

乌兰布和绿洲区土壤生物学质量及其综合评价

包耀贤,肖晶晶,刘晓威,孙艳芳

(北京北华中清环境工程技术有限公司,北京 100176)

摘要:针对乌兰布和绿洲区 10 类林地和 6 类农地 0~20 cm 土层,分析了土壤微生物数量和酶活性特征,利用因子分析法并对土壤生物学质量进行综合定量评价。结果表明,地类间生物学指标变异系数大(3 种微生物数量 123%~173%、7 种酶活性 42%~73%)。相比荒漠对照,土壤细菌和放线菌平均数量分别高出 13.0 倍和 3.2 倍,正效应明显,真菌数量灌木林地平均高出 2.7 倍,乔木地和农地高出 0.8 倍(呈负效应)。土壤酶活性高出荒漠对照分别为蔗糖酶 4.2 倍、脲酶 2.0 倍、过氧化氢酶 2.0 倍、碱性磷酸酶 2.2 倍、纤维素酶 2.2 倍、多酚氧化酶 1.3 倍、蛋白酶 0.8 倍(呈负效应)。筛选出的 11 个评价指标(有机质、阳离子交换量、真菌、放线菌、蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶、多酚氧化酶、蛋白酶和物理性黏粒)对 SBQI(soil biological quality index)贡献达 82%,评价结果科学可靠($R^2=0.875$);各地类 SBQI 平均高出对照 1.5~2.7 倍,97.7%的 SBQI<0.5 (SBQI ≤ 1),绿洲体系形成 30 多 a 来,区域土壤生物质量普遍得以改善,但整体很低;SBQI 均值由大到小为:农地(0.31)、乔木地(0.28)、灌木地(0.27);沙枣(0.38)、苜蓿(0.35)、籽瓜(0.34)=番茄(0.34)=小美早杨(0.34)、沙棘(0.33)、二白杨(0.30)=玉米(0.30)、油葵(0.27)、花葵(0.25)=柽柳(0.25)=沙木蓼(0.25)、花棒(0.24)=柠条(0.24)、霸王(0.23)、新疆杨(0.21)、对照(0.14)。建议根据研究区实际,有灌溉条件时,应密植杨树类乔木;无灌溉条件时,优推沙枣、沙棘等固氮灌木;农地多种苜蓿等豆科牧草和低矮经济作物。

关键词:乌兰布和绿洲区;土地利用;土壤微生物;土壤酶;土壤生物质量评价

中图分类号:S714.3

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2022)01-0183-08

Soil Biological Quality and Their Integrated Assessment in Ulanbuh Oasis Areas

BAO Yao-xian, XIAO Jing-jing, LIU Xiao-wei, SUN Yan-fang

(Beijing BHZQ Environmental Engineering Technology Co., Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract: This study analyzed the characteristics on soil microbial quantity and soil enzyme activities in 0—20 cm soil layers of 10 types of forestland and 6 types of farmland occurring in Ulanbuh oasis area. An integrated quantitative assessment was carried out on the soil biological quality by factor analysis method. The results showed that the variation coefficients of microbial quantity (3 kinds) and enzyme activity (7 kinds) were 123%—173% and 42%—73%, respectively. The average quantities of bacteria and actinomycetes were 13.0 and 3.2 times more than the control, exhibiting significant positive effects on the improvement of soil quality. The average fungus quantities of shrub lands were 2.7 times more than the control, and that of arbor lands and farmlands was 0.8 times (negative effect). The soil enzyme activities of sucrose, urease, catalase, alkaline phosphatase, cellulase, polyphenol oxidase were 4.2, 2.0, 2.0, 2.2, 2.2 and 1.3 times higher than those of the control (these showed positive effects), respectively, the soil protease activity was 0.8 times higher than the control (negative effect). Eleven indicators of organic matter, cationic exchange capacity, fungus, actinomyces, sucrase, urease, catalase, alkaline phosphatase, polyphenol oxidase, protease

收稿日期:2021-03-09 修回日期:2021-05-05

基金项目:科研院所基本科研业务费专项资金(CAFYBB2008027)。

第一作者:包耀贤,博士后,副研究员。研究方向:土壤修复和土壤质量评价。E-mail:byx1822@126.com

and physical clay were screened out and their contributions achieved 82% to soil biological quality index (SBQIs), the evaluation results of SBQIs were scientific and reliable ($R^2=0.875$). SBQIs of all forestlands and farmlands were 1.5–2.7 times higher than those of the control samples on average, the proportion of SBQIs < 0.5 (SBQIs ≤ 1) was 97.7% indicating that the overall soil biological quality was improved through oasis systems built in study area over 30 years, but SBQIs were very low wholly. The mean of SBQIs was farmlands (0.31), arbor lands (0.28), shrub lands (0.27), *Elaeagnus angustifolia* (0.38), alfalfa (0.35), seed melon (0.34) = tomatoes (0.34), *Populus simonii* \times (*P. pyramidalis* + *Salix matsudana*) cv. *poplaris* (0.34), seabuckthorn (0.33), *P. gansuensis* (0.30) = maize (0.30), oil sunflower (0.27), sunflower (0.25) = *Tamarix chinensis* (0.25), *Atraphaxis mandshurica* (0.25), *Hedysarum scoparium* (0.24) = *Caragana korshinskii* (0.24), *Zygophyllum xanthoxylum* (0.23) = *P. alba* var. *pyramidalis* (0.21), control (0.14). It was suggested that arbor species, such as poplar trees could be planted densely in the areas with favorable irrigation conditions, while for those areas without irrigation conditions, nitrogen fixation shrubs were recommended, such as *Hippophae rhamnoides* and *Elaeagnus angustifolia*, in crop land, leguminous forage grass such as alfalfa and low cash crops should be cultivated.

Key words: Ulanbuh oasis area; land utilization; soil microbe; soil enzyme; integrated assessment of soil biological quality

土壤微生物对驱动和维系陆地生态系统可持续发展起着至关重要的作用,微生物数量可敏感地反映土壤质量变化^[1],土壤酶是促进土壤养分循环的重要物质^[2]。土壤微生物和酶活性关系复杂但相辅相成,共同降解和转化土壤各类物质,均能敏感反映生态系统的变化和土壤演变趋势^[2-5],一定程度上微生物和酶活性可作为沙漠化演变过程中土壤质量特征变化的重要辅助评价指标^[4]。有关单一利用方式下土壤微生物和酶活性的研究颇多^[4-8],但集土壤微生物和酶活性综合对土壤质量的影响评价研究鲜见报道。土壤质量包括土壤物理质量、化学质量和生物质量^[9],而土壤生物质量能够敏感反映土壤质量的微小变化^[6,10]。乌兰布和绿洲区因黄河灌溉便利并历经 30 多年建设,已形成乔灌农结合、灌溉配套、防护林网密集的人工绿洲 6 000 hm² 之多,生境本来脆弱、敏感的绿洲区建成以来不同利用类型土地的生物学指标状况怎样,综合土壤生物质量改善程度如何都不得而知。为此,本研究基于绿洲区不同利用方式下各类林地和农地的土壤生物和酶活性指标特征,进行土壤生物质量综合定量评价,以供绿洲后续营林和农耕参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区设在内蒙古磴口县乌兰布和沙漠东北缘中国林科院沙林中心第二、三、四实验场(106°09′–107°10′E, 40°09′–40°55′N),属温带荒漠气候。年均温 7.8℃,大于等于 10℃有效积温 3 290℃;年降水量 150 mm,蒸发量 2 381 mm;盛行西南风,年

均风速 4.1 m·s⁻¹,风沙灾害是主要自然灾害;土壤以风沙土和地带性灰漠土为主,pH 均值 9.08,有机质(g·kg⁻¹)平均农地 4.14、乔木地 4.07、灌木地 2.73。天然植被以白刺(*Nitraria tangutorum*)、沙竹(*Psammochloa mongolica*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)等居多,因黄灌便利,历经 30 多 a 已在原固定、半固定沙丘形成人工绿洲 3 333 hm²,绿洲内垦耕地 533 hm²,主要人造林为小美旱杨(*Populus simonii* \times (*P. pyramidalis* + *Salix matsudana*) cv. *poplaris*)、新疆杨(*P. alba* var. *pyramidalis* Bunge.)、二白杨(*P. gansuensis*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)、怪柳(*Tamarix chinensis*)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)、霸王(*Zygophyllum xanthoxylum*)、沙木蓼(*Atraphaxis mandshurica*)等;农地主要种植玉米(*Zea mays*)、籽瓜(*Citrullus lanatus*)、油葵和花葵(*Helianthus annuus*)、番茄(*Lycopersicon esculentum*)、苜蓿(*Medicago sativa*)等。

农地多年轮作平均施肥量(kg·hm⁻²):油葵与花葵(二铵 300+尿素 563+碳铵 1 125),番茄(二铵 375+尿素 563+碳铵 1 125),籽瓜(二铵 375+尿素 563+碳铵 1 500),玉米(二铵 375+尿素 750+碳铵 2 250);底肥为二铵和尿素,追肥为尿素和碳铵,苜蓿地不施肥;农地垦种 13~38 a。

1.2 研究方法

样地设置:2018 年 11 月,选取 10 类林地(表 1)和 6 类农地采集 0~20 cm 土样(表 2),林地和荒漠对照按“X”型在区域设置 5 m×5 m 样方采样;农地

不设样方,但按“X”型取样。

土壤采集:为了代表性和广谱性,每个样方内选择 2 个采样点分别采集 0~20 cm 土样并在现场混匀取 500 g 作为 1 个测试土样,每类林地和农地至少采集 5 个混合样(X 型),取荒漠景观 4 个混合样

为对照,共采集混合土样 172 个(林地 96+农地 72+对照 4);留少许(约 100 g)鲜样去杂后放 4℃冰箱供测土壤微生物数量,其他土样处理后供测其他指标。同时,随机选取 20 株样株测定相关指标并计算均值(表 1)。

表 1 人工林概况
Table 1 Basic information of the plantations

样株指标	新疆杨	二白杨	小美早杨	霸王	沙棘	柠条	沙枣	花棒	怪柳	沙木蓼
林龄/a	14~20	30~36	14	17~27	14~20	17~27	9~21	17~27	17~27	17~27
株行距/m	3.0×3.0	2.5×2.5	2.5×2.5	1.0×1.0	1.5×1.5	0.3×0.3	2.0×2.0	0.3×0.3	1.0×1.0	1.0×1.0
植被盖度/%	60~85	80~90	70~85	85~90	60~80	85~95	50~60	80~90	80~90	70~85
高度/m	13.6	15.2	9.36	2.6	4.5	3.5	4.9	3.6	4.4	2.6
胸径(DBH)或地径(GD)/cm	DBH14.7	DBH27.1	DBH11.3	GD4.8	GD6.7	GD3.8	GD8.8	GD6.6	GD4.7	GD3.2
平均冠幅/cm	—	—	—	126.5	206.5	212.5	208	282.5	291	266

注:新疆杨为 3 行稀林带,二白杨和小美早杨为多行密林带;林地利用年限和林龄一致(无平茬复壮更新)。

指标测定^[2,11-12]:机械组成-自动激光粒度仪分析法;有机质-重铬酸钾容量法;阳离子交换量(CEC)—NH₄Cl—NH₄Ac 交换法;细菌-牛肉膏蛋白胨培养基稀释平板法;放线菌-高氏 1 号培养基稀释平板法;真菌-马铃薯 PDA 培养基稀释平板法;过氧化氢酶-KMnO₄ 滴定法(24 h 0.1 mol·L⁻¹ KMnO₄ mL·g⁻¹);蛋白酶-茚三酮比色法(24 h NH₂-N mg·g⁻¹);碱性磷酸酶-磷酸苯二钠比色法(2 h P₂O₅ mg·g⁻¹);脲酶-靛酚比色法(24 h NH₃-N mg·g⁻¹);蔗糖酶-Na₂S₂O₃ 滴定法(24 h 0.1 mol·L⁻¹ Na₂S₂O₃ mL·g⁻¹);多酚氧化酶-碘量滴定法(0.01 mol·L⁻¹ I₂ mL·g⁻¹);纤维素酶-硝基水杨酸比色法(72 h 葡萄糖 mg·10 g⁻¹)。

数据计算:具有模糊性和连续性的隶属函数被广泛用于各评价指标原始数据的标准化处理,即隶属度计算,由此将量纲不同、取值各异的实测值转化为 0~1 无量纲值,隶属度计算借鉴并结合研究区实际^[7,9,13]:

物理性黏粒用降型隶属函数:

$$F(X)=0.9\times(X_{\max}-X)/(X_{\max}-X_{\min})+0.1(1)$$

其他指标用 S 型简化隶属函数:

$$S(X)=X/X_0(X<X_0)\text{或}S(X)=1(X\geq X_0)(2)$$

式中:X、X_{min}、X_{max}、X₀ 分别为评价指标实测值、最小值、最大值、上临界值(并非最大值)。同时,使用 Excel 2007 和统计软件 DPS7.55 进行数据计算、分析、多重差异性比较和制图。

2 结果与分析

2.1 不同地类土壤微生物数量特征

土壤微生物数量敏感反映土壤变化。由表 2 可见,微生物数量细菌(10⁷)最多,其次为放线菌

(10⁵),最后为真菌(10³),数量差异大,也体现了细菌和放线菌更适宜碱性环境而真菌更适宜微酸性环境^[3]。地类间 3 种菌平均变异系数表明植被种类、凋落物、施肥、水分等均明显影响微生物群落结构和数量^[8-14]。相比对照,细菌和放线菌数分别高出 1.7~25.2 倍和 1.4~10.1 倍(霸王和柠条除外),二者数量整体乔木地近于农地、略高于灌木地,与有机质质量分数乔木地(4.07 g·kg⁻¹)、农地(4.14 g·kg⁻¹)和灌木(2.73 g·kg⁻¹)趋势一致,也与表 3 中有机质和细菌、放线菌呈显著或极显著正相关一致。研究区乔木回归给土壤微生物更多的碳源和能源凋落物,加之土壤孔隙度增加,为微生物提供了更好的生存条件,农地外源养分补给促进微生物滋生。灌木中,沙木蓼地的细菌和放线菌数量明显较高,这可能与其根系发达并能长出许多不定根而形成稠密根系网有关,根系分泌物增多能够为微生物提供丰富营养源,促进微生物活性增强、数量增多^[14];沙棘林地细菌和放线菌数量在苜蓿、沙枣、沙棘、花棒、柠条 5 种固氮植物中明显较高。

与细菌和放线菌不同,真菌数量灌木地较对照高,乔木地和农地整体却略低于对照,表现出土壤愈贫瘠真菌数愈多趋势,表 3 中真菌和有机质呈负相关也说明此。整体看,在沙区生境造林和耕作对提高土壤细菌和放线菌数量正效应明显,对灌木林地三大菌的正效应更明显。

2.2 不同地类土壤酶活性特征

土壤酶来自微生物、植物或动物的活体或残体,既是生物体又是生物过程的产物,直接参与土壤物质迁移转化与养分的固定释放^[4,15]。由表 2 可见,7 种酶活性的整体变异系数较大(42%~73%),地类间除了蛋白酶和纤维素酶表现为 2 级(a、b)显著差

异性,其他酶均表现为3级(a、b、c);所有地类蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶显著高于对照,说明这4种酶对土地利用方式等环境变化最敏感;纤维素酶和绝大多数多酚氧化酶活性高于对照但差异不显著。说明造林和农耕活动不同程度提高了土壤酶活性,即土壤熟化程度和肥力有所提升。

整体看,除了蛋白酶的其他6种酶活性固氮植物显著高于非固氮植物,计算可知,酶活性苜蓿、沙枣、沙棘、柠条、花棒5种固氮植物(均值)高于柽柳、霸王、沙木蓼3种非固氮植物(均值),依次为蔗糖酶2.2倍、脲酶1.7倍、过氧化氢酶1.4倍、碱性磷酸酶1.9倍、多酚氧化酶1.2倍、纤维素酶1.7倍。作为土壤酶重要来源的根瘤菌可释放较多酶,留给土

壤更多富氮有机残体,促进生物活性和有机氮转化^[16],蔗糖酶也主要来自植物根系分泌物,说明固氮植物是很好的养地植物,其土壤熟化程度和肥力水平高于非固氮灌木林地。研究区绝大多数地类蛋白酶活性低于对照且与对照差异不显著,说明造林和农作活动抑制了蛋白酶水解为氮素的酶促反应,表3中蛋白酶与有机质、其他酶呈负相关也说明此。

多酚氧化酶反映土壤腐殖质状况和有机质积累程度,纤维素酶与凋落物、秸秆等的腐解关系密切。研究区各地类间2种酶活性低且差异小,说明多酚氧化酶酶促酚类氧化为醌类形成土壤腐殖质的过程有限且缓慢,研究区土壤有机质极度缺乏足以体现,返土凋落物少限制了纤维素酶的腐解酶促反应。

表2 0~20 cm 土层生物指标统计特征

Table 2 Statistical characteristics on soil biological indicators in 0—20 cm soil depth

地类	细菌 /($\times 10^7$ 个 · g ⁻¹)	放线菌 /($\times 10^5$ 个 · g ⁻¹)	真菌 /($\times 10^3$ 个 · g ⁻¹)	蔗糖酶 /(mL · g ⁻¹)	脲酶 /(mg · g ⁻¹)	过氧化氢酶 /(mL · g ⁻¹)	碱性磷酸酶 /(mg · g ⁻¹)	多酚氧化酶 /(mL · g ⁻¹)	蛋白酶 /(mg · g ⁻¹)	纤维素酶 /(mg · g ⁻¹)
新疆杨	8.12	2.08	3.74	0.80 c	9.33 c	0.98 bc	0.08 c	0.07 ab	0.43 ab	0.08 b
二白杨	15.50	12.03	4.12	2.12 abc	16.32 ab	1.85 abc	0.13 abc	0.11 a	0.27 b	0.09 b
小美旱杨	15.37	6.89	6.66	1.10 bc	20.90 a	1.88 ab	0.13 abc	0.08 ab	0.69 a	0.19 ab
柽柳	3.06	4.29	15.64	1.48 abc	9.31 c	1.06 bc	0.13 abc	0.07 ab	0.42 ab	0.09 b
霸王	1.60	1.11	43.91	0.58 c	8.54 c	0.85 c	0.09 c	0.04 c	0.54 ab	0.07 b
柠条	9.18	0.87	14.63	0.79 c	10.48 c	1.14 bc	0.09 c	0.07 ab	0.36 b	0.15 ab
沙木蓼	29.22	2.21	10.55	0.26 c	8.12 c	1.37 abc	0.05 c	0.08 ab	0.47 ab	0.09 b
花棒	7.57	1.86	25.13	0.74 c	9.76 c	0.75 c	0.11 bc	0.05 c	0.58 ab	0.16 ab
沙棘	21.29	4.46	9.88	1.83 abc	15.59 abc	1.36 bc	0.21 ab	0.07 ab	0.36 b	0.19 ab
沙枣	4.26	1.68	8.08	2.69 a	15.95 abc	2.20 a	0.24 a	0.09 ab	0.55 ab	0.09 b
苜蓿	7.66	2.43	9.07	2.35 ab	20.34 a	1.95 ab	0.21 a	0.09 ab	0.40 ab	0.13 ab
花葵	10.14	4.18	3.02	0.70 c	12.82 bc	1.39 abc	0.09 c	0.08 ab	0.44 ab	0.14 ab
油葵	7.50	2.98	4.23	1.31 bc	15.05 bc	1.52 abc	0.11 bc	0.09 ab	0.36 b	0.14 ab
番茄	5.22	5.18	1.96	1.96 abc	19.90 ab	2.07 a	0.11 bc	0.09 ab	0.35 b	0.23 a
玉米	23.17	3.55	2.97	1.34 bc	18.41 ab	1.72 abc	0.13 abc	0.09 ab	0.37 b	0.11 b
籽瓜	22.82	4.49	11.74	1.56 abc	18.12 ab	1.65 abc	0.13 abc	0.09 ab	0.44 ab	0.15 ab
对照	0.92	1.19	6.71	0.32 c	7.14 c	0.75 c	0.06 c	0.06ab	0.57ab	0.06 b
变异系数/%	173	123	175	64	46	42	68	46	61	73

注:同列不同字母表示地类之间0.05水平显著差异。

2.3 土壤生物学指标与主要理化性质的相关性

土壤酶主要来自微生物,酶促反应揭示微生物活性,土壤酶活性密切反映土壤养分和理化特性。表3显示:有机质与蛋白酶呈极显著负相关,与真菌和纤维素酶相关性差,与其他指标均呈显著或极显著正相关,有机质是土壤微生物和酶的能源和营养,促进酶代谢和转化,是土壤肥力的核心;CEC起着贮存和释放速效养分两方面作用,与有机质一样体现土壤肥力状况,表现出与有机质相似的相关性。

细菌和放线菌呈极显著正相关,真菌与二者相关性差甚至呈负相关;三大微生物与部分酶活性呈显著相关,但整体相关性差。各种酶活性间,纤维素酶、蛋白酶与其他酶之间整体呈弱相关性,尤其是蛋白酶对

其他酶表现出一定的负相关拮抗效应;其他5种酶之间协同效应较好,大多呈显著或极显著正相关。物理性粘粒与其他指标表现出相对较好的相关性,黏粒多代表有机质含量和土壤水分高,利于生化反应。

2.4 不同地类土壤生物质量综合评价

衡量区域整体土壤生物质量并非单一指标所能体现,而应通过多个生物评价指标综合呈现。为此,引入土壤生物质量指数(soil biological quality index,SBQI)综合定量评价研究区土壤生物质量。

2.4.1 评价指标筛选、权重确定和隶属度计算 利用DPS软件对表3中13个指标原始数据进行因子分析以筛选评价指标,按贡献率大于80%和载荷矩阵值大(表4下划线数值)为原则筛选被保留6个主

表 3 土壤生物和主要理化指标相关矩阵($n=172$)

Table 3 Correlation matrix on soil biological, key physical and chemical indicators ($n=172$)

相关值	有机质	CEC	细菌	真菌	放线菌	蔗糖酶	脲酶	过氧化氢酶	碱性磷酸酶	多酚氧化酶	蛋白酶	纤维素酶
CEC	0.596**											
细菌	0.160*	0.048										
真菌	-0.141	-0.195*	0.103									
放线菌	0.394**	0.215**	0.307**	-0.027								
蔗糖酶	0.575**	0.355**	0.038	-0.060	0.255**							
脲酶	0.460**	0.272**	0.199**	-0.126	0.147	0.535**						
过氧化氢酶	0.682**	0.560**	0.153*	-0.175*	0.244**	0.503**	0.488**					
碱性磷酸酶	0.333**	0.145	-0.029	-0.006	0.100	0.525**	0.402**	0.352**				
多酚氧化酶	0.567**	0.440**	0.084	-0.123	0.179*	0.227**	0.300**	0.551**	0.206**			
蛋白酶	-0.307**	-0.228**	-0.056	0.130	-0.117	-0.206**	-0.036	-0.218**	-0.004	-0.196**		
纤维素酶	0.008	0.121	0.137	-0.028	-0.015	0.080	0.031	-0.004	-0.056	-0.032	-0.182*	
物理性粘粒	0.408**	0.518**	0.131	-0.233**	0.189*	0.192*	0.225**	0.397**	-0.014	0.344**	-0.189*	0.076

注: * 是显著相关($R_{0.05}=0.150$); ** 是极显著相关($R_{0.01}=0.196$); CEC: 阳离子交换量。

成分和除细菌、纤维素酶外的 11 个评价指标(表 4 下划线指标)。

权重是各因子的重要程度。利用上述因子分析得 13 个指标共同度, 各指标共同度与共同度总和为该指标权重(0~1 数值), 同样对筛选出的 11 个指标原始数据再次进行因子分析得相应指标权重(表 4)。

2.4.2 评价模型和综合评价 加权综合法指数评价模型同时考虑了评价指标值、权重、评价指标间的交互作用和最小因子限制率(连乘运算 II)对综合评价的共同影响, 较符合实际^[7,9,13]。土壤生物质量指数(SBQI, 公式中用 S_{BQI} 表示)模型如下:

$$S_{BQI} = \prod_{i=1}^n C_i^{K_i} \quad (3)$$

式中: C_i 和 K_i 为各评价指标对应的隶属度和权重; n 为评价指标个数。

根据评价模型、隶属度和权重计算出所有样地 SBQI 值。从表 4 可知, 因子分析法所筛选 11 个评价指标能很好解释 SBQI 82% 的变异量和影响程度, 代表性高, 而其他 18% 的影响因素较小。

从图 1 数据检验看出, 11 个筛选指标的 $SBQI_{11}$ 值和所有 13 个评价指标的 $SBQI_{13}$ 值呈极显著线性正相关($R^2 \leq 1$), 说明用筛选指标综合评价研究区土壤生物质量具有高度代表性、可靠性和检验性。

因隶属度和权重均为 0~1 数值, 故计算 SBQI 值也在 0~1 范围内。从图 2 中 172 个样点频率累积曲线和计算可知, SBQI 值在 0.1~0.6, 高达 97.7% 的 $SBQI < 0.5$ (中间值), SBQI 整体很低, 说明在沙区干旱和土壤贫瘠条件下, 提高土壤微生物数量和土壤酶活性过程极其漫长。

从图 3 按统计均值可知, 各地类 SBQI 有不同程度的差异性, 沙枣 SBQI 最大, 且显著高出对照

2.7 倍, 新疆杨 SBQI 最小, 高出对照 1.5 倍, 但差异不显著; SBQI 均值由大到小为: 农地(0.31)、乔木地(0.28)、灌木地(0.27); 各地类 SBQI 均值在 0.14~0.38, 整体很低($SBQI \leq 1$)。说明造林和农耕活动普遍正向改善区域土壤生物质量, 但整体水平低, 需改善, 也揭示出研究区综合土壤生物质量影响因子的差异性和复杂性。

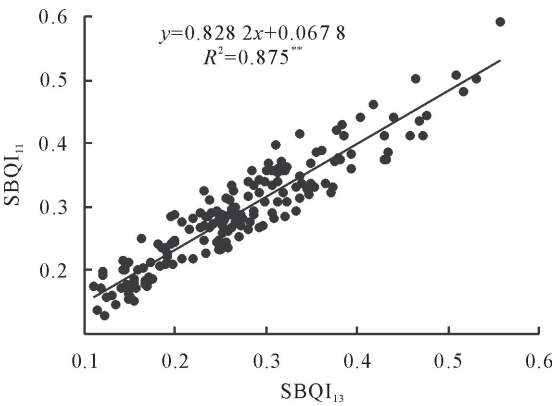


图 1 所有指标与筛选指标 SBQI 相关性

Fig. 1 Correlation on SBQI of all and screened indicator

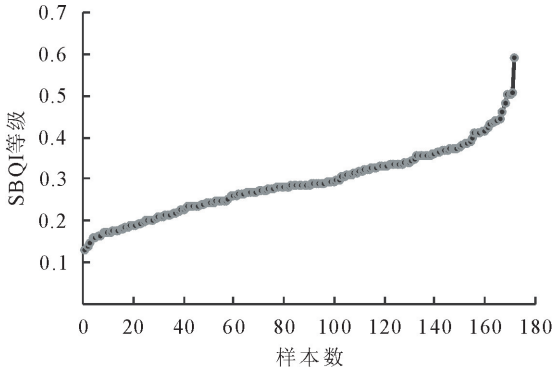


图 2 SBQI 频率分布

Fig. 2 Frequency distribution curve on SBQI

表 4 主成分因子载荷、权重及贡献率

Table 4 Loading, weight and contribution rate of principal component factors

指标	PCF 1	PCF 2	PCF 3	PCF 4	PCF 5	PCF 6	共同度	权重
有机质	0.677	0.465	-0.161	-0.132	-0.022	-0.363	0.853	0.096
阳离子交换量	0.875	0.165	-0.012	-0.099	-0.150	-0.058	0.794	0.090
细菌	0.013	-0.093	0.593	0.091	0.009	-0.560	—	—
真菌	-0.114	-0.002	0.068	0.089	0.954	0.006	0.938	0.106
放线菌	0.320	0.187	-0.004	-0.084	-0.019	-0.843	0.445	0.050
蔗糖酶	0.268	0.836	-0.033	-0.156	-0.022	-0.157	0.812	0.092
脲酶	0.294	0.473	0.882	0.454	-0.323	-0.129	0.975	0.110
过氧化氢酶	0.752	0.403	-0.012	0.115	-0.090	-0.196	0.790	0.089
碱性磷酸酶	0.019	0.861	0.017	0.017	0.050	0.012	0.818	0.092
多酚氧化酶	0.819	-0.031	-0.043	-0.081	0.089	-0.145	0.702	0.079
蛋白酶	-0.170	-0.073	-0.152	0.897	0.125	0.075	0.934	0.106
纤维素酶	-0.005	0.073	0.190	-0.172	0.056	0.111	—	—
物理性黏粒	0.887	0.060	0.143	-0.039	-0.145	-0.041	0.785	0.089
特征值	4.796	1.539	1.476	1.058	0.998	0.796	$\Sigma 8.844$	$\Sigma 1.000$
累计贡献/%	36.9	48.7	60.1	68.2	75.9	82.0		

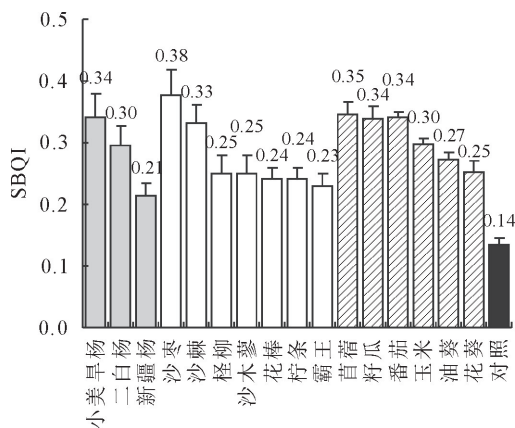


图 3 各地类 SBQI 分布

Fig. 3 Distribution on SBQI in different lands

乔木林地 SBQI: 小美早杨和二白杨明显高于新疆杨, 这与新疆杨林带窄、密度小、凋落物少、土壤熟化程度差于前二者有关。灌木林地 SBQI: 沙枣、沙棘显著高于其他 5 种灌木, 而后 5 种小灌木间无显著差异。固氮根瘤菌促进更多酶促反应而整体改善土壤生物学质量, 特别是大灌木固氮植物沙枣和沙棘, 而小灌木固氮植物花棒、柠条不明显。

农地 SBQI: 苜蓿、籽瓜、番茄低耗氧作物高于玉米、油葵、花葵高耗氧作物, 尤其显著高于花葵 (株高大于 2 m)。豆科苜蓿在固氮、多年不翻耕扰动且不施肥情况下, SBQI 仍高于常年施肥其他农地, 说明种植固氮牧草、休耕等措施有利于改善土壤生物学质量, 最终整体提高土壤质量。

3 结论与讨论

3.1 结论

乌兰布和沙区绿洲体系形成 30 多年来, 土地利

用方式和生境条件等显著影响土壤微生物数量及其结构、酶活性, 进而影响区域整体土壤生物质量。

相比对照, 乔木林地、农地的细菌和放线菌数量明显增加, 而真菌数量反呈降势; 灌木林地 3 种菌均呈明显增势; 相比对照, 蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶活性增加显著, 纤维素酶和多酚氧化酶次之, 蛋白酶活性却呈降势。

11 个评价指标对 SBQI 贡献达 82%, 评价结果科学可靠; SBQI 平均高出对照 1.5~2.7 倍, 区域土壤生物质量整体得以改善, 但 97.7% 的样点 SBQI < 0.5, 整体很低; 从大地类看 SBQI 均值由大到小为: 农地 (0.31)、乔木地 (0.28)、灌木地 (0.27); 细类 SBQI 由大到小排序为: 沙枣 (0.38)、苜蓿 (0.35)、籽瓜 (0.34) = 番茄 (0.34) = 小美早杨 (0.34)、沙棘 (0.33)、二白杨 (0.30) = 玉米 (0.30)、油葵 (0.27)、花葵 (0.25) = 怪柳 (0.25) = 沙木蓼 (0.25)、花棒 (0.24) = 柠条 (0.24)、霸王 (0.23)、新疆杨 (0.21)、对照 (0.14)。

建议根据研究区实际种植“养地”“加酶”植物有灌溉条件时密植二白杨、小美早杨等乔木; 无灌溉条件时优推沙枣、沙棘等固氮灌木; 农地选种苜蓿等豆科牧草和低矮经济作物。

3.2 讨论

3.2.1 土壤微生物对外界因素的响应 微生物敏感反映土壤变化。本研究地 (pH9.08) 微生物数量级表现为: 细菌 (10^7) 最多, 其次为放线菌 (10^5), 最后为真菌 (10^3), 细菌数量平均占三者总数的 99.7% 以上, 是绝对优势菌群; 有学者研究退化高寒湿地 (pH8.54) 微生物数量级表现为: 细菌 (10^6) 和放线菌 (10^6) 一样, 其次为真菌 (10^4)^[3], 碳氮比对土

壤生物学特征具有微弱抑制作用; J. Rousk *et al*^[17] 研究表明酸性土壤中微生物群落通常以真菌为主。这些说明在碱性环境下, 细菌和放线菌数量居多, 而真菌最少, 随碱性降低, 细菌数量降低, 而放线菌和真菌数量增加。杨宁等^[18]、邓娇娇等^[19] 研究证明植被类型显著影响土壤微生物多样性, 且证实杨树显著降低 C/N 比; 施肥影响土壤微生物结构及功能类群^[16], 但土壤微生物对施肥响应有的敏感、有的不敏感^[19]; 本研究发现沙木蓼等密根植物及苜蓿、沙枣、沙棘、花棒、柠条 5 种固氮植物土壤细菌和放线菌数量明显较高, 根系分泌物增多和固氮根瘤菌的增加均能为微生物提供丰富的营养源而促进微生物活性增强、数量增多^[14]。F. T. D. Vries *et al*^[20] 指出在小尺度区域范围内土壤有机质增加会降低土壤真菌丰富度, 赵兴鸽等^[21] 研究表明土壤真菌丰富度与土壤有机质呈显著负相关, 与本研究一致。上述揭示出微生物数量及结构受土地利用方式影响大^[8,13], 土地利用方式、植被类型和结构、土壤表面覆盖度、凋落物多少均导致土壤温度和湿度差异进而影响土壤微生物数量和群落结构^[9,13]。鉴于此, 研究区应推广能生出不定根的密根植物和固氮植物。

3.2.2 土壤酶活性对外界因素的响应 微生物是土壤酶最主要来源, 研究区地类间微生物数量变异系数大决定了土壤酶活性也有较大差异, 造林和农耕活动明显提高了蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶活性, 如各地类脲酶均高出对照 1.1~2.9 倍, 其中 6 种农作物高出 1.8 (花葵)~2.8 倍 (苜蓿); 对多酚氧化酶和纤维素酶也有所改善, 但对蛋白酶活性受抑, 也表现为蛋白酶与有机质、其他酶均呈负相关。徐欣等^[22] 研究农田黑土蛋白酶活性随有机质含量增加而递增, 孙瑞莲^[23] 等发现长期施肥下蛋白酶活性受抑制或不变, 徐瑾等^[24] 对杨树加入外源生物炭而降低土壤蛋白酶活性。研究区乔木林地有机质 (C 源) 含量高, 但无外源 N 输入, 农地外施大量 N 肥使 C/N 比失衡, 微生物对乔木林地 N 或农地 C 的更激烈竞争导致部分微生物数量和蛋白酶活性降低。根瘤菌可释放较多酶促进酶活性和有机氮转化^[16], 除了蛋白酶的其他 6 种酶均表现固氮植物酶活性较好。以脲酶为例, 沙棘、沙枣、柠条和花棒 4 种固氮植物的脲酶活性高出对照 1.4 倍 (花棒)~2.2 倍 (沙枣), 且明显高出怪柳、霸王和沙木蓼非固氮树种, 也证实了郭志明等^[25] 研究认为脲酶活性与氮素呈极显著相关; 乔木林地中, 二白杨和小美旱杨脲酶活性显著高于新疆杨, 与二者密度明显高于后者有关。说明沙区造林更适宜耐旱固氮灌

木, 灌溉允许时应适当增大乔木造林密度以提高凋落物回归量和脲酶转氮活性。多酚氧化酶和纤维素酶均与有机质累积有关, 在研究区表现活性低、差异小, 一方面与研究区凋落物普遍返土量少、有机质底物量低有关, 一方面与研究区气候寒冷致 2 种酶活性显著降低有关^[26-27]。综上, 作为酶最主要来源的微生物受植被种类、有机质、pH、C/N 比、养分、环境等多因素影响, 故应从长远角度综合考虑和探究酶指标的变化、作用机理和方式, 因此也表现出微生物数量、酶活性、有机质、CEC、物理性黏粒等指标间既存在正向协调交互作用, 又存在负向拮抗作用, 土壤酶专性反映土壤中各种转化进程, 共性一定程度上综合反映土壤生物质量, 但有机质与绝大多数指标呈显著或极显著相关表明其作为微生物碳源、酶促反应、土壤肥力的核心纽带作用, 设法提高有机质含量是“加酶”改土措施。

3.2.3 土壤微生物和酶活性对土壤生物质量的响应 细菌和纤维素酶对土壤生物质量综合评价影响小而被剔除, 细菌虽然占研究区微生物数量的 99% 以上, 但其产生的挥发性物质抑制其他微生物数量和群落结构^[28], 研究区凋落物少限制了纤维素酶的腐解酶促反应, 且其含量 (活性) 很低。对 SBQI 贡献最大 (36.9%) 的指标为有机质、CEC、过氧化氢酶、多酚氧化酶和物理性粘黏 5 个指标, 其次为蔗糖酶和碱性磷酸酶, 后依次为脲酶、蛋白酶、真菌和放线菌, SBQI 评价结果可解释 82% 的总体变异率, 同时经得起极显著正相关检验。微生物和酶活性大的变异系数决定了各地类间 SBQI 值 3 级 (a、b、c) 的差异性, SBQI 平均高出对照 1.5 (新疆杨)~2.7 倍 (沙枣), 97.7% 的样点 SBQI<0.5 (中间值, 最大值为 1), 整体很低。综上, 造林和农耕活动虽然对土壤生物质量的影响程度复杂, 但整体正向改善了区域土壤生物质量, 研究区土壤有机质等养分含量低、凋落物少、沙区生境等条件决定了 SBQI 的整体水平低和改善过程缓慢, 需根据研究区实际种植“养地”“加酶”植物: 有灌溉条件时, 种植二白杨、小美旱杨等多行稠密防护林乔木; 灌木造林优选沙枣、沙棘等固氮植物; 农地采用种苜蓿等豆科牧草和休耕措施, 同时种植短小、低耗经济作物。

参考文献:

- [1] 褚海燕, 冯毛毛, 柳旭, 等. 土壤微生物生物地理学: 国内进展与国际前沿[J]. 土壤学报, 2020, 57(3): 515-529.
CHU H Y, FENG M M, LIU X, *et al*. Soil microbial biogeography: recent advances in China and research frontiers in the world[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(3): 515-529. (in Chinese)

- [2] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986.
- [3] 刘卓玛姐, 刘增文, 冯顺煜, 等. 陕北半湿润黄土丘陵区不同人工林土壤生物学特征研究[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(2): 26-31.
LIU ZHUO MA JIE, LIU ZENG WEN, FENG SHUN YU, *et al.* Soil biological characteristics in different kinds of artificial forests in the semi-humid zones of Loess Plateau[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(2): 26-31. (in Chinese)
- [4] 孙文艳, 廖超英, 李晓明, 等. 毛乌素沙地东南部人工林土壤生物学特性[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(3): 28-33.
SUN WEN YAN, LIAO CHAO YING, LI XIAO MING, *et al.* Soil biological properties of different forest plantations on the southeast of the MuUs Sandy Land [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(3): 28-33. (in Chinese)
- [5] 吕瑞恒, 梁继业, 于军, 等. 和田河上游灰杨不同林型土壤理化性质及酶活性分析[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(2): 27-32.
LÜ RUI HENG, LIANG JI YE, YU JUN, *et al.* Physicochemical properties and enzymatic activities of different populus pruinosa forest types in the up reaches of Hotian River[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(2): 27-32. (in Chinese)
- [6] GUOLEI L I, YONG L, BEI G, *et al.* Seasonal response of soil enzyme activity to thinning intensity of aerial seeded, stands [J]. Frontiers of Forestry in China, 2008, 3(3): 286-292.
- [7] BO Y J, ZHU Q K, BAO Y X, *et al.* Soil quality assessment of micro-landforms in the semi-arid region of the Loess Plateau, China[J]. Journal of Food, Agriculture & Environment, 2013, 11(3&4): 2393-2398.
- [8] 贾倩民, 刘彦云, 刘秉儒, 等. 干旱区盐碱地不同栽培草地土壤理化性质及微生物数量[J]. 草业科学, 2014, 31(7): 1218-1225.
- [9] 徐建明, 张甘霖, 谢正苗, 等. 土壤质量指标与评价[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [10] GARY D B, MARY K T, FRANCIS R, *et al.* Microbial and biochemical soil quality indicators and their potential for differentiating areas under contrasting agricultural management regimes[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36(11): 1785-1792.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [12] 程丽娟, 薛泉宏. 微生物学实验技术[M]. 西安: 世界图书出版公司, 2000.
- [13] 包耀贤. 黄土高原坝地和梯田土壤质量特征及评价(博士论文)[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- [14] 周际海, 郝茹茹, 魏倩, 等. 旱地红壤不同土地利用方式对土壤酶活性及微生物多样性的影响差异[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 327-332.
ZHOU J H, GAO R R, WEI Q, *et al.* Effects of different land use patterns on enzyme activities and microbial diversity in upland red soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(1): 327-332. (in Chinese)
- [15] ZOMOZA R, GUERRERO C, MATAIX-SOLERA J, *et al.* Assessing air-drying and rewetting pre-treatment effect on some soil enzyme activities under Mediterranean conditions [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(8): 2125-2134.
- [16] GIRVAN M S, BULLIMORE J, PRETTY J N, *et al.* Soil type is the primary determinant of the composition of the total and active bacterial communities in arable soils[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2003, 69(3): 100-1809.
- [17] ROUSK J, BÅÅTH E, BROOKES P C, *et al.* Soil bacterial and fungal communities across a pH gradient in an arable soil [J]. The ISME Journal, 2010, 4(10): 1340-1351.
- [18] 杨宁, 邹冬生, 杨满元, 等. 衡阳紫色土丘陵坡地不同植被恢复阶段土壤微生物群落多样性的变化[J]. 林业科学, 2016, 52(8): 146-156.
YANG N, ZOU D S, YANG M Y, *et al.* Variations of soil microbial community diversity in purple soils at different re-vegetation stages on sloping-land in hengyang, Hunan Province [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016, 52(8): 146-156. (in Chinese)
- [19] 邓娇娇, 朱文旭, 张岩, 等. 辽西北风沙区不同人工林土壤真菌群落结构及功能特征[J]. 林业科学研究, 2020, 33(1): 44-54.
DENG J J, ZHU W X, ZHANG Y, *et al.* Studies on soil fungal community composition and function characteristics of different plantations of sandy area, northwest liaoning province [J]. Forest Research, 2020, 33(1): 44-54. (in Chinese)
- [20] VRIES F T D, HOFFLAND E, EEKEREN N V, *et al.* Fungal/bacterial ratios in grasslands with contrasting nitrogen management[J]. Soil Biol Biochem, 2006, 38(8): 2092-2103.
- [21] 赵兴鸽, 张世挺, 牛克昌. 青藏高原高寒草甸土壤真菌多样性与植物群落功能性状和土壤理化特性的关系[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26(1): 1-9.
- [22] 徐欣, 郑利远, 周珂, 等. 长期施肥对不同有机质水平黑土蛋白酶活性及氮素的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(1): 44-48.
XU X, ZHENG L Y, ZHOU K, *et al.* Effects of long-term fertilization on protease activity and nitrogen in arable mollisols of different organic matter contents[J]. Soil and Fertilizer in China, 2019(1): 44-48. (in Chinese)
- [23] 孙瑞莲, 赵秉强, 朱鲁生, 等. 长期定位施肥对土壤酶活性的影响及其调控土壤肥力的作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(4): 406-410.
- [24] 徐瑾, 王瑞, 邓芳芳, 等. 施用生物炭对东台沿海杨树人工林土壤理化性质及酶活性的影响[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2020, 49(3): 348-353.
- [25] 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. (in Chinese)
- [26] 秦纪洪, 黄雪菊, 孙辉, 等. 低温季节西南亚高山森林土壤多酚氧化酶动态研究[J]. 土壤通报, 2012, 43(5): 1073-1079.
- [27] 刘海静, 任萍. 2 种还田模式下小麦秸秆腐解菌剂应用效果研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(3): 166-172.
- [28] 胡亚林, 汪思龙, 颜绍馥. 影响土壤微生物活性与群落结构因素研究进展[J]. 土壤通报, 2006, 37(1): 170-176.