

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2021.0701

王理德, 何洪盛, 韩福贵, 等. 民勤绿洲不同退耕年限土壤微生物量的变化特性[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(10): 1338-1346.

WANG Li-de, HE Hong-sheng, HAN Fu-gui, et al. Characteristics of Dynamic Changes of Soil Microbial Biomass on Fallowed Farmland of Different Years in Minqin Oasis[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(10): 1338-1346.

民勤绿洲不同退耕年限土壤微生物量的变化特性

王理德^{1,2,3,4}, 何洪盛⁴, 韩福贵^{1,2,3①}, 陈思航¹, 宋达成^{1,2,3}, 王梓璇^{1,2,3}, 闫沛迎¹ (1. 甘肃省治沙研究所, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省河西走廊森林生态系统国家定位观测研究站, 甘肃 武威 733000; 3. 甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外观测研究站, 甘肃 民勤 733300; 4. 甘肃农业大学林学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为探讨不同退耕年限对土壤微生物特性的影响,以民勤绿洲不同年代退耕地(1、2、3、4、5、8、15、24及31 a) 9个样地为研究对象,采用空间尺度代替时间尺度的方法,对民勤绿洲不同年限(1~31 a)退耕地土壤微生物生物量的变化特征及季节动态变化规律进行系统分析与研究。结果表明:(1)同一年限退耕地的土壤微生物量变化规律均为表层高于深层。表层土壤微生物生物量碳含量最高可达 979.13 mg·kg⁻¹,而 10~20、>20~30 和 >30~40 cm 土层土壤最高只有 610、480 和 327.74 mg·kg⁻¹,分别占表层含量的 62%、49% 和 33%。土壤微生物生物量氮和生物量磷具有类似的规律,土壤微生物量表聚现象明显。(2)土壤微生物生物量碳与生物量氮总体上随着退耕年限的增加呈波动减小的状态,土壤微生物生物量磷呈波动式上升的趋势。(3)土壤微生物生物量碳含量随季节的动态变化规律比较明显:冬季最小,秋季最大,夏季与春季居中,表层(0~10 cm)土壤变化幅度较大。(4)微生物生物量氮的季节动态呈现出倒“V”型分布的状态,总体变化规律与微生物生物量碳相似。(5)土壤微生物生物量磷含量基本为秋季、夏季较大,春季居中,冬季最小。3月土壤微生物生物量磷居中,6或9月达到峰值,12月下降到最低值。(6)通过研究可以推断,退耕 5 a 左右是民勤绿洲退耕地恢复治理过程中的关键时期。

关键词: 民勤绿洲; 退耕地; 微生物生物量; 变化特征; 季节动态变化

中图分类号: X825 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2022)10-1338-09

Characteristics of Dynamic Changes of Soil Microbial Biomass on Fallowed Farmland of Different Years in Minqin Oasis. WANG Li-de^{1,2,3,4}, HE Hong-sheng⁴, HAN Fu-gui^{1,2,3①}, CHEN Si-hang¹, SONG Da-cheng^{1,2,3}, WANG Zi-xuan^{1,2,3}, YAN Pei-ying¹ (1. Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Hexi Corridor Forest Ecosystem National Research Station, Wuwei 733000, China; 3. Minqin National Station for Desert Steppe Ecosystem Studies, Mingqin 733300, China; 4. Forestry College of Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to investigate the effect of different years of fallowed farmland on soil microbial characteristics, different ages of fallowed farmland (1, 2, 3, 5, 8, 15, 24, 31 a) in Minqin Oasis were used for the study. The spatial scale instead of the temporal scale was used to study the characteristics of soil microbial biomass and its seasonal dynamics in the secondary grassland of Minqin Oasis for different years (1-31 a). The results show that (1) soil microorganisms were higher in the surface layer than in the deep layers of the secondary grassland in the same years of fallowing, The highest soil microbial carbon content of the surface layer was 979.13 mg·kg⁻¹, while the highest soil microbial carbon content was 610, 480 and 327.74 mg·kg⁻¹ with the soil depth of 10-20, >20-30 and >30-40 cm, respectively, accounting for 62%, 49%, 33% of the contents in the surface layer, respectively. Soil microbial biomass nitrogen and soil microbial biomass phosphorus had the same results, indicating that the soil microbial biomass clustering was obvious; (2) soil microbial biomass carbon and microbial biomass nitrogen generally showed a fluctuating decrease with the increase of fallowing years, and soil microbial biomass phosphorus showed a trend of undulating increase with the increase of fallowing years; (3) the dynamic change of soil microbial biomass carbon content with different seasons was obvious, with the minimum in winter, the maximum in autumn, and the medium in summer and spring, and the range of soil microbial biomass carbon

收稿日期: 2021-11-14

基金项目: 国家自然科学基金(31760709); 甘肃省重点研发计划(21YF5FA038); 甘肃省自然科学基金(21JR7RA732)

① 通信作者 E-mail: hanfug2008@126.com

content in the surface layer (0–10 cm) was large; (4) the seasonal dynamics of microbial biomass nitrogen showed an inverted V-shaped distribution, and the dynamic change of it was the same as that of microbial biomass carbon. (5) the seasonal dynamics of soil microbial biomass phosphorus content were larger in autumn and summer, intermediate in spring and minimal in winter. From March onwards, soil microbial biomass phosphorus gradually increased as the month increases, reaching a peak in June or September, and then decreased continuously, falling to a minimum in December. (6) According to the research, it can be concluded that the first five years was the key period for the restoration process of fallowed farmland in Minqin Oasis.

Key words: Minqin oasis; fallowed farmland; soil microbial biomass; characteristics; seasonal dynamic change

民勤是我国典型的干旱沙区,这里曾经是一片植被茂盛、水源充足的天然绿洲^[1]。然而,随着民勤绿洲经济规模、人口数量和人工绿洲的增加,用水量增加,地下水严重超采、矿化度逐渐增加,严重影响了该地区自然植被的生长,加剧了土地沙漠化与盐渍化^[2-3],再加上关井压田导致大片土地弃耕而撂荒,这些退耕地如果没有科学、合理、有效的保护方式,就会被风蚀沙化从而形成新的沙尘源,造成恶性循环,严重破坏民勤绿洲土壤生态系统^[4],因此,如何合理保护和恢复民勤绿洲退耕地是亟待解决的生态问题。

土壤是生态系统中许多生态过程的载体和植物生长的基质^[5],其生物学性质是反映土壤生态系统恢复程度的重要指标^[6]。在营养库中虽然只占一小部分,但它既是养分的“库”,同时又是养分的“源”,是土壤生态系统的核心,直接或间接参与调节土壤有机质转换^[7]、能量流动^[8]、土壤肥力形成^[9]、养分循环^[10]及污染物的降解^[11]等,特别是在生态系统物质循环和能量流动中占据主导作用,具有复杂的生物化学活性^[12]。同时对土壤的演化具有重要的影响,在土壤生态环境恢复中极具影响力^[13]。土壤微生物生物量是活的土壤有机质,是土壤活性大小的标志^[14],虽然在土壤有机质中仅占 1%~5%,但是它不仅是调节其他养分的关键,而且还是有机质与土壤养分转化的动力,可以快速反映土壤质量的变化情况^[15],土壤微生物生物量是评价土壤肥力和质量状态的重要参数^[16]。

目前,土壤微生物特性对土壤生态系统演变所起的作用越来越受到广大科研工作者的关注^[17-19],并成为该领域研究的前沿和热点^[20-21]。国内外对土壤微生物的研究主要集中在微生物与植物群落的关系^[22-23]、与土壤条件的关系^[24-26]、与不同施肥方式的关系^[27-28]、与不同土壤管理方式的关系^[29-30]、与土壤酶的相互关系^[31]。但是对于干旱绿洲退耕区土壤微生物量较少进行系统研究,特别是干旱区退弃耕地土壤微生物量季节变化规律的研究较少,更没有把微生物量的研究与退弃耕地修

复紧密结合起来。

基于此,笔者采用空间尺度代替时间尺度的方法,对民勤不同年限(1~31 a)退耕地土壤微生物生物量的变化特征和季节动态变化规律进行了系统研究,探讨民勤绿洲退耕地土壤微生物量的变化规律,旨在为民勤绿洲退耕地土壤修复提供实践参考,为该区域的生态恢复、管理及可持续发展提供理论依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域概况

试验样地选在甘肃省民勤县北部的西渠镇黄辉村与白云村,地理坐标为北纬 39°01'30"~39°03'28",东经 103°35'57"~103°37'56"。年降水量大约 110 mm,主要集中在秋季,年平均蒸发量为 2 644 mm 左右,年均温度 7.4 °C,主要土壤类型是灰棕漠土。样地中主要草本植物有:蒙古猪毛菜(*Salsola ikonnikovii*)、碱蓬(*Suaeda glauca*)、田旋花(*Convolvulus arvensis*)、白茎盐生草(*Halogeton arachnoideus*)、骆驼蓬(*Peganum harmala*)、藜(*Chenopodium album*);灌木植物有:盐爪爪(*Kalidium foliatum*)、白刺(*Nitraria schoberi*)、红砂(*Reaumuria songarica*)、小果白刺(*Nitraria sibirica*)、枸杞(*Lycium chinense*)等。

1.2 样地设置及土样采集

2011 年 11 月,通过对民勤县相关政府部门和当地居民走访和查阅,明确研究区土地退耕时间,采用时空替代法,选择没有因自然因素变化而改变地形,或者微地形变化较小、植物均匀生长、没有人因素干扰引起土壤物质再分配的退耕地为研究样地。在保证样地沙土母质相同的情况下,选择退耕时间(离 2012 年检测时间)为 1、2、3、4、5、8、15、24 及 31 a 的 9 个样地,每个试验样地面积为 1 hm²(表 1)。使用 GPS 定位,在每个样地内按“S”形方法选取 5 个土样采集点,并做好标记^[32]。

2012 年 3、6、9 及 12 月,在试验样地中已固定的“S”形 5 个样点上挖土壤剖面,土壤样品分别从

0~10、>10~20、>20~30、>30~40 cm 土层采集,为了更加具有代表性,把同一个试验样地所取的 5 个土样按照相同土层分别均匀混合,在每个样点上取

3 个重复土样。将 1~2 kg 混合均匀的土样装进恒温采样箱的无菌袋中,带回实验室进行土壤微生物生物量的测定和系统分析。

表 1 样地基本状况

Table 1 Basic condition of sample sites

退耕年限/a	海拔/m	经纬度	群落优势种	伴生种
1	1 304	39°03'28" N, 103°36'03" E	藜、田旋花、五星蒿(<i>Echinopilon divaricatum</i>)、骆驼蓬	骆驼蒿(<i>Peganum nigellastrum</i>)、虎尾草(<i>Chloris virgata</i>)、虫实(<i>Corispermum hysopifolium</i>)、蒺藜(<i>Polygonum aviculare</i>)等
2	1 303	39°03'25" N, 103°36'09" E	苦苣菜(<i>Sonchus oleraceus</i>)、骆驼蒿、白茎盐生草、宽叶独行菜(<i>Lepidium lotifolium</i>)	西伯利亚滨藜(<i>Atriplex sibirica</i>)、藜、虎尾草、大戟(<i>Euphorbia pekinensis</i>)等
3	1 297	39°02'36" N, 103°36'09" E	骆驼蒿、白茎盐生草、宽叶独行菜、顶羽菊(<i>Acroptilon repens</i>)	黄花矾松(<i>Limonium aureum</i>)、芦苇(<i>Phragmites australis</i>)、骆驼蓬、画眉草(<i>Eragrostis pilosa</i>)等
4	1 305	39°02'34" N, 103°36'13" E	骆驼蓬、顶羽菊、骆驼蒿、碱蓬	芦苇、虎尾草、白茎盐生草等
5	1 304	39°02'09" N, 103°35'58" E	黑果枸杞(<i>Lycium ruthenicum</i>)、白茎盐生草、宽叶独行菜、骆驼蓬	群心菜(<i>Cardaria draba</i>)、铁线莲(<i>Clematis florida</i>)、骆驼蒿、虎尾草等
8	1 304	39°02'54" N, 103°07'54" E	黑果枸杞、白茎盐生草、骆驼蓬、骆驼蒿	芦苇、顶羽菊、黄花矾松、芨芨草(<i>Achnatherum splendens</i>)等
15	1 304	39°01'45" N, 103°37'02" E	黑果枸杞、白茎盐生草、骆驼蒿、黄花矾松	西伯利亚滨藜、蒙古猪毛菜、宽叶独行菜、五星蒿等
24	1 306	39°02'34" N, 103°36'24" E	黑果枸杞、盐爪爪、红砂、芦苇	白茎盐生草、白刺、骆驼蒿、画眉草等
31	1 306	39°02'34" N, 103°36'13" E	黑果枸杞、盐爪爪、红砂、骆驼蒿	白刺、雅葱(<i>Scorzonera hispanica</i>)、白茎盐生草、骆驼蓬等

2011 年的退耕年限为离检测时间 1 a, 余类推。

1.3 土壤微生物生物量测定

土壤微生物生物量用氯仿熏蒸法^[33]测定。先将试验样地内取回的土样进行 7 d 预培养,然后取出 3 份,每份土样 10 g,分别装进 3 个 50 mL 烧杯中,另外准备 2 个装有 1 mol·L⁻¹ NaOH 溶液和无乙醇氯仿的烧杯,将这 5 个烧杯装入底部放有水浸过滤纸的干燥器中,将干燥器用凡士林密封,用真空泵抽气,直到三氯甲烷沸腾 2 min 以上。确保干燥器不漏气的情况下,将阀门关闭,在 25 °C 无光情况下,搁置 24 h,再用真空泵抽气,直至三氯甲烷气味消失。

1.3.1 土壤微生物生物量碳(MBC)测定^[33]

土壤试验样品经氯仿熏蒸后,用 0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄ 和 K₂Cr₂O₇-H₂SO₄ 外加热法测定微生物生物量碳(MBC, B_{MC})。

$$B_{MC} = (E_c - E_{c0}) / 0.38. \quad (1)$$

式(1)中, E_c 为熏蒸土样液体中有机碳量, mg·kg⁻¹; E_{c0} 为没有熏蒸土样液体中有机碳量, mg·kg⁻¹; 0.38 为校正系数。

1.3.2 土壤微生物生物量氮(MBN)测定^[33]

土样经三氯甲烷熏蒸后,用 0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄ 溶液萃取,应用凯氏定氮法测定微生物生物量氮

(MBN, B_{MN})。

$$B_{MN} = (E_N - E_{N0}) / 0.54. \quad (2)$$

式(2)中, E_N 为熏蒸土样液体中有机氮量, mg·kg⁻¹; E_{N0} 为没有熏蒸土样液体中有机氮量, mg·kg⁻¹; 0.54 为校正系数。

1.3.3 土壤微生物生物量磷(MBP)测定^[33]

土壤样品经过三氯甲烷熏蒸后,采用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ (pH 值=8.5) 溶液进行萃取,然后采取钼锑抗显色法,对微生物生物量磷测定(MBP, B_{MP})。

$$B_{MP} = (E_p - E_{p0}) / 0.54. \quad (3)$$

式(3)中, E_p 为熏蒸土样液体中有机磷量, mg·kg⁻¹; E_{p0} 为没有熏蒸土样液体中有机磷量, mg·kg⁻¹; 0.54 为校正系数。

1.4 土壤微生物生物量的加权平均值计算

$$G_m = \sum_{k=1}^n V_{ik} \times \omega_{ik}, \quad (4)$$

$$\omega_{ik} = \frac{V_{ik}}{\sum ik}. \quad (5)$$

式(4)~(5)中, G_m 为土壤微生物量加权平均值; V_{ik} 为土壤微生物量; ω_{ik} 为权重系数; $i=1, 2, \dots, n$, 其中

n 为处理个数; k 为土层深度, $k=1, 2, 3, 4$, 分别表示 0~10、>10~20、>20~30、>30~40 cm 土层。

1.5 数据分析与处理

采用 SPSS 19.0、Microsoft Excel 2007 软件统计整理和分析数据, 不同年代退耕地微生物生物量采用单因素方差分析(one-way ANOVA)进行差异显著性检验。

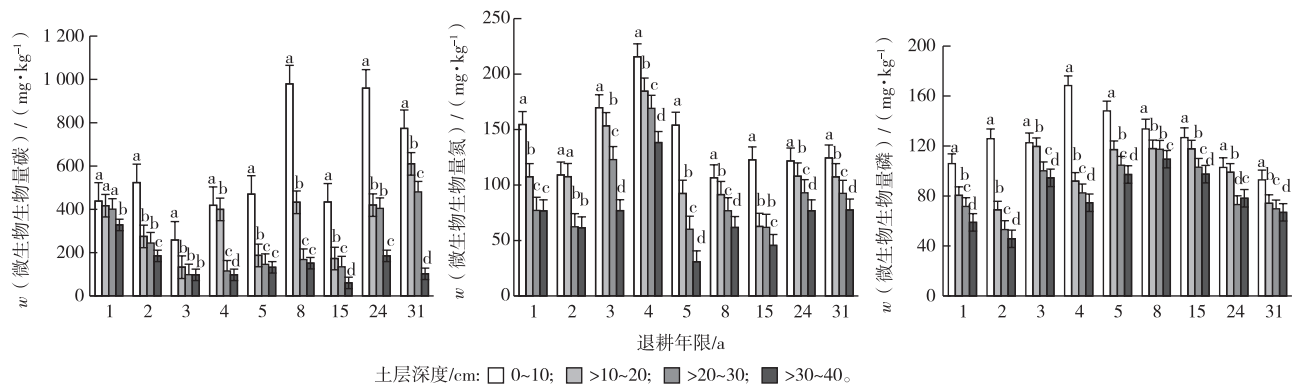
2 结果与分析

2.1 不同退耕年限土壤微生物生物量沿剖面分布规律

由图 1 可以看出, 相同退耕年限的土壤 MBC、MBN 及 MBP 含量均随土层的加深而减小, 0~10 cm 土层的土壤 MBC、MBN 及 MBP 含量高于或者显著高于其他 3 层(>10~20、>20~30、>30~40 cm), 可见民勤绿洲退耕地土壤微生物生物量随着土壤深度的增加, 其含量逐渐降低, 在总生物量中, 表层生

物量占比最大, 表聚现象突出。

图 1 表明, 在 0~30 cm 土层, 随着退耕年限的不断增加, 土壤 MBC 含量在退耕前期逐渐减小, 在 8~31 a 内逐渐增大, 在退耕 8~31 a 期间, 0~10、>10~20 及 >20~30 cm 土层的土壤 SMC 最大值分别为 979.13、610.00 和 480.22 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 在 >30~40 cm 土层中, MBC 含量随退耕年限的增大而逐渐减小, 第 1 年时最高, 为 327.74 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; MBN 含量的变化趋势表现为在退耕前 4 a 先增大, 在 4~8 a 慢慢减小, 到退耕 8~31 a 期间逐渐稳定。在退耕第 4 年时样地内各土层 SMN 含量达到最高值, 从上到下分别为 215.50、184.49、169.00 和 138.23 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 土壤 MBP 含量在 0~10 cm 土层呈先增大(1~4 a)后减小(4~31 a)的变化规律, 退耕第 4 年含量最高, 最大值为 168.35 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 随着退耕年限的增加, >10~40 cm 土层土壤 MBP 含量的变化表现为退耕前 2 a 先减小, 随后逐渐升高, 最后趋于降低。



同一组直方柱上方英文小写字母不同表示不同土层间某指标差异显著($P < 0.05$)。2011 年的退耕年限为离检测时间 1 a, 其余类推。

图 1 不同土层不同退耕年限的土壤微生物量分布

Fig. 1 The soil microbial biomass distribution in different soil layers at different ages since restoration

为了更加准确地研究土壤微生物生物量在不同年限退耕地及不同土层深度中的变化, 同时各土层土壤微生物生物量的平均数能包含长期变动趋势, 采用加权平均值来分析研究不同年限退耕地土壤微生物生物量的变化规律(表 2), 不同年限退耕地相同土层中的土壤 MBC 含量成波动式变化, 加权平均的最大值出现在退耕 24 a ($629.88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 最小值出现在退耕 3 a ($177.79 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。退耕 1~3 a 逐渐减小, 然后再逐渐增大, 到 24 a 趋于平稳。土壤 MBN 含量的变化表现为: 随着退耕年限的增加, 土壤 MBN 含量呈先波动式减小, 再波动式增大, 最后再波动式减小的趋势, 直到退耕 24 a 趋于稳定。

在退耕 1~2 a 时, 土壤 MBN 含量逐渐减小, 随

后大幅度增加, 到退耕 4 a 时, 加权平均值达到最大值 $183.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 然后相对趋于平稳再下降, 到退耕 15 a 前后, 加权平均值降低到最小值 $79.92 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤 MBP 含量总体表现为: 随着退耕年限的增加, MBP 含量呈波动式增大、再波动式减小的趋势。退耕 5~8 a 时, 加权平均值达到了最大值 $121.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 然后随着退耕年限的增大, 土壤 MBP 含量逐渐减小, 最后逐渐稳定。总体来讲, 民勤绿洲退耕地土壤 MBP 含量随着自然演变年限的增加呈现出上升的趋势。MBC/MBN 含量比呈先上升后下降的趋势, 退耕 8 a 时比值最大(6.74)。

2.2 不同退耕年限土壤微生物生物量的季节性变化特征

从图 2 可以看出, 民勤绿洲不同年限退耕地土

壤 MBC 含量的季节动态变化规律大致相似,秋季最大,夏季与春季居中,冬季最小。大致呈现出从 3 月开始土壤 MBC 含量呈升高趋势,到 9 月达到峰值,然后又持续降低,12 月下降到最低值。0~10 cm 土层土壤 MBC 含量变化幅度较大,>30~40 cm 土层的土壤 MBC 含量变化幅度逐渐变小。土壤 MBN 含量的季节动态变化表现为:在不同年限退耕地变化趋势均呈现为倒“V”型分布格局,3—9 月逐渐增大,9 月达到峰值,然后又持续减小,12 月下降到最低值。

在整个生长季,样地表层土壤 MBN 含量变幅较大。不同年限退耕地 MBP 含量的季节动态大致相似,秋季与夏季较大,春季居中,冬季最小。总体呈从 3 月开始土壤 MBP 含量逐渐升高,到 6 月或者 9 月达到峰值,然后又持续降低,12 月下降到最低值。退耕初期季节变化幅度逐渐增大,退耕 5 a 时 0~20 cm 土层 6 月变化幅度达到最大值,然后逐渐减小,

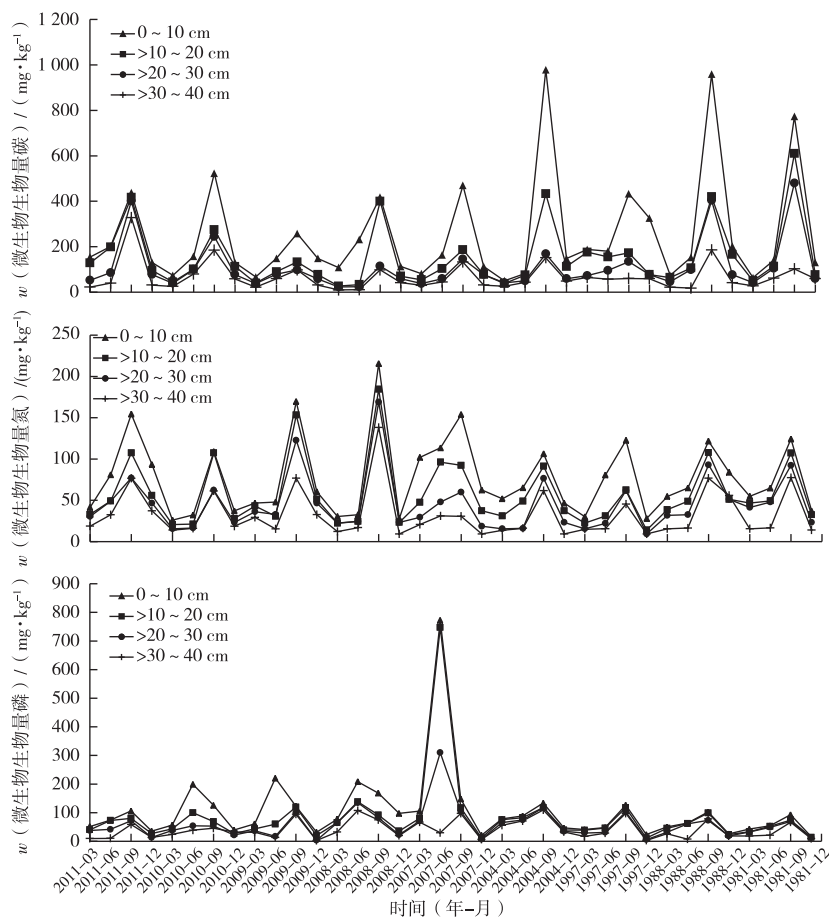
退耕 15 a 后土壤 MBP 含量季节变化极小。

表 2 不同年限退耕地土壤微生物生物量

Table 2 The soil microbial biomass in the sample sites at different ages since restoration

退耕年限/ a	w(微生物生 物量碳)/ (mg·kg ⁻¹)	w(微生物生 物量氮)/ (mg·kg ⁻¹)	w(微生物生 物量磷)/ (mg·kg ⁻¹)	微生物生 物量碳/ 氮比
1	412.76	111.55	82.23	3.7
2	369.23	90.24	78.94	4.09
3	177.79	139.07	111.14	1.28
4	320.79	183.73	110.8	1.75
5	298.67	95.66	120.22	3.12
8	594.51	88.17	121.12	6.74
15	268.49	79.92	113.19	3.36
24	629.88	103.97	90.23	6.06
31	600.97	104.72	77.68	5.74

表中数据均为不同土层(0~10、>10~20、>20~30 及>30~40 cm)各指标的加权平均值。2011 年的退耕年限为离检测时间 1 a,其余类推。



3、6、9、12 月代表实际检测时间。2011 年的退耕年限为离检测时间 1 a,其余类推。

图 2 土壤微生物生物量随季节动态变化

Fig. 2 Soil microbial biomass changes dynamically with season

3 讨论

土壤微生物的功能可通过微生物生物量来反映^[34],同时微生物生物量与其所处土壤环境密不可分^[35]。在民勤绿洲退耕地恢复过程中,土壤微生物生物量随着土层的加深而逐渐减小。由图 1 可以看出,在 4 个土层中,土壤微生物生物量占比较大的是 0~10 cm 土层。方差分析显示,各土层对 MBC、MBN、MBP 含量的影响显著 ($P < 0.05$)。马文文等^[36]、文都日乐等^[37] 研究结果也呈现出类似的规律。这主要是由于土壤表层有少量的枯枝落叶凋落物及其所产生的腐殖质,有机质含量高^[38],再加上表层温度条件和通气状况良好,微生物生长旺盛,代谢活跃^[39]。另外,好氧菌大多居于土壤表层,活性较强,随着土层的加深,生境条件越来越差,好氧菌逐渐减少,代谢活动较弱的厌氧菌逐渐占主导地位,使深层的土壤微生物生物量减少,微生物生物量的分布发生变化,出现了明显的表聚性^[40]。

随着退耕地恢复时间的增加,土壤 MBC 与 MBN 含量呈先波动下降,最终走向平衡的态势,MBP 含量总体上呈波动上升的趋势。在退耕地恢复的前几年,物种丰富度和物种多样性指数都比较大^[41-42],土壤 MBC、MBN、MBP 含量也较高,随恢复年限的增加,物种丰富度和多样性指数下降^[42],MBC、MBN、MBP 含量也逐渐减小。比较研究区 9 个样地发现,MBC 含量的最大值在退耕后 24 a 左右出现,为 $629.88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。而这个时候,MBN、MBP 含量居中;退耕 4 a 的土层中,MBN 含量达到最大值 ($183.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),MBC、MBP 含量居中;退耕 8 a 的样地中 MBP 含量最大 ($121.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),MBC、MBP 含量居中。微生物生物量是土壤养分的重要来源,是土壤中活的有机质^[43]。在退耕后的 24 a 期间出现土壤 MBC 含量的最大值,可见 MBC 的积累是一个极其缓慢的过程;在退耕后的 4 a 内,土壤 MBN 含量的加权平均值达到最大值,这说明土壤肥力水平最好的时间是退耕 4 a,到退耕 5 a 时又恢复到退耕 3 a 时的状况,可见退耕 5 a 左右是土地修复的关键时期,为了防止土地的沙漠化及其盐渍化,在土地退耕 5 a 左右要进行合理的人工干预,这与项目组前期研究结果相似^[41];土壤 MBP 含量的最大值出现在退耕后的 5~8 a,但波动范围较小,退耕中期(3~15 a)土壤 MBP 含量的加权平均值在 $110 \sim 120 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,由此可见,退耕年限的延长对 MBP 的影响较小,这可能与磷在土壤中的存在形态较为复杂有关,而且土壤磷分布受成土母质中矿

物成分、地貌、土地使用程度等多种条件的影响,几乎不受自然环境和植被的影响^[36,44]。土壤 MBC、MBN、MBP 是土壤活性养分的库,能敏锐地反映环境因子的变化^[45]。

土壤 SMBC/SMBN 比 ≥ 30 和 SMBC/SMBN 比 ≤ 20 分别表示土壤微生物生长受到氮源和碳源的限制,当 SMBC/SMBN 比 = 25 时对土壤微生物生长最有利^[46],在不同年限退耕地土壤中,SMBC/SMBN 比介于 1.28~6.74,说明碳源供给数量是土壤微生物生长的主要限制因子。相关性分析也显示,土壤微生物量与土壤养分呈不同程度的相关性^[47],其中与土壤有机质呈极显著相关。然而土壤是较为复杂的生态系统,土壤微生物量还会受温度、气温、土壤容重等因素的影响,应综合考虑。

土壤微生物生物量随着季节的变化而改变,这主要是由于气温、凋落物以及土壤微生物与植物对养分的竞争等原因造成的,在不同的生态系统中,土壤 MBC、MBN、MBP 含量的季节变化规律也不同^[48]。就是在相同的生态系统中,不同生境的土壤中 MBC、MBN、MBP 含量的季节变化规律也不一样^[49]。民勤绿洲退耕地土壤 MBC、MBN、MBP 含量的季节变化规律具有较大差异。不同年限退耕地 MBC 含量的季节动态大致相似,秋季最大,夏季、春季居中,冬季最小。从 3 月开始随月份的增大 MBC 含量逐渐增大,到 8—9 月达到峰值,然后随月份的增大又逐渐减小,12 月降为最低值。这是因为进入春季,地温回升,土壤微生物数量增加、活性提高,解冻后土壤中原有的可溶性有机碳利用分解加强,较多的营养物质被微生物固定^[50],土壤 MBC 含量逐渐升高。不同年限退耕地土壤 MBN 含量的季节动态变化显现出倒“V”型分布状况,从 3 月开始随月份的增大 MBN 含量逐渐增大,到 6 或者 9 月到达峰值,后又连续减小,12 月减小到最低值。这一结果与 GARCIA 等^[51] 的研究结果相似。从 3 月开始土壤 MBP 含量逐渐升高,到 6 或 9 月达到峰值,然后随着月份的增加又持续降低,12 月下降到最低值。退耕初期季节变化幅度逐渐增大,退耕 5 a 的时候,0~20 cm 土层 6 月变化幅度达到最大值,然后变化幅度减小,尤其在退耕 15 a 后,MBP 含量季节波动幅度很小。这是由于 3 月植被快速萌发,摄取了土壤中大量的营养物质,所以土壤可溶解有机碳、氮、磷含量急剧减小。在某一水平上造成了与微生物间的营养需求竞争局面,减少了微生物的营养可获取量,抑制其生存和繁殖,因此 MBC、MBN、MBP 含量均降低。进入 5—6 月,由于气温升高、大

量植物根系活动能力的变强,致使有机质矿化作用变大,养分富裕,根系分泌物丰富,微生物生物量增大。土壤取样时间为 2012 年 9 月下旬,正好是研究区降水量增加的时候,此时又有大量的植物枯枝落叶积累,中午温度较高,所以研究区大量的植物枯枝落叶、地表湿润、温度较高等自然现象都有利于增强土壤微生物活性,促进土壤中营养物质的输入以及碳水化合物从地上逐渐向地下转移,土壤中微生物可使用的有机质逐渐增加,故土壤微生物生物量出现峰值^[40]。冬季土壤温度比较低,低温抑制了土壤微生物的活性,其代谢随之变缓,因此土壤微生物生物量下降。在退耕的初期,不同年限退耕地土壤 MBP 含量的季节变化幅度逐渐增加,然后季节变化幅度逐渐减小,尤其是退耕 15 a 后,土层 MBP 含量波动较小,基本无季节变化。这可能是由于退耕后期,土壤的盐碱化程度加重, pH 值明显升高^[52],在一定程度上抑制了土壤 MBP 含量对季节变化的敏感性,使土壤 MBP 含量在退耕后期随着季节的不同几乎没有变化。

4 结论

在甘肃民勤绿洲退耕地自然恢复过程中,相同年限退耕地表层土壤微生物生物量显著高于深层土壤;土壤 MBC 与 MBN 含量随着退耕年限的增加,逐渐减小,土壤 MBP 含量则表现为波动式上升的趋势,土壤微生物生长的主要限制因子是碳源。不同年限退耕地土壤 MBC 含量的季节动态变化大致相似,冬季最小,夏季与春季居中,秋季最大。MBN 含量的季节动态呈现出倒“V”型分布的状态,从 3 月开始随月份的增大 MBC 含量逐渐升高,到 6 或者 9 月到达峰值,然后随月份的增大又连续减小,12 月减小到最低值。土壤 MBP 含量基本表现为秋季、夏季较大,春季居中,冬季最小。在不同的生境中,各类生态因子的共同作用以及关键生态因子的主导位置的不同,土壤 MBC、MBP 含量的季节变化可能存在着一定的差别。

目前影响干旱沙区退耕地土壤微生物生物量变化因子的研究还相对薄弱,今后还需加强这方面的研究。但是,从土壤微生物特性来看,退耕 4 a 时,土壤的熟化程度和土壤肥力水平达到了最好状态。退耕 5 a 后,土壤的肥力呈相对下降的趋势。因此,退耕 5 a 左右是土地修复、利用及荒漠化治理的关键时期。

参考文献:

[1] 冯绳武.民勤绿洲的水系演变[J].地理学报,1963,29(3):

241-249.[FENG Sheng-wu.The Evolution of the Drainage System of the Minchin Oasis[J].Acta Geographica Sinica,1963,29(3):241-249.]

- [2] 张莹花,刘世增,纪永福,等.石羊河中游河岸芦苇(*Phragmites australis*)群落空间格局[J].中国沙漠,2016,36(2):342-348.[ZHANG Ying-hua,LIU Shi-zeng,JI Yong-fu,*et al.*Spatial Distribution Pattern and Spatial Association of *Phragmites australis* in the Middle Reaches of Shiyanghe River [J]. Journal of Desert Research,2016,36(2):342-348.]
- [3] 常跟应,王鹭,张文侠.民勤县农民对石羊河流域节水政策及节水效果认知[J].干旱区资源与环境,2016,30(2):13-19.[CHANG Gen-ying,WANG Lu,ZHANG Wen-xia.Perceptions of Peasants in Minqin County for the Water Conservation Policies of Shiyang River Basin and Their Effects[J].Journal of Arid Land Resources and Environment,2016,30(2):13-19.]
- [4] 宋达成,王理德,吴昊,等.民勤退耕区次生草地土壤特性研究[J].草业学报,2021,30(2):59-68.[SONG Da-cheng,WANG Li-de,WU Hao,*et al.*A Study of Change in Soil Characteristics with Recovery Time in Degraded Grassland in Minqin [J]. Acta Prataculturae Sinica,2021,30(2):59-68.]
- [5] 张翠萍,李淑英,王蓓,等.六氯苯胁迫下 2 种湿地植物根际土壤微生物数量与酶活性变化[J].生态与农村环境学报,2018,34(2):177-183.[ZHANG Cui-ping,LI Shu-ying,WANG Bei,*et al.*Changes in Population of Soil Microbe and Activity of Soil Enzyme in Rhizospheres of Two Wetland Plants under Stress of Hexachlorobenzene [J]. Journal of Ecology and Rural Environment,2018,34(2):177-183.]
- [6] 胡婵娟,郭雷.植被恢复的生态效应研究进展[J].生态环境学报,2012,21(9):1640-1646.[HU Chan-juan,GUO Lei.Advances in the Research of Ecological Effects of Vegetation Restoration [J]. Ecology and Environmental Sciences,2012,21(9):1640-1646.]
- [7] JACKSON L E, BOWLES T M, HODSON A K, *et al.* Soil Microbial-Root and Microbial-Rhizosphere Processes to Increase Nitrogen Availability and Retention in Agroecosystems [J]. Current Opinion in Environmental Sustainability,2012,4(5):517-522.
- [8] PRATSCHER J, DUMONT M G, CONRAD R. Ammonia Oxidation Coupled to CO₂ Fixation by Archaea and Bacteria in an Agricultural Soil [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108 (10): 4170-4175.
- [9] HADAR Y, PAPAPOPOULOU K K. Suppressing Composts: Microbial Ecology Links between Abiotic Environments and Healthy Plants [J]. Annual Review of Phytopathology, 2012, 50: 133-153.
- [10] PETERSEN D G, BLAZEWCZ S J, FIRESTONE M, *et al.* Abundance of Microbial Genes Associated with Nitrogen Cycling as Indices of Biogeochemical Process Rates across a Vegetation Gradient in Alaska [J]. Environmental Microbiology, 2012, 14 (4): 993-1008.
- [11] KUZYAKOV Y, XU X L. Competition between Roots and Microorganisms for Nitrogen: Mechanisms and Ecological Relevance [J]. The New Phytologist, 2013, 198(3):656-669.
- [12] 张营,李法云,孙婷婷,等.化学融雪剂对土壤微生物活性及氮转化的影响[J].生态与农村环境学报,2021,37(2):249-256.

- [ZHANG Ying, LI Fa-yun, SUN Ting-ting, *et al.* Effect of Deicing Salts on Microbial Activity and Nitrogen Transformation in Roadside Soil [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(2): 249–256.]
- [13] 马源, 杨洁, 张德罡, 等. 高寒草甸退化对祁连山土壤微生物生物量和氮矿化速率的影响[J]. *生态学报*, 2020, 40(8): 2680–2690. [MA Yuan, YANG Jie, ZHANG De-gang, *et al.* Effects of Alpine Meadow Degradation on Soil Microbial Biomass and Nitrogen Mineralization Rate in the Qilian Mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(8): 2680–2690.]
- [14] 刘放, 吴明辉, 魏培洁, 等. 疏勒河源高寒草甸土壤微生物生物量碳氮变化特征[J]. *生态学报*, 2020, 40(18): 6416–6426. [LIU Fang, WU Ming-hui, WEI Pei-jie, *et al.* Variations of Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Alpine Meadow of the Shule River Headwater Region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(18): 6416–6426.]
- [15] 付勇, 庄丽, 王仲科, 等. 新疆野生多伞阿魏生境土壤理化性质和土壤微生物[J]. *生态学报*, 2012, 32(10): 3279–3287. [FU Yong, ZHUANG Li, WANG Zhong-ke, *et al.* On the Physical Chemical and Soil Microbial Properties of Soils in the Habitat of Wild *Ferula* in Xinjiang [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(10): 3279–3287.]
- [16] 雷隆举, 赵锦梅, 张雪, 等. 祁连山东段不同植物群落的特征及生物量分配[J]. *草业科学*, 2020, 37(5): 853–863. [LEI Long-ju, ZHAO Jin-mei, ZHANG Xue, *et al.* Study on the Community Characteristics and Biomass Allocation of Different Vegetation in the Eastern Qilian Mountains [J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(5): 853–863.]
- [17] KLUGE B, PETERS A, KRÜGER J, *et al.* Detection of Soil Microbial Activity by Infrared Thermography (IRT) [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 57: 383–389.
- [18] 杜美琪, 张恒硕, 彭栋, 等. 冀西北中低山区灌草群落生物量分配及其与土壤因子的关系[J]. *草业科学*, 2020, 37(1): 1–9. [DU Mei-qi, ZHANG Heng-shuo, PENG Dong, *et al.* Distribution of Shrub-Herb Community Biomass and Its Relationship with Soil Factors in Middle and Low Mountainous Areas of Northwest Hebei Province [J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(1): 1–9.]
- [19] POURREZA M, HOSSEINI S M, SAFARI S A A, *et al.* Soil Microbial Activity in Response to Fire Severity in Zagros Oak (*Quercus Brantii* Lindl.) Forests, Iran, after one Year [J]. *Geoderma*, 2014, 213: 95–102.
- [20] 康宝天, 侯扶江, BOWATTE S. 祁连山高寒草甸和荒漠草原土壤细菌群落的结构特征[J]. *草业科学*, 2020, 37(1): 10–19. [KANG Bao-tian, HOU Fu-jiang, BOWATTE S. Characterization of Soil Bacterial Communities in Alpine and Desert Grasslands in the Qilian Mountain Range [J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(1): 10–19.]
- [21] WARDLE D A, BARDGETT R D, KLIRONOMOS J N, *et al.* Ecological Linkages between Aboveground and Belowground Biota [J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1629–1633.
- [22] TSCHERKO D, HAMMESFAHR U, ZELTNER G, *et al.* Plant Succession and Rhizosphere Microbial Communities in a Recently Deglaciated Alpine Terrain [J]. *Basic and Applied Ecology*, 2005, 6(4): 367–383.
- [23] CHABRERIE O, LAVAL K, PUGET P, *et al.* Relationship between Plant and Soil Microbial Communities along a Successional Gradient in a Chalk Grassland in North-Western France [J]. *Applied Soil Ecology*, 2003, 24(1): 43–56.
- [24] 郭万庆, 徐小逊, 鲁兰, 等. 增温和生物炭添加对麦田土壤养分和微生物生物量的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(5): 611–618. [GUO Wan-qing, XU Xiao-xun, LU Lan, *et al.* Effects of Warming and Biochar Addition on Soil Nutrients and Microbial Biomass in Wheat Fields [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(5): 611–618.]
- [25] GRAYSTON S J, CAMPBELL C D, BARDGETT R D, *et al.* Assessing Shifts in Microbial Community Structure across a Range of Grasslands of Differing Management Intensity Using CLPP, PLFA and Community DNA Techniques [J]. *Applied Soil Ecology*, 2004, 25(1): 63–84.
- [26] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, *et al.* Significant Acidification in Major Chinese Croplands [J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008–1010.
- [27] 王翰琨, 吴永波, 刘俊萍, 等. 生物炭对土壤氮循环及其功能微生物的影响研究进展[J]. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(6): 689–701. WANG Han-kun, WU Yong-bo, LIU Jun-ping, *et al.* A Review of Research Advances in the Effects of Biochar on Soil Nitrogen Cycling and Its Functional Microorganisms [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(6): 689–701.
- [28] 王静, 王磊, 张爱君, 等. 长期增施有机肥对土壤不同组分有机磷含量及微生物丰度的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(9): 1161–1168. [WANG Jing, WANG Lei, ZHANG Ai-jun, *et al.* Effects of Long-Term Organic Fertilization on the Content of Soil Organic Phosphorus Fractions and Abundance of Soil Microorganism [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(9): 1161–1168.]
- [29] TIAN Y Q, LIU J, WANG X H, *et al.* Carbon Mineralization in the Soils under Different Cover Crops and Residue Management in an Intensive Protected Vegetable Cultivation [J]. *Scientia Horticulturae*, 2011, 127(3): 198–206.
- [30] 魏静, 郭树芳, 孙本华, 等. 冬季覆盖作物对潮褐土土壤肥力和微生物学性状的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2018, 34(5): 426–432. [WEI Jing, GUO Shu-fang, SUN Ben-hua, *et al.* Effects of Winter Cover Crops on Soil Nutrients and Microbial Properties of Cinnamon Soil [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, 34(5): 426–432.]
- [31] STARK S, MÄNNISTÖ M K, ESKELINEN A. Nutrient Availability and pH Jointly Constrain Microbial Extracellular Enzyme Activities in Nutrient-Poor Tundra Soils [J]. *Plant and Soil*, 2014, 383(1): 373–385.
- [32] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 14–22. [BAO Shi-dan. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis* [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 14–22.]
- [33] SPARLING G P. Soil Microbial Biomass, Activity and Nutrient Cycling as Indicators of Soil Health [C] // PANKHURST C, DOUBE B M, GUPTA V V S R. *Biological Indicators of Soil Health*. Walling-

- ford, UK: CAB International, 1997.
- [34] 李雪萍, 李建宏, 刘永刚, 等. 甘南草原不同退化草地植被和土壤微生物特性[J]. 草地学报, 2020, 28(5): 1252-1259. [LI Xue-ping, LI Jian-hong, LIU Yong-gang, et al. The Vegetation and Soil Microorganism Characteristics of Different Degraded Grassland in Gannan Steppe [J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(5): 1252-1259.]
- [35] 顾继雄, 郭天斗, 王红梅, 等. 宁夏东部荒漠草原向灌丛地转变过程土壤微生物响应[J]. 草业学报, 2021, 30(4): 46-57. [GU Ji-xiong, GUO Tian-dou, WANG Hong-mei, et al. Responses of Soil Microbes across an Anthropogenic Transition from Desert Steppe Grassland to Shrubland in Eastern Ningxia [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(4): 46-57.]
- [36] 马文文, 姚拓, 靳鹏, 等. 荒漠草原 2 种植物群落土壤微生物及土壤酶特征[J]. 中国沙漠, 2014, 34(1): 176-183. [MA Wen-wen, YAO Tuo, JIN Peng, et al. Characteristics of Microorganisms and Enzyme Activity under Two Plant Communities in Desert Steppe [J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(1): 176-183.]
- [37] 文都日乐, 张静妮, 李刚, 等. 放牧干扰对贝加尔针茅草原土壤微生物与土壤酶活性的影响[J]. 草地学报, 2010, 18(4): 517-522. [WEN Durile, ZHANG Jing-ni, LI Gang, et al. Effect of Grazing Disturbance on Soil Microorganisms and Soil Enzyme Activities of Stipa Baicalensis Rosev. Steppe [J]. Acta Agrestia Sinica, 2010, 18(4): 517-522.]
- [38] HAWKES C V, KIVLIN S N, ROCCA J D, et al. Fungal Community Responses to Precipitation [J]. Global Change Biology, 2011, 17(4): 1637-1645.
- [39] ENGELHARDT I C, WELTY A, BLAZEWCZ S J, et al. Depth Matters: Effects of Precipitation Regime on Soil Microbial Activity Upon Rewetting of a Plant-Soil System [J]. The ISME Journal, 2018, 12(4): 1061-1071.
- [40] 许华, 何明珠, 唐亮, 等. 荒漠土壤微生物量碳、氮变化对降水的响应[J]. 生态学报, 2020, 40(4): 1295-1304. [XU Hua, HE Ming-zhu, TANG Liang, et al. Response of Changes of Microbial Biomass Carbon and Nitrogen to Precipitation in Desert Soil [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(4): 1295-1304.]
- [41] 王理德, 田青, 郭春秀, 等. 不同退耕年限干旱绿洲植被群落及灰棕漠土特性变化[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1436-1447. [WANG Li-de, TIAN Qing, GUO Chun-xiu, et al. Variation of Oasis Vegetation Communities and Properties of Grey Brown Desert Soil Relative to History of "Grain for Green" in Arid Regions [J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(6): 1436-1447.]
- [42] 何洪盛, 田青, 王理德, 等. 青土湖退耕地植被群落特征与土壤理化性质分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 223-232. [HE Hong-sheng, TIAN Qing, WANG Li-de, et al. Study on Vegetation Community Characteristics and Soil Physical and Chemical Properties of Abandoned Land in Qingtu Lake [J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 223-232.]
- [43] WEI Y, YU L F, ZHANG J C, et al. Relationship between Vegetation Restoration and Soil Microbial Characteristics in Degraded Karst Regions: A Case Study [J]. Pedosphere, 2011, 21(1): 132-138.
- [44] 王丰. 武夷山不同海拔植被带土壤微生物量碳、氮、磷研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2008. [WANG Feng. Variations of Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen and Phosphorus along Elevation Gradients in Subtropical Area in Wuyi Mountain [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2008.]
- [45] 王学娟, 周玉梅, 王秀秀, 等. 长白山苔原生态土壤酶活性及微生物生物量对增温的响应[J]. 土壤学报, 2014, 51(1): 166-175. [WANG Xue-juan, ZHOU Yu-mei, WANG Xiu-xiu, et al. Responses of Soil Enzymes in Activity and Soil Microbes in Biomass to Warming in Tundra Ecosystem on Changbai Mountains [J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(1): 166-175.]
- [46] 张利青, 彭晚霞, 宋同清, 等. 云贵高原喀斯特坡耕地土壤微生物量 C、N、P 空间分布[J]. 生态学报, 2012, 32(7): 2056-2065. [ZHANG Li-qing, PENG Wan-xia, SONG Tong-qing, et al. Spatial Heterogeneity of Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Sloping Farmland in a Karst Region on the Yunnan-Guizhou Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(7): 2056-2065.]
- [47] 牛世全, 杨婷婷, 李君锋, 等. 盐碱土微生物功能群季节动态与土壤理化因子的关系[J]. 干旱区研究, 2011, 28(2): 328-334. [NIU Shi-quan, YANG Ting-ting, LI Jun-feng, et al. Seasonal Trends of Microbial Functional Groups in Saline-Alkali Soil and Their Relationship with Soil Physicochemical Factors in the East Hexi Corridor [J]. Arid Zone Research, 2011, 28(2): 328-334.]
- [48] 杨成德, 龙瑞军, 陈秀蓉, 等. 东祁连山高寒灌丛草地土壤微生物量及土壤酶季节性动态特征[J]. 草业学报, 2011, 20(6): 135-142. [YANG Cheng-de, LONG Rui-jun, CHEN Xiu-rong, et al. Seasonal Dynamics in Soil Microbial Biomass and Enzymatic Activities under Different Alpine Brushlands of the Eastern Qilian Mountains [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2011, 20(6): 135-142.]
- [49] 刘纯, 刘延坤, 金光泽. 小兴安岭 6 种森林类型土壤微生物量的季节变化特征[J]. 生态学报, 2014, 34(2): 451-459. [LIU Chun, LIU Yan-kun, JIN Guang-ze. Seasonal Dynamics of Soil Microbial Biomass in Six Forest Types in Xiaoxing'an Mountains, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(2): 451-459.]
- [50] 许华, 何明珠, 孙岩. 不同降水控制对荒漠土壤中可溶性碳、氮组分的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2018, 54(6): 798-803. [XU Hua, HE Ming-zhu, SUN Yan. Effects of Different Precipitation Controls on Soil Dissolved Carbon and Nitrogen Fractions in Desert Region [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2018, 54(6): 798-803.]
- [51] GARCIA F O, RICE C W. Microbial Biomass Dynamics in Tallgrass Prairie [J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(3): 816-823.
- [52] WANG L D. Soil Properties in Different Years of Cultivation Abandonment in the Midstream and Downstream of Shiyang River Area [J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2019, 17(4): 7561-7572.

作者简介: 王理德(1969—), 男, 甘肃民勤人, 研究员, 博士, 主要从事生物多样性及水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: wldzy69@163.net

(责任编辑: 陈 昕)