

DOI: 10.20103/j.stxb.202305241095

王杨, 穆云飞, 孙旭辉, 刘雪婷, 宋正华, 杨贵伟, 李延鹏, 黄志旁, 肖文. 基于土壤线虫群落成熟度指数的拉沙山土壤生态系统稳定性评价及可行性研究. 生态学报, 2024, 44(12): 5280-5293.

Wang Y, Mu Y F, Sun X H, Liu X T, Song Z H, Yang G W, Li Y P, Huang Z P, Xiao W. Stability evaluation of soil ecosystem assessment based on maturity index of soil nematodes and feasibility study in Lasha Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(12): 5280-5293.

基于土壤线虫群落成熟度指数的拉沙山土壤生态系统稳定性评价及可行性研究

王 杨^{1,3}, 穆云飞^{1,3}, 孙旭辉^{1,3}, 刘雪婷^{1,3}, 宋正华^{1,3}, 杨贵伟⁴, 李延鹏^{1,2,5,*},
黄志旁^{1,2,5}, 肖 文^{1,2,5}

1 大理大学东喜玛拉雅研究院, 大理 671003

2 云岭滇金丝猴云南省野外科学观测研究站, 大理 671003

3 大理大学农学与生物科学学院, 大理 671003

4 高黎贡山国家级自然保护区怒江管护局, 怒江 673100

5 大理大学三江并流区域生物多样性保护与利用云南省创新团队, 大理 671003

摘要:土壤生态系统被誉为是生物圈的能量储存介质, 稳定健康的土壤生态系统是维持陆地生态系统生产力的关键, 但系统内部各种生物作用和复杂过程很难直接观测, 很难利用陆地生态系统的评价体系评价其稳定性。近年来土壤线虫群落成熟度指数作为土壤生态系统稳定性的指示类群被广泛认可和利用, 拟通过拉沙山区域 13 个固定大样地中的 52 个样方的土壤线虫成熟度指数对区域土壤生态系统稳定性进行评价, 并对评价的可行性进行验证。采用宏基因组技术共获取线虫扩增子序列变体 (Amplicon Sequence Variant, ASV) 963 个, 隶属于 2 纲 10 目 41 科 67 属, 群落结构以食细菌线虫和捕食-杂食类线虫为主, 群落以 K-策略者 (c-p 3—5) 生活类群为主导。研究结果表明, 土壤线虫的成熟度指数均值为 3.24 ± 0.32 , 评价结果认为拉沙山区域土壤生态系统整体较为稳定, 且土壤线虫成熟度指数在空间上不存在统计差异 ($P > 0.05$)。通过利用样地监测获得的人为干扰强度与利用土壤线虫成熟度指数所评价出的结果呈现显著的负相关关系 ($P < 0.05$), 表明稳定性较低的样地其人类活动干扰也较大; 同时对土壤线虫成熟度指数的评价结果与样地地表生态系统现状验证结果显示, 在中海拔的区域主要因其河谷较深, 同时两侧山体陡峭且时有塌方发生导致土壤生态系统的不稳定且土壤线虫成熟度指数偏低, 评价结果与实际地表生境状态相符, 所以利用土壤线虫成熟度指数评价区域大样地是可行的, 该研究为未来区域的土壤生态系统健康评价完善提供了新的指标。

关键词:拉沙山区域; 土壤线虫; 营养类群; 成熟度指数; 生态系统稳定性

Stability evaluation of soil ecosystem assessment based on maturity index of soil nematodes and feasibility study in Lasha Mountain

WANG Yang^{1,3}, MU Yunfei^{1,3}, SUN Xuhui^{1,3}, LIU Xueting^{1,3}, SONG Zhenghua^{1,3}, YANG Guiwei⁴,
LI Yanpeng^{1,2,5,*}, HUANG Zhipang^{1,2,5}, XIAO Wen^{1,2,5}

1 Institute of Eastern-Himalaya Biodiversity Research, Dali University, Dali 671003, China

2 Yunling Black-and-White Snub-Nosed Monkey Observation and Research Station of Yunnan Province, Dali 671003, China

3 School of Agriculture & Biology, Dali 671003, China

4 Administration of Gaoligongshan National Nature Reserve in Nujiang, Nujiang 673100, China

基金项目:云南省自然科学基金地方高校联合专项-青年项目 (202001BA070001-227); 国家自然科学基金 (32360137); 第二次青藏高原综合科学考察研究资助 (2019QZKK0402); 云南省“万人计划”青年拔尖人才项目 (YNWR-QNBJ-2019-262)

收稿日期:2023-05-24; **网络出版日期:**2024-04-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liyp@ eastern-himalaya.cn

5 The Provincial Innovation Team of Biodiversity Conservation and Utility of the Three Parallel Rivers Region from Dali University, Dali 671003, China

Abstract: Soil ecosystems are recognized as crucial energy reservoirs within the biosphere. Stable and healthy soil ecosystems play a pivotal role in maintaining the productivity of terrestrial ecosystems. However, evaluating soil ecosystem stability remains a challenge due to the complexity of biological reactions and soil processes and the difficulty of directly observing subsurface systems' dynamics. For the past few years, the utilization of the soil nematode community maturity index has gained widespread implementation and has been utilised as indicator taxa for the assessment of soil ecosystem stability. Therefore, this study aimed to evaluate soil ecosystem stability within the Lasha Mountain region by employing the soil nematode community maturity index across a total of 52 sample plots from 13 fixed major quadrats, and to verify the feasibility of this evaluation method. Furthermore, we aimed at assessing the practicability of this evaluation system when metagenomics technology was employed. We identified a total of 963 nematode amplicon sequence variants, distributed across 2 classes, 10 orders, 41 families, and 67 genera. Among them, the bacterivorous and omnivorous-predatory nematodes emerged as the dominant groups, with the majority of them displaying K-strategy characteristics (c-p 3—5). The average soil nematode community maturity index was measured at 3.24 ± 0.32 , suggesting that the soil ecosystem was relatively stable, while the spatial distribution of the soil nematode community maturity index in Lasha Mountain area exhibited no significant variation ($P > 0.05$). A significantly negative correlation was found between the artificial disturbance intensity obtained by using the plot monitoring and the results evaluated by using the soil nematode community maturity index ($P < 0.05$), indicating that the plots with low stability also showed greater interference with human activities. Concurrently, the assessment results of the soil nematode maturity index and the validations of surface ecosystems of the sample plot revealed an elevational pattern, with mid-altitude regions showing lower nematode community maturity index values, attributed mainly to the deep river valleys and extreme steepness of the slopes on both sides characteristic of the region which experiences frequent landslides. This particular situation results in soil ecosystem instability and the loss of soil nematode community maturity index. These assessment outcomes align with the real conditions of the surface habitat. Consequently, it reaffirms the feasibility of the soil nematode community maturity index as an assessment tool for soil ecosystems stability, potentially paving the way for its application in the evaluation of regional ecosystem health in future assessments.

Key Words: Lasha Mountain area; soil nematodes; nutritional groups; maturity index; ecosystem stability

土壤生态系统是维持生物多样性的基石^[1],是陆地生态系统形成、维持和演化的基础条件^[2],是稳定性极强的一类生态系统^[3—4]。稳定的土壤生态系统有利于维持陆地生态系统的生产力^[5]、物质能量供给^[6]及结构稳定性^[7],但其稳定性会受到人类活动和自然灾害等原因的干扰而改变,进而直接或间接地影响陆地生态系统生物群落结构和系统的稳定^[8],且稳定性被破坏后是极难恢复的^[9—11]。当前,全球大约有 33% 的土壤处于中度或高度退化的状态,包括了耕地(38%)、牧草地(21%)、林地(18%)^[12],这对全球的生物多样性保护和人类社会的可持续发展带来了不可忽视的影响。针对生态环境中的土壤质量下降,过往仅关注了土壤沙化、水土流失及土壤盐碱化等^[13—14],而土壤稳定性研究相对滞后。

早在 20 世纪时就有研究者在众多土壤定性和定量指标中筛选出最小数据集(Minimum Data Set, MDS)用来评价土壤健康状况^[15—16],测定指标涉及物理、化学和生物指标三个方面。近年来,研究者们更倾向于生物指标,如 Lehmann 综合土壤健康评估多种常见指标后指出生物指标是未来评价土壤健康的主要方向^[17]。目前常用的生物指标有地表植物、动物和微生物等生物类群的多样性指数^[18—20]。现行生态系统的评价是根据选定的指标体系和评价标准,选用恰当的生态学方法和指标^[21],利用适当的模型、生物化学方法等对生态系统的结构以及环境改变进行综合评价^[22],但土壤生态系统不同于陆地和海洋生态系统的是,其内部的物质组成和生物化学过程很难直接被观测,所以在评价时难以直接套用陆地生态系统的评价指标和体

系^[15]。土壤生态系统的稳定性评价也是一个综合的、复杂的和不成熟的工作^[23–24],仅凭借多样性是无法很好地表明土壤生态系统稳定性的问题,进而有研究者提出利用土壤生态系统中生物量和种类都巨大的一个生物类群—土壤线虫作为系统稳定性的评价指示类群,且逐渐的被国际上很多研究者或机构所接受及应用^[25–27]。土壤线虫是土壤生态系统中生物量最多、功能类群最丰富的多细胞动物类群,参与了不同营养级的物质能量循环且对外界环境和系统稳定性变化响应快速^[28–30]。Bongers 于 1990 年提出土壤线虫成熟度指数的概念,利用土壤线虫群落结构特征结合不同营养级线虫的生活史及相互关系^[27],对土壤生态系统进行综合的评价,进而提升了利用土壤线虫评价土壤生态系统稳定性的可行性和准确性^[31–33]。

本研究拟利用研究区固定样地的人类干扰水平及样地地表生态系统现状对土壤线虫成熟度指数评价区域土壤生态系统稳定的可行性及方法进行初步研究,探究其可否作为未来土壤生态系统评价体系的一个可用指标。同时,研究区地处中国三江并流区的核心区域,也是我国寒温性针叶林中旗舰物种——滇金丝猴的重要栖息地,保护区周边社区早期的放牧和林下采集等方式导致部分区域已出现草场退化、滑坡和泥石流等现象,然而该区域土壤生态系统稳定性情况并不清楚,为此开展探索土壤线虫成熟度指数评价土壤生态系统可行性的同时对区域土壤生态系统稳定性进行合理评价,为未来的滇金丝猴保护和社区发展提供数据基础和合理建议。

1 研究区概况

拉沙山(26° 20'N, 99° 15'E)位于云南省兰坪县云岭省级自然保护区(图 1),地处横断山系云岭山脉中段,是滇金丝猴(*Rhinopithecus bieti*)、林麝(*Moschus berezovskii*)和须弥红豆杉(*Taxus wallichiana*)等珍稀濒危野生动植物资源的重要栖息地^[34],植被类型由低海拔的灌丛、落叶阔叶林、常绿阔叶林、针阔混交林逐渐过渡到高海拔的寒性暗针叶林,海拔越高水流越小,且南侧沟、北侧沟海拔 3500 m 样地和主沟海拔 3700 m 样地无水流(表 1)。

研究区也是云岭滇金丝猴云南省野外科学观测研究站的核心监测区,在核心监测区内从海拔 2500 m 到海拔 3800 m 的垂直范围,沿干流域以海拔 200 m 为间隔,布设 7 个 100 m × 100 m 的综合监测大样地;同时在南支流和北支流各布设 3 个综合监测大样地,共布设 13 个综合监测大样地(1 hm²),综合监测大样地横跨区域的主要溪流(图 1)。

表 1 综合监测大样地基本信息

Table 1 Information of comprehensive monitoring sample plots

样地编号 Sample plot number	海拔/m Altitude	植被类型 Vegetation type	水环境 Water environment		
			河面宽度/m Surface	水深/cm Depth	流速/(m/s) Velocity
z2500	2500	退耕还林荒地	5.50	0.18	0.40
z2700	2700	落叶阔叶林	4.60	18.60	0.46
z2900	2900	落叶阔叶林	6.10	16.00	0.50
z3100	3100	针阔混交林	4.10	8.60	0.65
z3300	3300	针阔混交林	3.50	12.25	0.60
z3500	3500	针阔混交林	0.80	3.67	0.40
z3700	3700	寒温性针叶林	—	—	—
bc3100	3100	针阔混交林	5.70	7.40	0.45
bc3300	3300	寒温性针叶林	0.50	5.75	0.20
bc3500	3500	高山草甸	—	—	—
nc3100	3100	针阔混交林	3.50	7.40	0.45
nc3300	3300	寒温性针叶林	1.20	5.50	0.20
nc3500	3500	高山草甸	—	—	—

bc:北支流流域 North branch watershed;nc:南支流流域 South branch watershed;z:干流域 Trunk watershed

2 研究方法

2.1 土壤样品采集

在 2021 年 5 月和 10 月,每个长期综合监测大样地中的 4 个土壤生态系统监测样方内各采集 1 个混合土壤样品,即在大样地的南、北坡各采集 1 个样方的土样,水中上、下游各采集 1 个样方土样(水体中的土样主要采取的是河边底泥,以水陆交汇点为中间点进行五点取样,然后混合均匀作为一个样方的土壤样品)。即沿干流域(2500—3700 m)的 7 个综合监测大样地(图 1)中,共采集 28 个土样;在南、北两个支流域(海拔 3100 m、3300 m 和 3500 m)布设了 6 个综合监测大样地,共采集 24 个土样;干流域和支流域合计采集 52 个土壤样品,且两个月份以相同方法采集相同土量。

在每个取样样方内利用五点法进行取样,采集土层 10—15 cm 深的土壤^[35],每个混合土壤样品不低于 1 kg 且充分混匀后,取 5 g 土壤于 48 h 内利用干冰保存至测序公司进行 DNA 提取及测序,剩余样品进行同步的土壤含水量、微生物分离及土壤理化性质测定等工作。

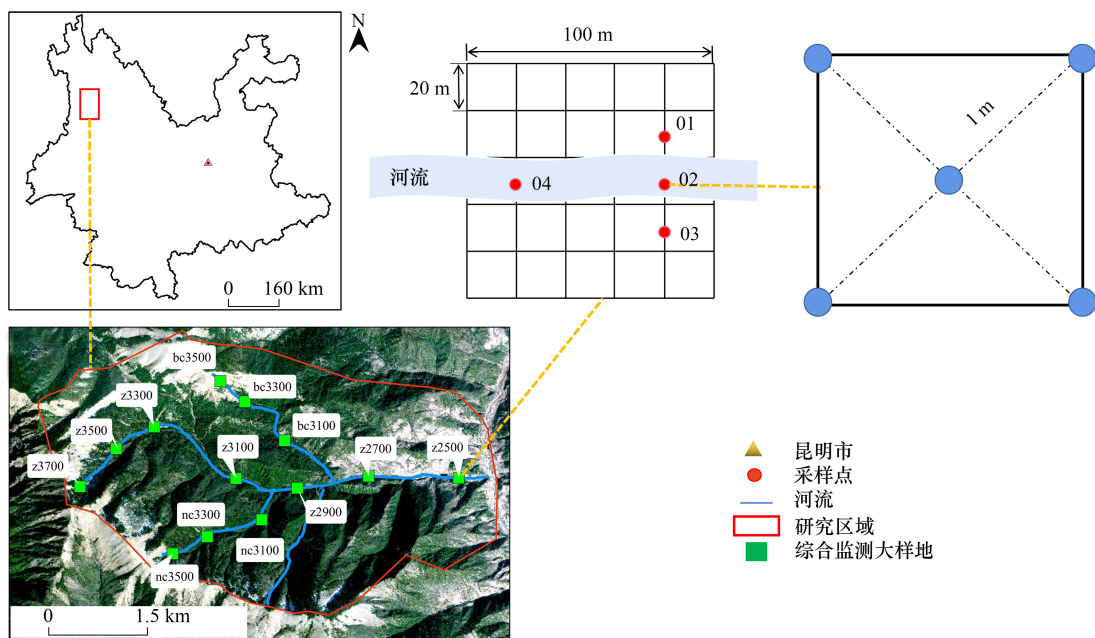


图 1 研究区域及土壤样品采集样地设图

Fig.1 The map of study site and sample plot setting in Lasha Mountain area

2.2 土壤线虫的扩增子高通量测序

2.2.1 DNA 提取及 PCR 扩增

采用 E. Z. N. A.® Soil DNA 试剂盒(Omega Bio-tek, Norcross, GA, U.S.)对混合土样进行 DNA 抽提,利用琼脂糖凝胶电泳检测 DNA 的纯度和浓度;采用真核生物通用引物 528 F(5'-GCGGTAATTCCAGCTCCAA-3')和 706 R(5'-AATCCRAGAATTTACCTCT-3')对 18 S 序列 V4 区进行 PCR 扩增^[36]。

2.2.2 Illumina Novaseq 测序及数据处理

委托深圳微生态科技有限公司利用美国 Illumina 公司的 Novaseq 6000 PE 250 平台进行测序;下机原始数据运用 Qiime2 dada2 插件处理,得到扩增子测序变体(Amplicon Sequence Variants, ASV)表格和其代表序列。将代表序列上传到 Greengenes 数据库得到各 ASV 的初步分类信息表。

2.2.3 线虫属的鉴定

为使数据标准化,按各样品序列中最低数量对样品序列进行抽平处理后,用 Qiime2 feature-table 插件剔除

所有非线虫序列,再将每个 ASV 代表序列上传到 NCBI 的 GENE BANK 核酸数据库进行对比鉴定,得知 52 个样品共产生 963 个 ASV。将分类单元(科、属)参考《长白山森林土壤线虫》^[37]、《中国淡水及土壤线虫的研究》^[38]及 *De nematoden van Nederland*^[39]再次核对注释。

2.3 土壤线虫群落分析

计算土壤线虫的相应指数利用属水平的土壤线虫测序数据,对未分类线虫属的数据在计算时将其排除,每一属对应多个 ASV 序列将其合并为一个分类单元,所有指数通过 ASV 个数来构建不同样地的土壤线虫群落特征:

多样性指数 Shannon Wiener Index:

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

优势度指数 Dominance Index:

$$D = \frac{N_{\max}}{N}$$

成熟度指数 Maturity Index:

$$MI = \sum v(i) \times P_i$$

式中, S 是鉴定的分类单元(属)的数目; P_i 为第 i 个分类单元中序列数所占比例^[40]; $N_{\max}$ 为优势类群的序列数; N 为所有类群(属)的序列数;按照线虫个体数进行优势度的划分:个体序列数占总序列数 10% 以上者为优势类群,1%—10% 为常见类群,1% 以下为稀有类群^[41]; $v(i)$ 为第 i 种线虫的 c-p 值,成熟度指数的原理是依据线虫不同的生活史 c-p 类群的赋值进行加权平均^[23],值越小表明土壤处于演替早期且土壤生态系统越不稳定,成熟度指数大于 3 表明土壤生态环境很稳定,且数值越大的土壤生态系统稳定性越好^[24,42]。

2.4 样方人为干扰强度计算

在每个综合监测大样地内都放置了 3 台红外相机,相机拍摄记录的人类活动,包括人、家畜(黄牛、牦牛、山羊及绵羊等),由于 12 号和 13 样地是采样后才完成建设,故本研究中仅利用了 1—11 号样地中的 33 台红外相机数据。

人干扰强度 = 拍摄到的人类活动次数 / 相机拍摄次数

2.5 数据分析

在分析检验前对数据进行正态分布检验,非正态分布的数据利用非参数检验,利用非参数检验(Mann-Whitney Test)比较土壤线虫成熟度指数水陆、坡向、干支流间的差异;利用非参数检验(Kruskal-Wallis Test)比较土壤线虫成熟度指数不同海拔梯度的差异;利用相关性分析(Pearson Correlation Coefficient)检验不同样方内土壤线虫成熟度指数与人类活动强度之间的相关性;显著水平设为 $P < 0.05$ 。

运用软件 R 4.20 进行数据统计分析,运用 Q—GIS 3.22 软件制图;所有数据显示为均值及均值 ± 标准差。

3 结果

3.1 土壤线虫测序特征

采集的 52 份土壤样品共生成 66687 条高质量有效序列,其中 963 条序列为土壤线虫;根据可观测 ASV 数量做稀释曲线,稀释曲线趋于平坦且土壤样品覆盖度基本饱和,表明测序深度基本可以反映群落结构(图 2)。

3.2 土壤线虫的群落特征

拉沙山区域获得 963 个线虫 ASV 序列隶属于 2 纲 10 目 41 科 67 属。区域的优势类群有 2 属,分别是色矛目(Chromadorida)棱咽科(Prismatolaimidae)棱咽属(*Prismatolaimus*)和矛线目(Dorylaimida)单齿科(Mononchidae)单齿属(*Mononchus*),分别占总序列数 42.25% 和 13.6%;常见类群有 11 属,占总序列数 37.87%;另有稀有类群 54 属,占总序列数 6.28%(附表 1)。

拉沙山区域土壤线虫有食细菌性线虫、食真菌性线虫、捕食—杂食性线虫和植物寄生性线虫等 4 种功能类群。食细菌性线虫为主要优势类群, 占总序列数 65.36%; 其次是捕食—杂食性线虫, 占总序列数 26.87%; 食真菌性线虫和植物寄生性线虫分布最少, 分别占总序列数 3.29% 和 4.47% (图 3)。

拉沙山区域土壤线虫有 c-p 1 类群、c-p 2 类群、c-p 3 类群、c-p 4 类群和 c-p 5 类群共 5 种生活史对策的类群。区域以线虫群落中 c-p 3 类群为主导地位, 占总序列数 71.90%; 其次是 c-p 4 类群, 占总序列数 12.80%; 而 c-p 1 类群、c-p 2 类群和 c-p 5 类群较少, 分别占总序列数 2.75%、6.16% 和 6.38% (图 3)。

3.3 拉沙山区域土壤稳定性评价

总体上, 拉沙山土壤线虫成熟度指数为 3.24 ± 0.32 ($n=52$), 表明区域土壤生态系统整体较为稳定 (图 4), 但样地—z3100 的成熟度指数略低于稳定阈值 ($MI = 2.94 < 3.0$), 其余样地的土壤线虫成熟度都大于阈值, 有 3 个大样地中的 4 个样方 (占 7.7%) 的成熟度指数略低于稳定阈值 (图 4)。

样地—bc3100 ($MI = 3.46 \pm 0.35$) 土壤生态系统稳定性最好, 多样性指数为 1.82 ± 0.37 ; 而在样地—z2500 ($MI = 3.40 \pm 0.25$)、样地—nc3500 (3.38 ± 0.26)、样地—bc3500 ($MI = 3.38 \pm 0.17$) 及样地—nc3300 ($MI = 3.35 \pm 0.24$) 的土壤生态系统稳定性次之, 除样地—z3100 ($MI < 3.0$) 的成熟度指数较低, 稳定性较差之外的其他样地稳定性均较好 (表 2)。

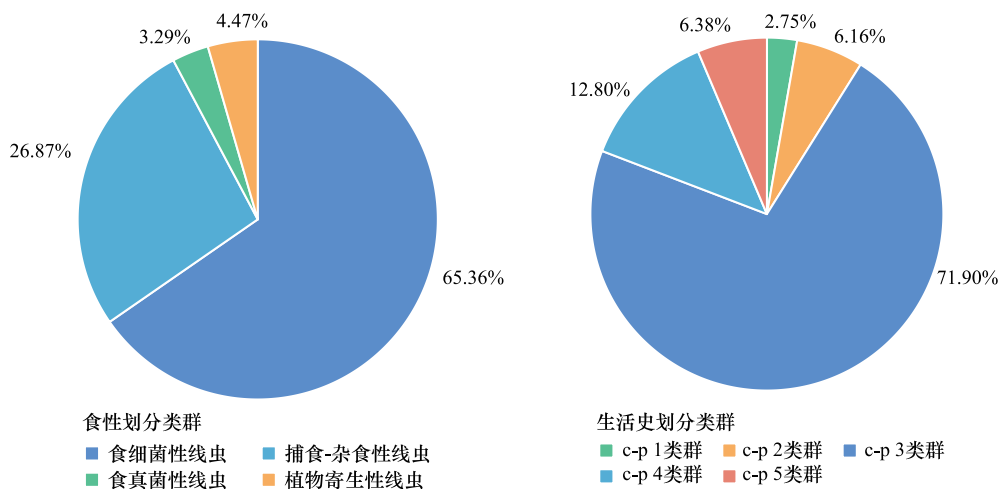


图 3 土壤线虫食性和生活史各类群所占比例图

Fig.3 The proportion of soil nematodes among different diet and life-history groups

多样性指数在样地—bc3500 ($H = 1.02 \pm 0.42$) 最低, 成熟度指数为 3.38 ± 0.17 , 代表该样地自然条件贫瘠,

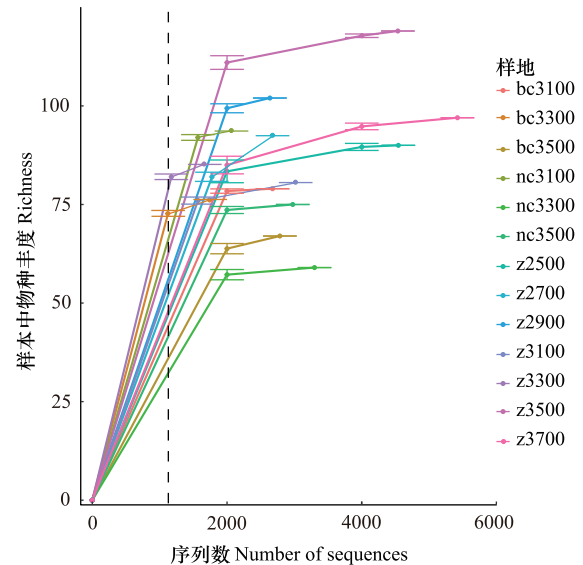


图 2 土壤线虫测序的稀释曲线

Fig.2 Rarefaction curves in the soil nematodes

bc3100: 北侧沟海拔 3100m 样地; bc3300: 北侧沟海拔 3300 m 样地; bc3500: 北侧沟海拔 3500 m 样地; nc3100: 南侧沟海拔 3100 m 样地; nc3300: 南侧沟海拔 3300 m 样地; nc3500: 南侧沟海拔 3500 m 样地; z2500: 主沟海拔 2500 m 样地; z2700: 主沟海拔 2700 m 样地; z2900: 主沟海拔 2900 m 样地; z3100: 主沟海拔 3100 m 样地; z3300: 主沟海拔 3300 m 样地; z3500: 主沟海拔 3500 m 样地; z3700: 主沟海拔 3700 m 样地

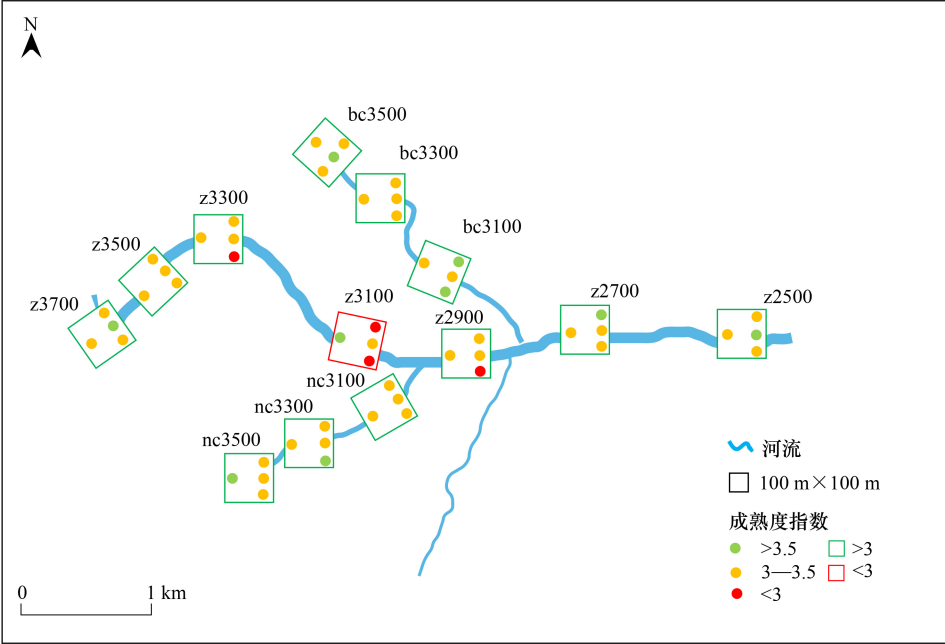


图 4 基于土壤线虫成熟度指数的拉沙山区域土壤生态系统评价

Fig.4 Evaluation of soil ecosystem stability via soil nematodes maturity index in Lasha Mountain area

不能维持较高的生物多样性,但系统很稳定;在样地—nc3100($H = 1.91 \pm 0.29$)和样地—z2900($H = 1.91 \pm 0.11$)的多样性指数最高,说明该区域土壤条件较好,能够维持较多的物种和线虫数量,土壤生态系统稳定性也较好($MI > 3.0$)(表 2)。

表 2 土壤线虫多样性指数和成熟度指数(平均数 $\pm$ 标准差)

Table 2 Diversity index and maturity index of soil nematodes in sample plots

样地编号 Sample plot number	多样性指数 Shannon index	成熟度指数 Maturity index	样地编号 Sample plot number	多样性指数 Shannon index	成熟度指数 Maturity index
z2500	1.60 $\pm$ 0.28	3.40 $\pm$ 0.25	bc3100	1.82 $\pm$ 0.37	3.46 $\pm$ 0.35
z2700	1.41 $\pm$ 0.35	3.23 $\pm$ 0.27	bc3300	1.43 $\pm$ 0.31	3.21 $\pm$ 0.12
z2900	1.91 $\pm$ 0.11	3.11 $\pm$ 0.22	bc3500	1.02 $\pm$ 0.42	3.38 $\pm$ 0.17
z3100	1.63 $\pm$ 0.33	2.94 $\pm$ 0.58	nc3100	1.91 $\pm$ 0.29	3.24 $\pm$ 0.12
z3300	1.71 $\pm$ 0.21	3.08 $\pm$ 0.42	nc3300	1.44 $\pm$ 0.40	3.35 $\pm$ 0.24
z3500	1.72 $\pm$ 0.44	3.17 $\pm$ 0.06	nc3500	1.51 $\pm$ 0.40	3.38 $\pm$ 0.26
z3700	1.54 $\pm$ 0.30	3.19 $\pm$ 0.23			

3.4 拉沙山区域土壤生态系统稳定性的空间格局

3.4.1 土壤生态系统稳定性的海拔变化

拉沙山区域干流的土壤生态系统稳定性沿海拔梯度上无差异(3.16 ± 0.36 , $df = 6$, $P = 0.79$),呈现出“V”型格局,即低海拔和高海拔稳定性高于中海拔(图 5),海拔 3100 m 样地($MI = 2.94$)的成熟度指数最低,土壤生态系统稳定性较差。

3.4.2 土壤生态系统稳定性随异质性空间环境的变化

土壤生态系统的稳定性比较中发现河流略高于陆地,但未达到显著性水平(3.29 ± 0.23 vs. 3.18 ± 0.38 , $n_{\text{水}} = 24$, $n_{\text{陆}} = 26$, $z = -0.661$, $P = 0.509$)(图 6);同时针对干支流和坡向而言,拉沙山区域的土壤生态系统稳定性无差异,干流的土壤生态系统稳定程度与支流接近(3.06 ± 0.44 vs. 3.32 ± 0.23 , $n_{\text{干流}} = 12$, $n_{\text{支流}} = 12$, $z =$

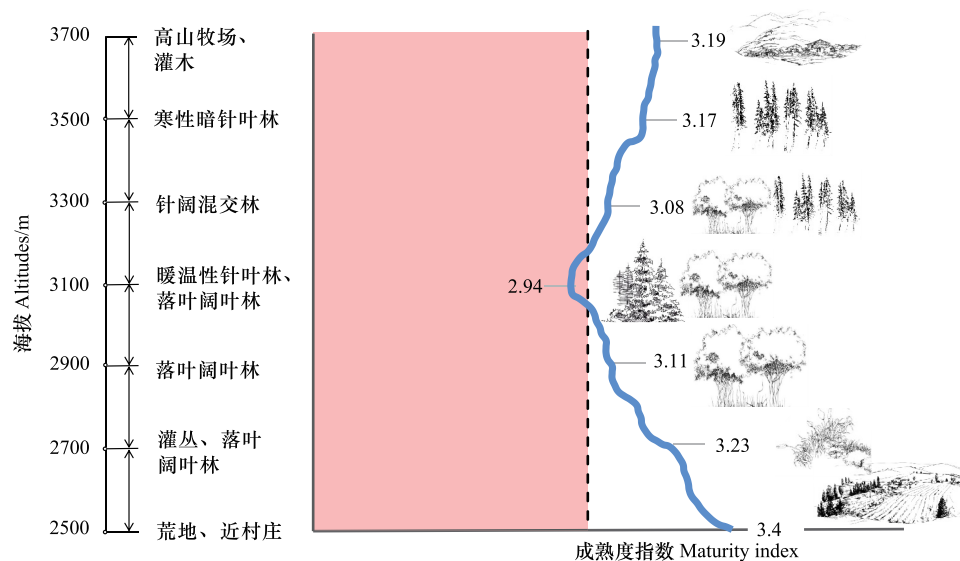


图5 拉沙山区域干流不同海拔土壤线虫成熟度指数的差异

Fig.5 The different of soil nematodes maturity index among different altitudes of the trunk stream in Lasha Mountain area

-1.387, $P=0.165$) (图6), 土壤生态系统稳定性在北坡(阴坡)和南坡(阳坡)之间无差异 (3.15 ± 0.38 vs. 3.29 ± 0.28 , $n_{\text{北}} = 12$, $n_{\text{南}} = 12$, $z = -0.579$, $P=0.563$) (图6)。

3.5 样方的土壤线虫成熟度指数与人类干扰强度

根据52个样方的数据显示土壤线虫成熟度指数与红外相机拍摄记录的人类活动强度呈现显著负相关关系 ($n=33$, $r=-0.36$, $P=0.04$), 即人类活动越强样方的土壤线虫成熟度指数越低。

4 讨论

基于土壤线虫成熟度指数评价拉沙山区域的土壤生态系统稳定性是可行的, 整体评价结果与实际情况相符, 流域整体的土壤生态系统是稳定的, 尤其是高海拔地区作为滇金丝猴的重要栖息地是以寒温性针叶林及高山草甸为主^[43], 其整体生态系统较为稳定(图7A); 低海拔的退耕山地处于保护区边界内, 多年未进行耕种或改造, 虽土壤养分贫瘠^[44]但系统稳定(图7B)。

在中海拔的区域土壤生态系统稳定性较差, 主要因2900—3100 m区间的河谷较深(图8), 同时两侧山体陡峭, 近年来时有塌方发生, 导致土壤生态系统的不稳定^[45—46], 但由于水热条件好, 样地上方所承载的森林面积较大, 土壤中堆积的有机质较多, 能够维持较大数量的线虫群落和物种^[47]; 由于该区域土壤生态系统稳定性较差, 其线虫群落多以扩繁速度快的机会主义者为主, 线虫群落多如c-p值较低的: 污结咽属(*Tylopharynx*)、真单宫属(*Eumonhystera*)、拟丽突属(*Acrobeloides*)、绕线属(*Plectus*)、丝尾垫刃属(*Filenchus*)和细纹垫刃属(*Lelenchus*)等。

此外, 根据拉沙山区域整体结果显示, 拉沙山区域整体土壤生态系统很稳定; 在选中的13个大样地里共12个大样地的土壤生态系统非常稳定, 52个样方中有48个样方很稳定; 另外, 在样地—z3100 m与整体其他样地相比地表土层稳定性较差, 地表植被覆盖度较低, 可能是导致该区域土壤生态系统稳定下降的主要自然因素^[48]; 样地—z2900 m的稳定性较低, 主要是由于前期的大规模泥石流(2008年)造成的大面积滑坡而后期

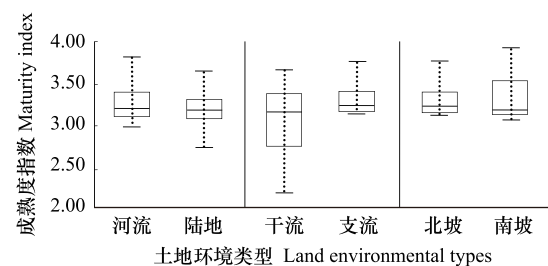


图6 异质性空间环境的土壤线虫成熟度指数变化

Fig.6 Changes in the soil nematode maturity index between different spatial environments (water and land, shady slopes and sunny slopes, main stream and tributaries)

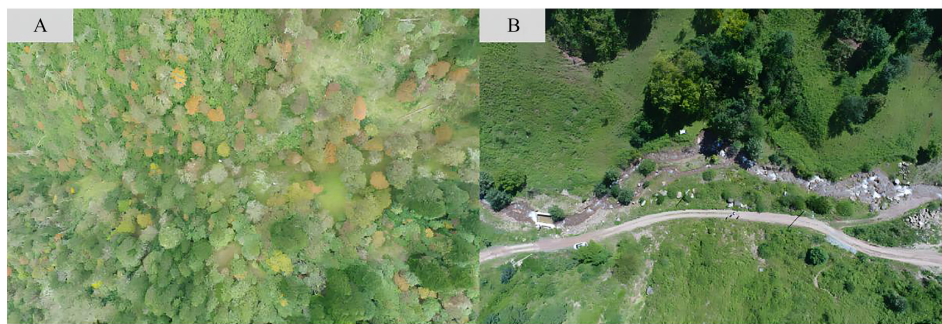


图7 研究区域的生境航拍图(样地—z3700 和样地—z2500)

Fig.7 Aerial map of habitat in study area (Sample plot in z3700 and Sample plot in z2500)

A: z3700 样地的航拍图, 植被类型为寒温性针阔混交林, 主要树种为苍山冷杉 (*Abies delavayi*) 和杜鹃花属 (*Rhododendron*) 的树种; B: z2500 样地航拍图, 生境类型为退耕荒地, 主要植物以金丝桃科和蔷薇科的矮小灌木为主

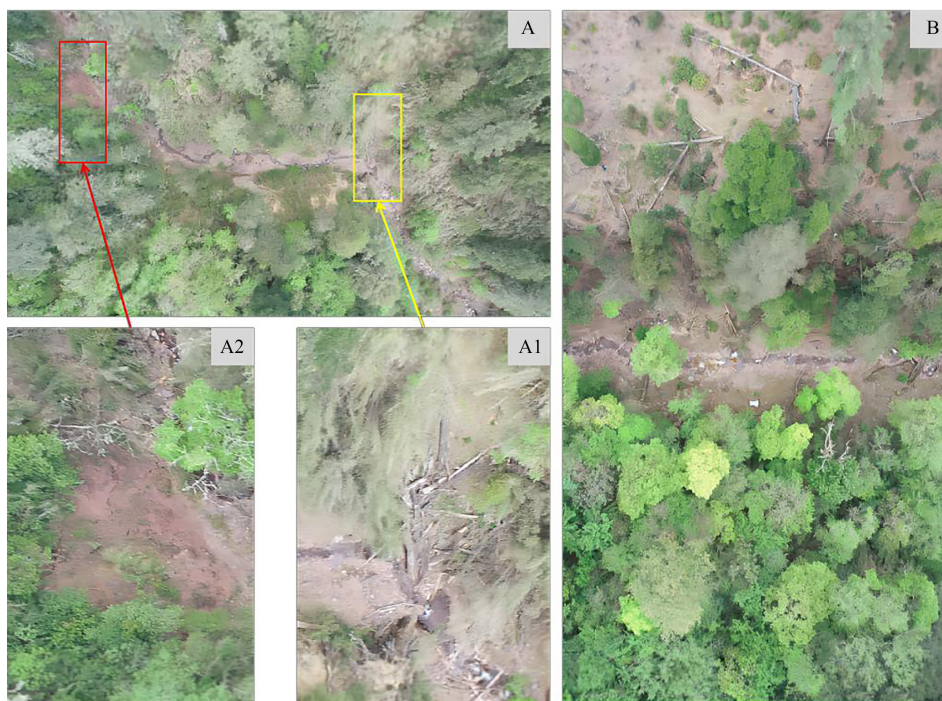


图8 研究区域的生境航拍图(样地—z3100 和样地—z2900)

Fig.8 Aerial map of habitat in study area (Sample plot in z3100 and Sample plot in z2900)

A: z3100 样地的航拍图, 植被类型为寒温性针阔混交林, 地表土层较为不稳定, 黄色区域为监测期前发生的泥石流区域 (A1), 红色区域为监测期间 (2019—2022 年) 的塌方区 (A2); B: z2900 样地的航拍图, 受砍伐和烧炭等人类干扰影响地表植被发生改变, 样地北坡为砍伐和放牧区 (上半部分)

植被层又没有很好的恢复, 加之持续的人为干扰而共同造成的结果。

拉沙山区域土壤生态系统的稳定性在异质性空间环境上无差异, 可能是区域内的植被类型、坡度及土质类型等自然因素相似, 更重要的是除了较强人为干扰的区域 (样地—z2900) 外的大部分区域都是滇金丝猴拉沙山种群的重要栖息地 (图 9), 而滇金丝猴对人类活动具有较强的规避行为^[49], 通过滇金丝猴种群活动的位点, 我们可以看出其明显地规避开了样地—z2900, 这也说明了样地—z2900 人为活动较为强烈, 也再次证实了利用土壤线虫成熟度指数对该区域的评价结果是合理的。此外, 结果显示样方的土壤线虫成熟度指数与红外相机拍摄记录的人类活动强度呈现显著负相关关系, 即人类活动越强样方的土壤线虫成熟度指数越低, 表明

样方的土壤生态系统稳定性越低,这也进一步说明了利用土壤线虫成熟度指数评价土壤生态系统稳定性的可行性。

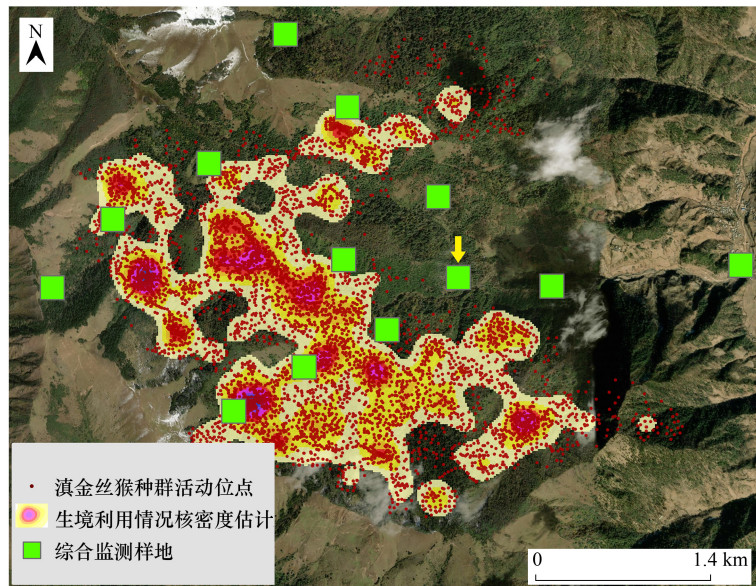


图9 拉沙山区域滇金丝猴种群位点和监测样地分布图

Fig.9 Population loci and monitoring plot of Yunnan snub-nosed monkey in Lasha Mountain area

↓表示样地—z2900,此海拔人类活动频繁较多,滇金丝猴规避了此区域

而拉沙山干流区域的土壤生态系统稳定性沿海拔梯度呈“V”型分布,本研究认为是由于样地—z3100和样地—z2900的土壤生态系统稳定性低而形成的。植被层与土壤生态系统关系密切,地表植被不好,尤其是草本层稀少会导致系统稳定性下降^[50-51],如样地—z2900。地表土层不稳定并常伴有复土现象及长期滑坡、泥石流等,土壤结构往往发育不完整,会导致土壤生态系统的稳定性失衡^[52],如样地—z3100,所以该区域土壤生态系统的稳定性较差。

5 结论

研究证实利用土壤线虫的成熟度指数评价区域的土壤生态系统稳定性是可行的,建议未来对土壤生态系统的稳定性评价中将土壤线虫成熟度指数纳入并作为评价指标之一。同时研究结果显示拉沙山区域土壤生态系统整体较为稳定,且在异质性空间上无差异,其稳定性在海拔梯度上呈现“V”型分布格局,主要是由样地—z3100和样地—z2900的稳定性较低造成的。

参考文献 (References):

- [1] Ponge J F. The soil as an ecosystem. *Biology and Fertility of Soils*, 2015, 51(6): 645-648.
- [2] Lal R, Smith P, Jungkunst H F, Mitsch W J, Lehmann J, Ramachandran Nair P K, McBratney A B, de Moraes Sá J C, Schneider J, Zinn Y L, Skorupa A L A, Zhang H L, Minasny B, Srinivasrao C, Ravindranath N H. The carbon sequestration potential of terrestrial ecosystems. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 73(6): 145A-152A.
- [3] Jian J S, Du X, Stewart R D. A database for global soil health assessment. *Scientific Data*, 2020, 7: 16.
- [4] Zhu Y G, Meharg A A. Protecting global soil resources for ecosystem services. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2015, 1(3): 1-4.
- [5] Morgado R G, Loureiro S, González-Alcaraz M N. Changes in soil ecosystem structure and functions due to soil contamination. *Soil Pollution*. Amsterdam: Elsevier, 2018: 59-87.
- [6] Bindraban P S, van der Velde M, Ye L M, van den Berg M, Materechera S, Kiba D I, Tamene L, Ragnarsdóttir K V, Jongschaap R, Hoogmoed M, Hoogmoed W, van Beek C, van Lynden G. Assessing the impact of soil degradation on food production. *Current Opinion in Environmental*

- Sustainability, 2012, 4(5): 478-488.
- [7] Ikeda M, Šiljak D D. Lotka-Volterra equations: decomposition, stability, and structure. *Journal of Mathematical Biology*, 1980, 9(1): 65-83.
- [8] Birgé H E, Bevans R A, Allen C R, Angeler D G, Baer S G, Wall D H. Adaptive management for soil ecosystem services. *Journal of Environmental Management*, 2016, 183: 371-378.
- [9] 李宜浓, 周晓梅, 张乃莉, 马克平. 陆地生态系统混合凋落物分解研究进展. *生态学报*, 2016, 36(16): 4977-4987.
- [10] 武海涛, 吕宪国, 杨青, 姜明. 土壤动物主要生态特征与生态功能研究进展. *土壤学报*, 2006, 43(2): 314-323.
- [11] 朱义族, 李雅颖, 韩继刚, 姚槐应. 水分条件变化对土壤微生物的影响及其响应机制研究进展. *应用生态学报*, 2019, 30(12): 4323-4332.
- [12] Davis A G, Huggins D R, Reganold J P. Linking soil health and ecological resilience to achieve agricultural sustainability. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2023, 21(3): 131-139.
- [13] 田迅, 杨允菲. 吉林省西部与内蒙古东部农牧交错区草地退化现状及管理对策. *生态学杂志*, 2009, 28(1): 152-157.
- [14] 古琛, 贾志清, 杜波波, 何凌仙子, 李清雪. 中国退化草地生态修复措施综述与展望. *生态环境学报*, 2022, 31(7): 1465-1475.
- [15] 张俊伶, 张江周, 申建波, 田静, 金可默, 张福锁. 土壤健康与农业绿色发展: 机遇与对策. *土壤学报*, 2020, 57(4): 783-796.
- [16] Kuzyakov Y, Gunina A, Zamanian K, Tian J, Luo Y, Xu X L, Yudina A, Aponte H, Alharbi H, Ovsepyan L, Kurganova I, Ge T D, Guillaume T. New approaches for evaluation of soil health, sensitivity and resistance to degradation. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2020, 7(3): 282-288.
- [17] Ritz K, Black H I J, Campbell C D, Harris J A, Wood C. Selecting biological indicators for monitoring soils: a framework for balancing scientific and technical opinion to assist policy development. *Ecological Indicators*, 2009, 9(6): 1212-1221.
- [18] Lehmann J, Bossio D A, Kögel-Knabner I, Rillig M C. The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1: 544-553.
- [19] Arias-Andres M, Rojas-Jimenez K, Grossart H P. Collateral effects of microplastic pollution on aquatic microorganisms: an ecological perspective. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2019, 112: 234-240.
- [20] Shao Y H, Zhang W X, Liu Z F, Sun Y X, Chen D M, Wu J P, Zhou L X, Xia H P, Neher D A, Fu S L. Responses of soil microbial and nematode communities to aluminum toxicity in vegetated oil-shale-waste lands. *Ecotoxicology*, 2012, 21(8): 2132-2142.
- [21] Lu C, Shi L, Zhao X C, Li W, Gustavel Q. Evaluation and planning of urban geological and ecological environment quality. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(2): 71.
- [22] Navarro J, Coll M, Louzao M, Palomera I, Delgado A, Forero M G. Comparison of ecosystem modelling and isotopic approach as ecological tools to investigate food webs in the NW Mediterranean Sea. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2011, 401(1/2): 97-104.
- [23] Donohue I, Petchey O L, Montoya J M, Jackson A L, McNally L, Viana M, Healy K, Lurgi M, O'Connor N E, Emmerson M C. On the dimensionality of ecological stability. *Ecology Letters*, 2013, 16(4): 421-429.
- [24] Donohue I, Hillebrand H, Montoya J M, Petchey O L, Pimm S L, Fowler M S, Healy K, Jackson A L, Lurgi M, McClean D, O'Connor N E, O'Gorman E J, Yang Q. Navigating the complexity of ecological stability. *Ecology Letters*, 2016, 19(9): 1172-1185.
- [25] Li X P, Liu T, Li H X, Geisen S, Hu F, Liu M Q. Management effects on soil nematode abundance differ among functional groups and land-use types at a global scale. *Journal of Animal Ecology*, 2022, 91(9): 1770-1780.
- [26] Bongers T, Bongers M. Functional diversity of nematodes. *Applied Soil Ecology*, 1998, 10(3): 239-251.
- [27] Bongers T. The maturity index: an ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition. *Oecologia*, 1990, 83(1): 14-19.
- [28] Lu Q F, Liu T T, Wang N Q, Dou Z C, Wang K G, Zuo Y M. A review of soil nematodes as biological indicators for the assessment of soil health. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2020, 7(3): 275.
- [29] 毛小芳, 李辉信, 龙梅, 胡锋. 不同食细菌线虫取食密度下线虫对细菌数量、活性及土壤氮素矿化的影响. *应用生态学报*, 2005, 16(6): 1112-1116.
- [30] 韩慧莹, 殷秀琴, 寇新昌. 长白山地低山区土壤动物群落特征及其对环境因子变化的响应. *生态学报*, 2017, 37(7): 2197-2205.
- [31] Ritz K, Trudgill D L. Utility of nematode community analysis as an integrated measure of the functional state of soils: perspectives and challenges. *Plant and Soil*, 1999, 212(1): 1-11.
- [32] 张微, 刘满强, 何园球, 樊剑波, 陈晏. 长期施用不同无机肥对旱地红壤线虫群落的影响. *应用生态学报*, 2014, 25(8): 2361-2368.
- [33] 张薇, 宋玉芳, 孙铁珩, 宋雪英, 周启星. 土壤线虫对环境污染的指示作用. *应用生态学报*, 2004, 15(10): 1973-1978.
- [34] Huang Z P, Cui L W, Scott M B, Wang S J, Xiao W. Seasonality of reproduction of wild black-and-white snub-nosed monkeys (*Rhinopithecus bieti*) at Mt. Lasha, Yunnan, China. *Primates; Journal of Primatology*, 2012, 53(3): 237-245.
- [35] 薛蓓, 侯磊, 薛会英. 基于高通量测序分析西藏北部高寒草甸不同深度土壤线虫群落分布特征. *生态学报*, 2019, 39(11): 4088-4095.

- [36] Ji B, Zhu L, Wang S L, Liu Y. Temperature-effect on the performance of non-aerated microalgal-bacterial granular sludge process in municipal wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*, 2021, 282: 111955.
- [37] 张晓珂, 梁文举, 李琪. 长白山森林土壤线虫: 形态分类与分布格局. 北京: 中国农业出版社, 2013.
- [38] 吴纪华. 中国淡水和土壤线虫的研究[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 1999.
- [39] Hartwich G. Tom Bongers; De Nematoden van Nederland. Een identificatietabel voor de in Nederland aangetroffen zoetwater-en bodembewonende nematoden.—408 pp., 854 mostly multipart figs. = *Natuurhistorische Bibliotheek*, Nr. 46. Utrecht: Koninklijke Nederlandse Natuurhistorische Vereniging, 1988: 1-408.
- [40] 马克平, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法 I α 多样性的测度方法(下). *生物多样性*, 1994, 2(4): 231-239.
- [41] Xing X Y, Lv J L, Zhang Y L, Qing R B, Yin D H, Chen L J, Yang X J, Ni F. Abundant denitrifying taxa rather than rare taxa responded more sensitively to temperature change in acidic paddy soils. *European Journal of Soil Biology*, 2023, 116: 103486.
- [42] 李琪, 梁文举, 姜勇. 农田土壤线虫多样性研究现状及展望. *生物多样性*, 2007, 15(2): 134-141.
- [43] Ren B P, Li M, Long Y C, Wu R D, Wei F W. Home range and seasonality of Yunnan snub-nosed monkeys. *Integrative Zoology*, 2009, 4(2): 162-171.
- [44] Chen A L, Xie X L, Ge T D, Hou H J, Wang W, Wei W X, Kuzyakov Y. Rapid decrease of soil carbon after abandonment of subtropical paddy fields. *Plant and Soil*, 2017, 415(1): 203-214.
- [45] Westerberg L O, Christiansson C. Highlands in East Africa: unstable slopes, unstable environments? *Ambio*, 1999, 28(5): 419-429.
- [46] 庞学勇, 包维楷, 张咏梅, 冷俐, 袁志忠. 岷江柏林下土壤物理性质及其地理空间差异. *应用与环境生物学报*, 2004, 10(5): 596-601.
- [47] 王瑶, 张利敏, 徐胜楠, 于鸿森, 刘月. 帽儿山 3 种森林生态系统土壤动物与土壤呼吸及其相互关系研究. *生态学报*, 2021, 41(1): 172-183.
- [48] 高雅, 陆兆华, 魏振宽, 付晓, 吴钢. 露天煤矿区生态风险受体分析——以内蒙古平庄西露天煤矿为例. *生态学报*, 2014, 34(11): 2844-2854.
- [49] Xia W C, Ren B P, Li Y H, Hu J, He X M, Krzton A, Li M, Li D Y. Behavioural responses of Yunnan snub-nosed monkeys (*Rhinopithecus bieti*) to tourists in a provisioned monkey group in baimaxueshan nature reserve. *Folia Primatologica; International Journal of Primatology*, 2016, 87(6): 349-360.
- [50] 王克林, 岳跃民, 陈洪松, 吴协保, 肖峻, 祁向坤, 张伟, 杜虎. 喀斯特石漠化综合治理及其区域恢复效应. *生态学报*, 2019, 39(20): 7432-7440.
- [51] 欧延升. 甘肃陇南山地不同植被恢复模式下土壤酶活性特征及其影响因素研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [52] 李新荣, 赵洋, 回嵘, 苏洁琼, 高艳红. 中国干旱区恢复生态学研究进展及趋势评述. *地理科学进展*, 2014, 33(11): 1435-1443.

附表 1 土壤线虫群落组成
Schedule 1 Composition of soil nematode community

科 Family	属 Genus	营养类群 Trophic group	优势度 Dominance	c-p 值 c-p value
食细菌线虫 Bacterial-feeders				
无咽科 Alaimidae	无咽属 <i>Alaimus</i>	Ba	++	4
索矛科 Desmodoridae	原索矛属 <i>Prodesmodora</i>	Ba	++	3
齿腔科 Odontolaimidae	齿腔属 <i>Odontolaimus</i>	Ba	++	3
棱咽科 Prismatolaimidae	棱咽属 <i>Prismatolaimus</i>	Ba	+++	3
素矛科 Cyatholaimidae	素矛属 <i>Achromadora</i>	Ba	++	3
筛咽科 Cyatholaimidae	筛咽属 <i>Ethmolaimus</i>	Ba	++	3
畸头科 Teratocephalidae	畸头属 <i>Teratocephalus</i>	Ba	+	3
畸头科 Teratocephalidae	磨头属 <i>Metateratocephalus</i>	Ba	+	3
绕线科 Plectidae	绕线属 <i>Plectus</i>	Ba	+	2
绕线科 Plectidae	角绕线属 <i>Ceratoplectus</i>	Ba	+	2
绕线科 Plectidae	威尔斯属 <i>Wilsonema</i>	Ba	+	2
哈利绕线科 Haliplectidae	哈利绕线属 <i>Haliplectus</i>	Ba	+	2
巴氏科 Bastianiidae	巴氏属 <i>Bastiania</i>	Ba	++	3
巴氏科 Bastianiidae	丁瑟亚属 <i>Dintheria</i>	Ba	+	3
斯氏科 Steinernematidae	斯氏属 <i>Steinernema</i>	Ba	+	3
头叶科 Cephalobidae	拟丽突属 <i>Acrobeloides</i>	Ba	+	2
头叶科 Cephalobidae	鹿角唇属 <i>Cervidellus</i>	Ba	+	2
杆咽科 Rhabdolaimidae	杆咽属 <i>Rhabdolaimus</i>	Ba	++	3
单子宫科 Monhysteridae	真单子宫属 <i>Eumonhystera</i>	Ba	+	2
污结咽科 Tylopharyngidae	污结咽属 <i>Tylopharynx</i>	Ba	+	1
细咽科 Aphanolaimidae	隐咽属 <i>Aphanolaimus</i>	Ba	+	3
食真菌线虫 Fungal-feeders				
细齿科 Leptonchidae	垫咽属 <i>Tylencholaimus</i>	Fu	+	4
细齿科 Leptonchidae	原细齿属 <i>Proleptonchus</i>	Fu	+	4
膜皮科 Diphtherophoridae	楹联属 <i>Tylolaimophorus</i>	Fu	+	3
膜皮科 Diphtherophoridae	膜皮属 <i>Diphtherophora</i>	Fu	++	3
腊肠科 Allantonematidae	霍华德属 <i>Howardula</i>	Fu	+	2
鄂针科 Belondiridae	鄂针属 <i>Belondira</i>	Fu	+	5
真滑刃科 Aphelenchidae	真滑刃属 <i>Aphelenchus</i>	Fu	+	2
粒科 Anguinidae	茎属 <i>Ditylenchus</i>	Fu	+	2
捕食-杂食线虫 Predators-omnivores				
矛线科 Dorylaimidae	中矛线属 <i>Mesodorylaimus</i>	OP	+	5
圣城科 Qudsianematidae	小矛线属 <i>Microdorylaimus</i>	OP	+	4
圣城科 Qudsianematidae	真矛线属 <i>Eudorylaimus</i>	OP	+	4
圣城科 Qudsianematidae	异矛线属 <i>Allodorylaimus</i>	OP	+	4
圣城科 Qudsianematidae	附矛线属 <i>Epidorylaimus</i>	OP	+	4
圣城科 Qudsianematidae	盘咽属 <i>Discolaimus</i>	OP	+	5
圣城科 Qudsianematidae	圣城属 <i>Qudsianematinae</i>	OP	+	4
圣城科 Qudsianematidae	通俗属 <i>Ecumenicus</i>	OP	+	5
单齿科 Monochida	锯齿属 <i>Prionchulus</i>	OP	++	4
单齿科 Monochida	单齿属 <i>Mononchus</i>	OP	+++	4
单齿科 Monochida	克拉克属 <i>Clarkus</i>	OP	+	4
单齿科 Monochida	库曼属 <i>Coomansus</i>	OP	+	4
单齿科 Monochida	锉齿属 <i>Mylonchulus</i>	OP	+	4

续表

科 Family	属 Genus	营养类群 Trophic group	优势度 Dominance	c-p 值 c-p value
三孔科 Tripylidae	三孔属 <i>Tripyla</i>	OP	+	3
三孔科 Tripylidae	三裂口属 <i>Trischistoma</i>	OP	+	3
孔咽科 Aporcelaimidae	小孔咽属 <i>Aporcelaimellus</i>	OP	++	5
孔咽科 Aporcelaimidae	扁腔属 <i>Sectonema</i>	OP	+	5
北线科 Nordiidae	犀牛属 <i>Rhyssocolpus</i>	OP	+	4
湿生科 Mydonomidae	拟矛线属 <i>Dorylaimoides</i>	OP	+	4
穿咽科 Nygolaimidae	水线属 <i>Aquatides</i>	OP	+	5
穿咽科 Nygolaimidae	副外阴属 <i>Paravulvus</i>	OP	+	5
角咽科 Actinolaimidae	拟角咽属 <i>Paractinolaimus</i>	OP	+	5
色矛科 Chromadoridae	色矛属 <i>Chromadorita</i>	OP	+	3
植物寄生线虫 Plant-parasites				
鄂针科 Belondiridae	牙咽属 <i>Dorylaimellus</i>	Pp	++	5
垫刃科 Tylenchidae	丝尾垫刃属 <i>Filenchus</i>	Pp	+	2
垫刃科 Tylenchidae	巴兹尔属 <i>Basiria</i>	Pp	+	2
垫刃科 Tylenchidae	新裸矛属 <i>Neopsilenchus</i>	Pp	+	2
垫刃科 Tylenchidae	细纹垫刃属 <i>Lelenchus</i>	Pp	+	2
垫刃科 Tylenchidae	伊朗垫刃属 <i>Iranitylenchus</i>	Pp	+	2
垫刃科 Tylenchidae	剑尾垫刃属 <i>Malenchus</i>	Pp	+	2
环科 Criconematidae	中环属 <i>Mesocriconema</i>	Pp	+	3
环科 Criconematidae	轮属 <i>Criconemoides</i>	Pp	+	3
环科 Criconematidae	环属 <i>Criconema</i>	Pp	+	3
环科 Criconematidae	交叉属 <i>Crossonema</i>	Pp	+	3
剑科 Xiphinematidae	剑属 <i>Xiphinema</i>	Pp	+	5
纽带科 Hoplolaimidae	螺旋属 <i>Helicotylenchus</i>	Pp	+	3
短体科 Pratylenchidae	短体属 <i>Pratylenchus</i>	Pp	+	3
毛刺科 Trichodoridae	毛刺属 <i>Trichodorus</i>	Pp	+	4

+++ 优势属,个体序列数占总序列数的 10%以上;++ 常见属,个体序列数占总序列数的 1%—10%;+ 稀有属,个体序列数占总序列数的 1%以下;Ba 食细菌线虫;Fu 食真菌线虫;OP 捕食-杂食线虫;Pp 植物寄生线虫