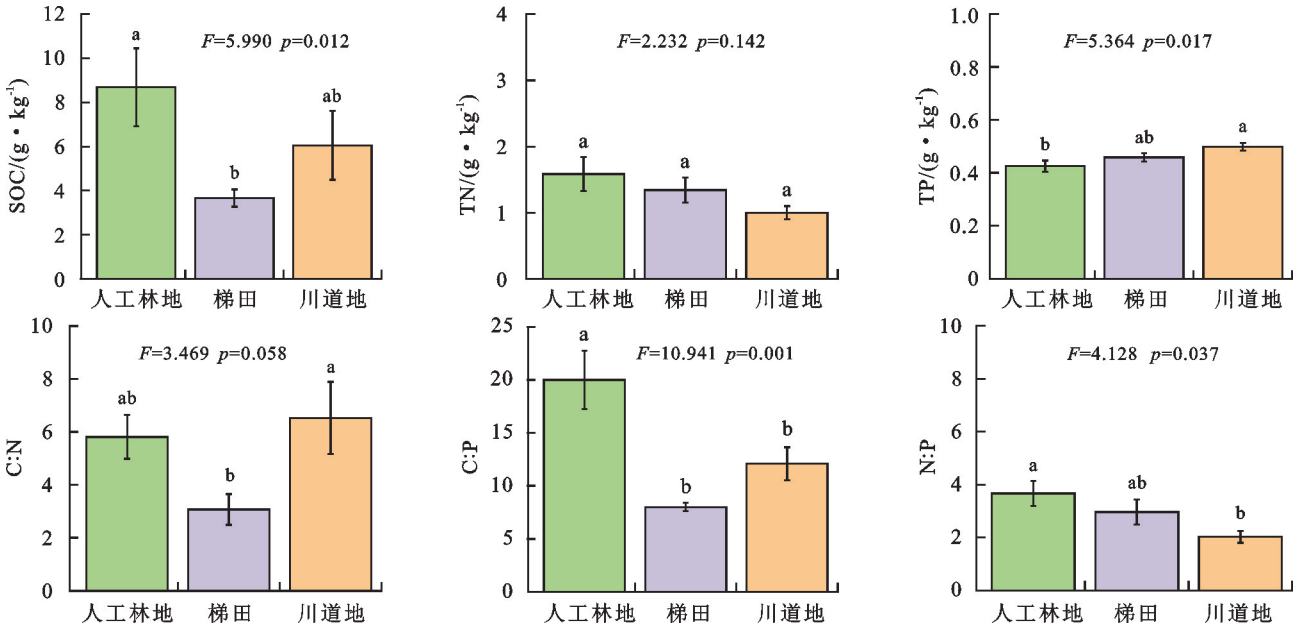
土壤有机碳、全氮、全磷及相关微生物量碳、氮、磷的化学计量比以质量比表示。土壤微生物熵中 qMBC、qMBN 和 qMBP 分别为微生物量碳、氮、磷相对于土壤中总有机碳、全氮、全磷的百分比。土壤一微生物化学计量不平衡性是土壤有机碳、全氮、全磷的化学计量比与微生物量碳、氮、磷计量比之间的比值[12]。其中，碳、氮、磷化学计量不平衡性(C∶N_{imb}、C∶P_{imb}、N∶P_{imb})是土壤中 C∶N∶P 与微生物量中相应比值的比值。

利用 Excel 2021 和 SPSS 22.0 软件进行数据处理与分析，采用单因素(one－way ANOVA)和新复极差法(duncan's new multiple range test DMRT)进行方差分析和多重比较，Pearson 法进行相关性分析，并利用 Origin 2022 软件完成制图。在 R 4.2.2 软件进行冗余分析(RDA)，利用蒙特卡洛置换检验来检验约束排序模型的显著性并评估解释变量对响应变量的解释贡献。图表数据均为平均值±标准误。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用类型下土壤碳、氮、磷及其化学计量特征

由图 1 可知，3 种典型土地利用类型下，土壤 SOC 和 TP 含量变化较大。其中，SOC 在人工林地最高，比梯田和川道地分别提高 137.4%，43.5%。经方差检验发现，SOC 在人工林地与梯田间差异显著($p<0.05$)。TP 以川道地为最高，比梯田和人工林地分别提高 8.7%，14.8%，TP 在川道地与人工林地间存在显著性差异。而 TN 在各土地利用类型间无明显差异。



注：图柱上方小写字母表示不同土地利用类型间差异显著($p<0.05$)。

图 1 土壤碳、氮、磷及化学计量特征

Fig. 1 Soil C, N, P and stoichiometric characteristics

研究区土壤 C∶N、C∶P 和 N∶P 变化分别为 3.0～5.8，9.9～19.9，2.2～3.7。其中，C∶N 的最高值出现在川道地，人工林地次之，梯田最低。经方差检验，C∶N 在川道地与梯田间差异显著；而 C∶P 和 N∶P 的最高值为人工林地，分别比梯田高 100%，74.4%，分别比川道地高 74.3%，67.6%。C∶P 在人工林地上显著高于梯田和川道地；而 N∶P 在人工林地上显著高于川道地，但与梯田差异不大。

2.2　不同土地利用类型下土壤微生物生物量及其化学计量特征

由表 2 可知，土壤微生物生物量碳、氮、磷（MBC、MBN、MBP）含量分别为 51.56～133.19，7.97～21.98，4.63～12.81 mg/kg。其中，3 种典型土地利用类型间 MBC、MBN 和 MBP 呈现出一致性规律，均以人工林地为最高，分别比梯田提高 52.8%，45.8%，56.6%，分别比川道地提高 158.3%，175.8%，176.7%。经方差检验发现，MBC 和 MBP 在各处理间具有显著差异，MBN 在人工林地上显著高于川道地，但与梯田则差异不大。

不同土地利用类型下，研究区土壤微生物量碳氮比（MBC∶MBN）、碳磷比（MBC∶MBP）和氮磷比（MBN∶MBP）分别为 6.46～7.60，12.45～17.46，1.72～3.23。人工林地中 MBC∶MBN 的分布略高于梯田地和川道地，而 MBC∶MBP 和 MBN∶MBP 则正相反。经方差检验，在各土地利用类型间未表现出显著差异。

表 2　土壤微生物生物量 C、N、P 及其化学计量特征

Table 2　Soil microbial biomass C, N, P and their stoichiometric characteristics

样地类型	MBC/(mg·kg^{-1})	MBN/(mg·kg^{-1})	MBP/(mg·kg^{-1})	MBC∶MBN	MBC∶MBP	MBN∶MBP
人工林地	133.19±7.9a	21.98±4.9a	12.81±1.9a	7.60±1.7a	12.45±3.0a	1.72±0.2a
梯田地	87.16±18.2b	15.08±4.7ab	5.56±0.8b	7.44±1.6a	17.46±3.8a	3.23±0.7a
川道地	51.56±13.3b	7.97±1.6b	4.63±1.0b	6.46±1.0a	13.34±3.8a	2.32±0.6a

注：表中数据均为平均值±标准误；同列不同字母表示不同处理间差异显著（$p<0.05$）。下同。

2.3　不同土地利用类型下土壤微生物熵与化学计量不平衡性特征

由表 3 可知，土地利用类型显著影响土壤微生物熵，研究区土壤 qMBC、qMBN 和 qMBP 的变幅分别为 0.87%～2.36%，0.78%～1.40%，0.93%～3.01%。经方差分析可知，qMBC 表现为梯田＞人工林地＞川道地，qMBC 在梯田地和川道地间差异显著（$p<0.05$）。qMBN 和 qMBP 表现为人工林地＞梯田＞川道地，qMBN 在人工林地上显著高于川道地，与梯田则差异不大；而 qMBP 在人工林地上显著高于梯田和川道地。此外，研究区内土壤－微生物化学计量不平衡性具有一定的差异，但在各土地利用类型间差异不显著。

表 3　土壤微生物熵和土壤－微生物生物量化学计量不平衡性

Table 3　Soil microbial entropy and soil－microbial biomass stoichiometric imbalance

样地类型	qMBC/%	qMBN/%	qMBP/%	C∶N_{imb}	C∶P_{imb}	N∶P_{imb}
人工林地	1.77±0.3ab	1.40±0.2a	3.01±0.4a	1.00±0.3a	2.13±0.6a	2.32±0.4a
梯田地	2.36±0.4a	1.15±0.6ab	1.23±0.2b	0.50±0.1a	0.61±0.1a	2.19±0.9a
川道地	0.87±0.2b	0.78±0.2b	0.93±0.2b	1.32±0.5a	1.63±0.7a	1.39±0.4a

注：qMBC、qMBN、qMBP 分别为微生物熵碳、微生物熵氮、微生物熵磷；C∶N_{imb}、C∶P_{imb}、N∶P_{imb} 分别为碳氮化学计量不平衡性、碳磷化学计量不平衡性、氮磷化学计量不平衡性。

2.4　不同土地利用类型下土壤 C、N、P 和土壤－微生物量化学计量间的相关性

由图 2a 可知，土壤 SOC 与 TN、MBN、MBP、SOC∶TN 及 SOC∶TP 呈显著（$p<0.05$）或极显著正相关（$p<0.01$）。土壤 TN 与 MBC、MBN、MBP、SOC∶TP 及 TN∶TP 呈显著或极显著正相关。而土壤 TP 与 MBC，SOC∶TN 与 TN∶TP 呈显著负相关。MBC 与 MBN、MBP 及 TN∶TP，MBN 与 MBP、SOC∶TP 及 TN∶TP，MBP 与 SOC∶TP 及 TN∶TP 呈显著或极显著正相关。此外，MBN 与 MBC∶MBN，MBP 与 MBC∶MBP 呈显著负相关。MBC∶MBN 与 MBN∶MBP 呈显著负相关，MBC∶MBP 与 MBN∶MBP 呈极显著正相关。

由图 2b 可知，C∶N_{imb} 与 SOC∶TN 和 C∶P_{imb} 呈极显著或显著正相关，与 TN、MBC 及 TN∶TP 呈显著负相关。C∶P_{imb} 与 SOC∶TN 和 MBP 呈显著正相关，但与 MBC∶MBP 和 MBN∶MBP 呈显著或极显著负相关。N∶P_{imb} 与 TN 和 TN∶TP 呈显著正相关，与 MBC∶MBP 和 MBN∶MBP 呈显著负相关。

2.5　土壤微生物熵与土壤－微生物及化学计量不平衡性之冗余分析

冗余分析（图 3）表明，土壤－微生物量化学计量比（解释变量）与微生物熵（响应变量）间存在显著相关性，第 1，2 轴分别解释 qMB 变化的 42.1%，28.07%，说明土壤－微生物量化学计量比能有效反映 qMB 的变化。结果显示，qMBC 和 qMBN 与 MBC∶MBN、MBC∶MBP、MBN∶MBP 及 TN∶TP 呈正相关，与 SOC∶TN、C∶N_{imb} 和 C∶P_{imb} 呈负相关。qMBP 与 SOC∶TP、TN∶TP、C∶P_{imb} 和 N∶P_{imb} 间呈正相关，与 MBC∶MBP、MBN∶MBP 呈负相关。

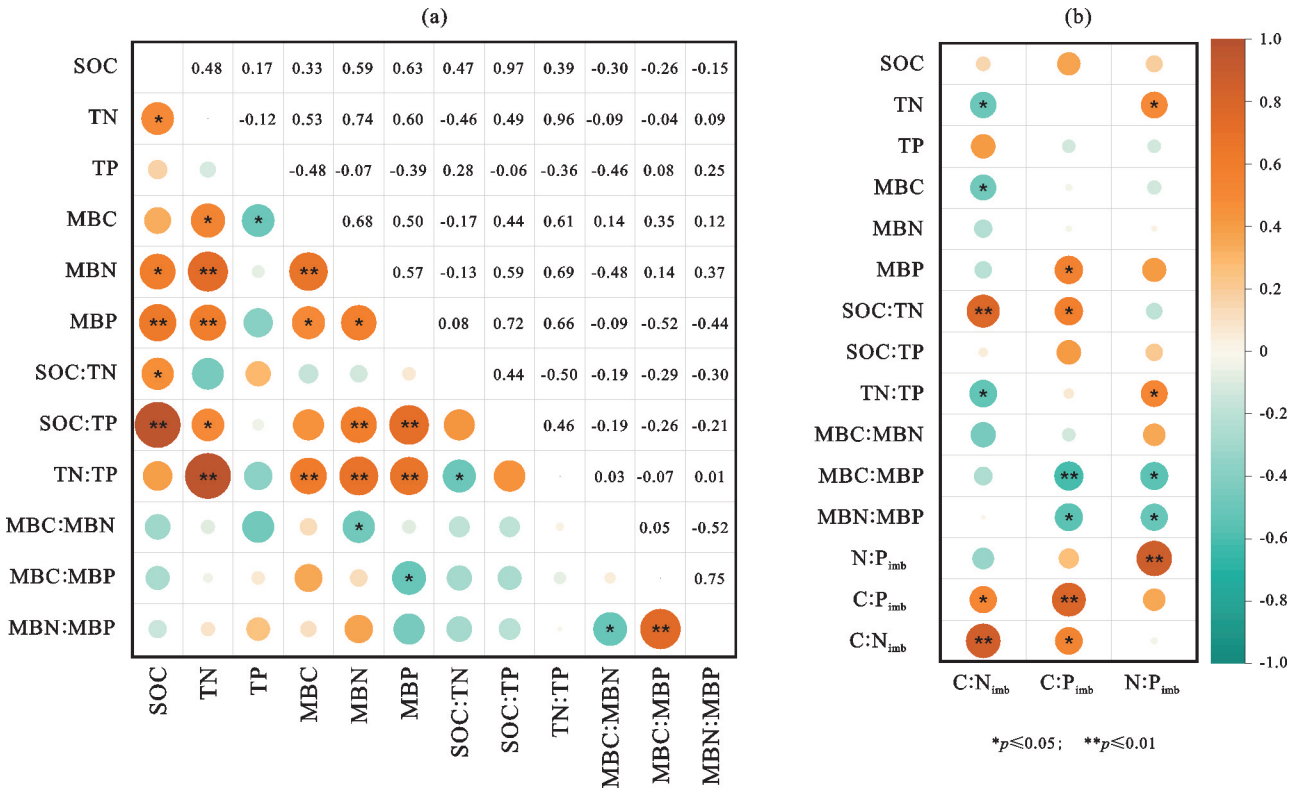
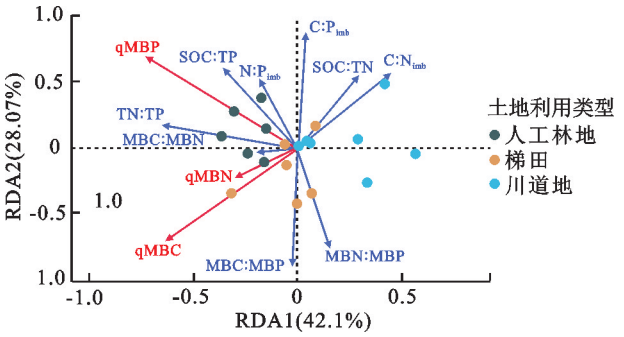


图 2 土壤—微生物量 C、N、P 及其化学计量间的相关性

Fig. 2 Correlation between soil—microbial biomass C, N, P and their stoichiometry



注:红色箭头表示响应变量;蓝色箭头表示解释变量;箭头长短为影响程度;箭头间夹角为相关程度。

图 3 不同土地利用类型下土壤微生物熵和土壤—微生物碳、氮、磷化学计量之冗余分析

Fig. 3 Redundancy analyses of soil microbial entropy and soil-microbial stoichiometric for carbon, nitrogen and phosphorus under different land use types

冗余分析排序(图 3)仅反映土壤—微生物量化学计量比与微生物熵间存在相关性,鉴于此,对 9 个解释变量进行蒙特卡洛置换检验(表 4)可知,MBC∶MBP($r^2=0.75$,$p=0.002$)及 C∶P_{imb}($r^2=0.74$,$p=0.001$)对微生物熵的影响最大。

3 讨 论

3.1 土地利用类型对土壤碳、氮、磷及其比值的影响

土壤中的 C、N、P 是植物生长发育所必需的元素,也是衡量土壤质量重要指标。C、N、P 及其化学计量比受到多种因素影响,包括自然环境因素(气候、土壤种类、地形地貌和植被类型)和人为因素干扰(土地利用类型、田间管理措施和投入管理水平)[13]。就本研究而言,人工林地中 SOC 含量最高,比梯田和川道地分别高 137.4%,43.5%,与罗由林等[14]研究结果相似。此外,不同土地利用类型对 SOC 的矿化速率影响机制也有所差异,有机质作为主要碳、氮来源,在不同土地利用类型下存在差异,除自身环境因素外,有机质输入浓度和质量也对 SOC 含量产生较大影响[15]。人工林地因其植被覆盖高,根系结构复杂,每年有大量的枯落物回归土壤,为土壤提供丰富的营养物质。而梯田和川道地作为农耕用地,其种植作物较为单一,有机肥投入不足,且本地肥力较差,加之频繁的翻耕、不合理的施肥等措施易破坏土壤结构,导致土壤有机质含量较低,从而造成土壤养分较为贫瘠。TP 则不同,农耕用地(川道地和梯田)高于人工林地,与前期在农业生产中化肥的投入有关。

土壤 C∶N 和 C∶P 常用来评价土壤 N、P 有效性,一般 C∶N、C∶P 越低,土壤有效 N、P 含量越高,反之亦然[16]。在本研究中,C∶N 和 C∶P 的变幅分别为 3.0~5.8,9.9~19.9,低于我国土壤平均水平(12.01,25.77)。在 3 种典型土地利用类型中,C∶N 表现为梯田<人工林地<川道地,说明梯田土壤中有效 N 含量最高,与杜宁宁等[16]研究结果相似。由于

该地区土壤质量差，使得农家肥和氮肥施用量高且频繁，氮素含量在短期内富集。此外，周期性的翻耕措施导致梯田地微生物活性较低，造成碳的矿化速率降低，使土壤 C∶N 低于人工林地和川道地。而 C∶P 在人工林地为最高，说明在林地土壤中 P 的累积速率较 SOC 低，可能受 P 限制。N、P 是陆地生态系统中重要的养分指标，土壤 N∶P 常被用于判断土壤养分限制因子[17]。N∶P 变幅为 2.2～3.7，以人工林地为最高。表明林地土壤较农耕用地而言，受 P 元素的供给限制较大。

表 4　蒙特卡洛置换检验排序

Table 4　Sequence of Monte Carlo permutation tests

指标	RDA1	RDA2	r^2	p	排序
SOC∶TN	0.40	0.92	0.33	0.060	7
SOC∶TP	－0.47	0.88	0.46	0.016	5
TN∶TP	－0.94	0.33	0.40	0.027	6
MBC∶MBN	－0.99	－0.12	0.03	0.813	9
MBC∶MBP	0.02	－1.00	0.75	0.002	1
MBN∶MBP	0.22	－0.98	0.58	0.003	3
C∶N_{imb}	0.54	0.84	0.46	0.011	4
C∶P_{imb}	0	1.00	0.74	0.001	2
N∶P_{imb}	－0.32	0.95	0.27	0.096	8

3.2　土地利用类型对微生物生物量碳、氮、磷及其比值的影响

与土壤 C∶N∶P 化学计量学相比，微生物量的养分浓度和化学计量特征被认为是土壤肥力和养分限制更为有效和敏感的指标[18]。在本研究，人工林地上 MBC、MBN、MBP 含量高于农耕用地（川道地、梯田地），与蒋跃利等[8]和赵彤等[9]研究结果一致。农耕用地长期受到人为干扰，表层土壤侵蚀严重，有机质剧烈矿化。此外，玉米、大豆等作物秸秆从农田中清理后，可回归土壤的秸秆残落物数量有限，导致微生物能源匮乏。尽管梯田采取有效耕作措施维持一定微生物活性，但整体上农耕用地土壤微生物量偏低。

本研究中，土壤 MBC∶MBN、MBC∶MBP 的变幅分别为 6.46～7.60，12.45～17.46，其比值在各土地利用类型间无显著差异，可能与微生物的生态内稳性作用有关[19]。已有研究[18]表明，微生物体内各元素间具有较稳定的化学计量关系，土壤 MBC 增加的同时，也需充足的氮或磷来维持其自身所需的元素化学计量。蒋跃利等[8]研究黄土丘陵区延河流域 MBC、MBN、MBP 的生态化学计量特征发现，土壤 MBC∶MBN 与 MBC∶MBP 的比值分别为 6.9～7.8，14.7～17.6，略高于本研究结果。一般情况下，MBC∶MBN 与 MBC∶MBP 的值越大，土壤真菌占微生物总量的比例也随之增大。因此，此差异可能是由于土壤微生物群落结构的变化导致的。本研究发现，MBN∶MBP 比值低于全球平均水平（6.90）[19]，其变幅为 1.72～3.23，说明目前该区域受到一定程度的 P 限制，难以满足土壤微生物的生长需要。相关性分析显示，MBN∶MBP 与 MBC∶MBP 呈极显著正相关，与 MBC∶MBN 呈显著负相关。与胡宗达等[18]的研究结果一致，但却不同于我国亚热带的研究[20]结论，说明土壤微生物量化学计量特征对不同生境的响应也不相同。

3.3　土地利用类型对土壤微生物熵和土壤－微生物化学计量不平衡性的影响

土壤微生物熵被广泛用于评估土壤质量，也可调节土壤有机碳和养分动态，比单独使用微生物量或土壤养分能更有效地反映出土壤过程及健康变化[21]。在本研究，土地利用类型对土壤微生物熵的影响较大，qMBC、qMBN 和 qMBP 的变幅分别为 0.87%～2.36%，0.78%～1.40%，0.93%～3.01%，略低于前人[22]研究结果 1.0%～5.3%，2.0%～7.8%，2.6%～5.9%。其中，qMBC 表现为梯田＞人工林地＞川道地，可能与耕作措施与施肥制度有较大关联。吴秀芝等[23]提出，qMBC 对耕作措施的响应比 MBC 更为灵敏，可进一步佐证本研究结果。而相较于农耕用地，人工林地中 qMBN 和 qMBP 的分布较高。有研究[24]表明，土壤中 N、P 的积累和耗损与土壤有机质的积累和分解高度相关。与农田相比，人工林地中丰富的植物残体使土壤有机质输入量更高、质量更好，显著增强土壤微生物活性，促进土壤有机质的分解转化。MOOSHAMMER 等[25]曾指出，土壤－微生物化学计量不平衡性的高低，可反映土壤质量状况的好坏。在本研究中，C∶N_{imb}、C∶P_{imb} 和 N∶P_{imb} 在各土地利用类型间均无显著差异，具备一定地内稳态特征。相关性分析得出，C∶N_{imb} 与 MBC，C∶P_{imb} 与 MBP、MBC∶MBP 和 MBN∶MBP 及 N∶P_{imb} 与 MBC∶MBP、MBN∶MBP 等存在显著或极显著正负相关。在黄土丘陵区土壤养分贫瘠的情况下，微生物通过调节自身的 C∶N∶P 比例，维持相对稳定的化学计量不平衡性状态，使之能适应环境的变化，保持最佳的生长和生存条件[20]。

3.4　土壤－微生物碳、氮、磷化学计量比对土壤微生物熵的影响

土壤－微生物化学计量的差异影响土壤微生物熵。已有研究[12,25]表明，微生物熵与土壤 C、N、P 比值及其化学计量不平衡性显著相关，可在一定程度上解释土壤微生物熵的变化。RDA 分析得出，qMBC

和qMBN与MBC∶MBP、MBN∶MBP呈正相关，而qMBP与SOC∶TP、TN∶TP、C∶P_{imb}和N∶P_{imb}间呈正相关。经蒙特卡洛置换检验得出，MBC∶MBP（$R^2=0.75$，$p<0.01$）和C∶P_{imb}（$R^2=0.74$，$p<0.01$）在反映土壤养分及其利用效率的变化过程中起着关键作用，说明土壤碳、磷及其活性组分（MBC和MBP）含量的变化可能影响到土壤生态系统的动态变化。而在本研究中，MBC∶MBP在人工林地处最低，表明人工林地内土壤微生物对磷素的固定作用较强，土壤磷限制也将加剧。与张冠华等[12]研究结果不一致，但显示出土壤中微生物C∶N∶P及微生物对元素利用间的动态平衡对于生态系统中C、N、P循环有一定影响。同时，也进一步证实本研究各土地利用类型下土壤微生物生长繁殖主要受到磷元素的影响。

4 结论

（1）典型治理模式“上退下推”所形成的土地利用类型对土壤－微生物C、N、P及其比值的影响存在差异。其中，川道地受施肥和耕作措施的影响，使土壤TP和C∶N比值较高，而人工林地具有较高的土壤SOC、C∶P、N∶P和MBC、MBN和MBP分布，表明在该地区实施退耕还林还草修复工程对恢复土壤微生物资源具有积极意义。

（2）土壤微生物熵（qMB）受土地利用类型的影响较大。其中，人工林地具有较高的qMBN、qMBP分布，而梯田中qMBC的分布较高。通过冗余分析和蒙特卡洛置换检验得出，C∶P_{imb}和MBC∶MBP是驱动qMB发生动态变化的最主要因素。此外，该地区现存在一定的P元素供给限制，尤以人工林地最为明显。

参考文献：

[1] ZHANG J H, LI M X, XU L, et al. C∶N∶P stoichiometry in terrestrial ecosystems in China[J]. Science of the Total Environment, 2021, 795: e148849.

[2] ZHANG J Y, AI Z M, LIANG C T, et al. How microbes cope with short-term N addition in a *Pinus tabuliformis* forest－ecological stoichiometry[J]. Geoderma, 2019, 337: 630-640.

[3] LI Y, WU J S, LIU S L, et al. Is the C∶N∶P stoichiometry in soil and soil microbial biomass related to the landscape and land use in southern subtropical China? [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2012, 26(4): e4002.

[4] JOSHI R K, GARKOTI S C, GUPTA R, et al. Recovery of soil microbial biomass, stoichiometry, and herb-layer diversity with chronosequence of farmland land abandonment in the central Himalayas, India[J]. Restoration Ecology, 2023, 31(4): e13782.

[5] ZHANG G H, YANG W J, HU J J, et al. Effects of tea planting age on soil microbial biomass C∶N∶P stoichiometry and microbial quotient[J]. Plant, Soil and Environment, 2023, 69(5): 221-229.

[6] 李宗善，杨磊，王国梁，等.黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J].生态学报，2019，39(20)：7398-7409.
LI Z S, YANG L, WANG G L, et al. The management of soil and water conservation in the Loess Plateau of Chin: Present situations, problems, and counter-solutions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7398-7409.

[7] 韩新生，刘广全，许浩，等.宁夏南部半干旱黄土区3种土地利用类型的土壤水分时空变化特征[J].水土保持学报，2022，36(6)：250-259.
HAN X S, LIU G Q, XU H, et al. Temporal and spatial variation characteristics of soil moisture under three land use types in the semi-arid loess region of southern Ningxia[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(6): 250-259.

[8] 蒋跃利，赵彤，闫浩，等.黄土丘陵区不同土地利用方式对土壤微生物量碳氮磷的影响[J].水土保持通报，2013，33(6)：62-68.
JIANG Y L, ZHAO T, YAN H, et al. Effect of different land uses on soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in three vegetation zones on loess hilly area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(6): 62-68.

[9] 赵彤，闫浩，蒋跃利，等.黄土丘陵区植被类型对土壤微生物量碳氮磷的影响[J].生态学报，2013，33(18)：5615-5622.
ZHAO T, YAN H, JIANG Y L, et al. Effects of vegetation types on soil microbial biomass C, N, P on the Loess Hilly Area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18): 5615-5622.

[10] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京：中国农业出版社，2000.
BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. 3rd. Beijing: China Agricuture Press, 2000.

[11] JOERGENSEN R G, MUELLER T. The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: Calibration of the kEN value[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1996, 28(1): 33-37.

[12] 张冠华，牛俊，易亮，等.不同植茶年限土壤－微生物生物量碳氮磷化学计量特征[J].应用生态学报，2023，34(4)：969-976.
ZHANG G H, NIU J, YI L, et al. Ecological stoichiometry of soil and microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in tea plantations with different ages[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(4): 969-976.

[13] 许窕孜，叶彩红，张耕，等.北江中下游不同林分类型土壤C、N、P生态化学计量特征[J].应用生态学报，2023，

34(4):962-968.
XU T Z, YE C H, ZHANG G, et al. Soil C, N and P stoichiometry in different forest stand types in the middle and lower reaches of the Beijiang River, China[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2023,34(4):962-968.

[14] 罗由林,李启权,王昌全,等.近 30 年川中丘陵区不同土地利用方式土壤碳氮磷生态化学计量特征变化[J].土壤,2016,48(4):726-733.
LUO Y L, LI Q Q, WANG C Q, et al. Last 30 a changes of C, N and P ecological stoichiometry of different land use types in hilly area of mid-Sichuan basin, southwest China[J].Soils,2016,48(4):726-733.

[15] 李欣雨,夏建国,鄢广奎,等.名山河流域不同土壤类型和土地利用方式下有机碳的分布特征[J].水土保持学报,2017,31(3):224-230,238.
LI X Y, XIA J G, YAN G K, et al. Distribution of organic carbon under different soil types and utilization patterns in Mingshan River watershed[J].Journal of Soil and Water Conservation,2017,31(3):224-230,238.

[16] 杜宁宁,邱莉萍,张兴昌,等.半干旱区土地利用方式对土壤碳氮矿化的影响[J].干旱地区农业研究,2017,35(5):73-78.
DU N N, QIU L P, ZHANG X C, et al. Effect of land use on mineralization of soil carbon and nitrogen in semi-arid grasslands[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2017,35(5):73-78.

[17] 程昊天,孔涛,吕刚,等.不同林龄樟子松人工林土壤－针叶－微生物生态化学计量及稳态性特征[J].生态学杂志,2022,41(5):887-894.
CHENG H T, KONG T, LÜ G, et al. The soil-needle-microbe ecological stoichiometry and homeostasis in *Pinus sylvestris* var. mongolica plantations with different stand ages[J].Chinese Journal of Ecology,2022,41 (5):887-894.

[18] 胡宗达,刘世荣,刘兴良,等.川西亚高山天然次生林不同演替阶段土壤-微生物生物量及其化学计量特征[J].生态学报,2021,41(12):4900-4912.
HU Z D, LIU S R, LIU X L, et al. Soil and soil microbial biomass contents and C∶N∶P stoichiometry at different succession stages of natural secondary forest in sub-alpine area of western Sichuan,China[J].Acta Ecologica Sinica,2021,41(12):4900-4912.

[19] 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.

[20] 张冠华,易亮,孙宝洋,等.亚热带苔藓结皮对土壤－微生物－胞外酶化学计量特征的影响[J].应用生态学报,2022,33(7):1791-1800.
ZHANG G H, YI L, SUN B Y, et al. Effects of moss biocrusts on soil-microbe-ectoenzyme stoichiometric characteristics in a subtropical area[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2022,33(7):1791-1800.

[21] BHATTACHARYYA S S, ROS G H, FURTAK K, et al. Soil carbon sequestration-An interplay between soil microbial community and soil organic matter dynamics[J].Science of the Total Environment,2022,815:e152928.

[22] 李斌,辜翔,方晰,等.湘中丘陵区土壤微生物指标对土地利用方式的响应[J].中南林业科技大学学报,2015,35(4):72-77,88.
LI B, GU X, FANG X, et al. Responses of soil microbial indicators to land-use types in hilly area, central Hunan province[J].Journal of Central South University of Forestry and Technology,2015,35(4):72-77,88.

[23] 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 X Z, LIU B R, YAN X, 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.

[24] 邓健,张丹,张伟,等.黄土丘陵区刺槐叶片－土壤－微生物碳氮磷化学计量学及其稳态性特征[J].生态学报,2019,39(15):5527-5535.
DENG J, ZHANG D, ZHANG W, et al. Carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry and homeostasis characteristics of leaves, soil, and microbial biomass of *Robinia pseudoacacia* forests in the Loess Hilly Region of China[J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(15):5527-5535.

[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:e22.