

DOI: 10.11766/trxb202003160121

王理德, 田青, 郭春秀, 吴昊, 宋达成, 何芳兰, 何洪盛. 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 Lide, TIAN Qing, GUO Chunxiu, WU Hao, SONG Dacheng, HE Fanglan, HE Hongsheng. 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.

不同退耕年限干旱绿洲植被群落及灰棕漠土特性变化*

王理德^{1,2,3}, 田青¹, 郭春秀^{2,3}, 吴昊^{2,3}, 宋达成^{2,3}, 何芳兰^{2,3},
何洪盛¹

(1. 甘肃农业大学林学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃治沙研究所, 兰州 730070; 3. 甘肃河西走廊森林生态系统国家定位观测研究站, 甘肃武威 733000)

摘要: 为了探讨不同退耕年限对植被恢复及土壤特性的影响, 选择民勤绿洲不同年代退耕地 (1, 2, 4, 8, 13, 20, 30, 40 年) 和耕地 (对照 CK) 为研究对象, 运用时空替代法, 测定并系统分析其植被组成、土壤理化特性、土壤微生物特性和土壤酶活性。结果表明: 在 40 年退耕地植被自然演替过程中, 9 个样地 (包括一个 CK) 的所有样方中共出现 43 种植物, 植被群落由一年生草本植物逐渐演替为单一的灌木, 表现出较强的连续性与递进性。随着退耕年限的增加土壤含水率先降再升后降的趋势, 总体呈倒“N”字型变化。土壤容重总体表现为逐渐减小; 土壤粒径变化规律不明显, 各样地细砂粒占比最大, 黏粒最少; 土壤全氮、速效钾、土壤有机质含量及土壤微生物量碳呈先上升后下降趋势, 速效磷含量变化不明显, 但是变化幅度较大; 细菌与放线菌数量不同程度的减少, 细菌是土壤中主要的微生物类群, 最大数量达到 611.46×10^5 cfu.g⁻¹; 土壤酶活性随退耕年限延长呈波动式下降。随着土层深度增加, 土壤容重、土壤养分及土壤微生物总体表现为逐渐减小, 表聚现象明显; 通过退耕地聚类谱系图可以推断出退耕第 4 年是民勤绿洲退耕地恢复治理的关键时期。

关键词: 植被恢复; 理化特性; 微生物特性; 退耕地; 民勤绿洲

中图分类号: Q143; S154.36 **文献标志码:** A

Variation of Oasis Vegetation Communities and Properties of Grey Brown Desert Soil Relative to History of “Grain for Green” in Arid Regions

WANG Lide^{1,2,3}, TIAN Qing¹, GUO Chunxiu^{2,3}, WU Hao^{2,3}, SONG Dacheng^{2,3}, HE Fanglan^{2,3}, HE Hongsheng¹

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural university, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou 730070, China; 3. Gansu Hexi Corridor Forest Ecosystem National Research Station, Wuwei, Gansu 733000, China)

* 国家自然科学基金项目 (31760709) 甘肃省民生专项 (20CK4FH018) 甘肃省青年科技基金项目 (18JR3RA019) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.31760709), Gansu Provincial Livelihood Project (No.20CK4FH018), Gansu Provincial Youth Science and Technology Fund Project (No. 18JR3RA019)

通信作者 Corresponding author, E-mail: guochunxiu0414@163.com

作者简介: 王理德 (1969—), 男, 甘肃民勤人, 研究员, 博士, 硕士生导师, 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

收稿日期: 2020-03-16; 收到修改稿日期: 2020-11-22; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2021-02-25

Abstract: 【Objective】 Effects of the implementation of the “Grain for Green” policy, relative to history, on oasis vegetation composition, soil physical, chemical and microbial properties, and soil enzyme activities were analyzed. 【Method】 To that end, plots of lands different in “Grain for Green” history (1, 2, 4, 8, 13, 20, 30 and 40 a) and a plot of farmland as CK in the Minqin Oasis were cited for exploration of effects of the practice on vegetation restoration and soil properties, using the spatial-temporal substitution method. 【Result】 Results show that in the 9 plots (including CK), representing natural succession of vegetation during a period of 40 years, a total of 43 species of plants were observed, and the vegetation evolved gradually from a community of annual herbaceous plants to that of shrubs only, showing strong continuity and progressiveness. With the increase in age, soil moisture content declined first, then rose and declined again, appearing like an inverted “N” in variation trend, and was higher in the upper soil layer than in the lower layer in the plots over 20 years in age; soil bulk density decreased gradually on the whole; soil particle size composition did not show any regular trend in variation, and was dominated with fine sands rather than clay; soil total nitrogen, soil available potassium, soil organic matter and soil microbial biomass carbon all rose first and then declined in content, while soil available phosphorus did not change much in content, but did in margin; soil bacteria and actinomycetes decreased to a different degree in population; with bacteria being in dominancy and reaching up to 611.46×10^5 Cfu.g⁻¹; and soil enzyme activities fluctuated, but on a generally declining trend. Moreover, with increasing soil depth, soil bulk density, soil nutrient contents and soil microorganisms generally decreased, and the phenomena of surface accumulation was quite obvious. 【Conclusion】 The cluster pedigree chart of the plots demonstrates that the 4th years after the “Grain for Green” practice was implemented are critical for the land to have vegetation recovered in the Minqin Oasis. All the findings in the experiment may serve as a practical and theoretical basis for conservation and restoration of ecosystems in arid oases.

Key words: Vegetation restoration; Physicochemical properties; Microbiologic properties; “Grain for Green” land; Minqin Oasis

民勤绿洲曾经是植被茂密、水草丰美的天然绿洲^[1]。然而，近几十年，随着人口数量与经济规模的不断扩大，尤其是人工绿洲的扩张，下游地表水资源日趋减少，地下水严重超采，矿化度上升，自然植被受到了毁灭性的干扰和破坏，土地沙漠化、盐渍化等一系列生态问题日趋加剧^[2-3]，致使大面积土地弃耕而撂荒，若这些退耕地管理方式不当，会加快土壤退化速度，引起风蚀沙化，成为新的沙尘源，形成恶性循环，严重破坏石羊河中下游退耕地土壤生态系统^[4]。因此，如何合理保护和恢复民勤绿洲退耕地，促进该地区生态环境保护、修复和改善是亟待解决的生态问题。

土壤是生态系统发生变化的载体和植物生长的基质^[5]，其理化性质、生物学性质是反映土壤生态系统恢复程度的关键指标^[6]。土壤微生物在土壤生态系统中主要分解动植物残体，并参与物质循环和能量流动，是土壤养分的供应源和贮存库，影响植被演替及土壤质量的变化^[7]。土壤微生物数量用于研究和评价土壤微生物调控功能，能反映土壤各因素对土壤微生物的影响和其对植物生长、土壤肥力的影响，并对整个生态系统具有一定的调节作用^[8]。

土壤微生物量是活的土壤有机质部分，是土壤活性大小的标志，是土壤生态系统变化的预警指标之一^[9]。土壤酶是生态系统的生物催化剂，也是度量生态系统生态功能恢复与维持不可缺少的关键指标^[10]，与土壤理化性质、土壤类型、施肥、耕作以及其他农业措施等密切相关^[11]，其活性在土壤中的表现一定程度上反映了土壤营养状况，与环境等外界因素具有显著的相关性，成为土壤生态系统变化的敏感指标^[12]。目前，对于沙地绿洲演变的研究主要集中在土壤理化性质^[13]与植被演替^[14]，然而已有研究并未将植被、土壤理化特性、土壤微生物及土壤酶演变进行系统研究。土壤质量并不是一个单一的概念，包括了土壤理化特性、土壤微生物特性及土壤酶活性^[15]，且土壤特性影响植被生长发育及群落结构演替，反过来植被凋落物和根系分泌物影响土壤特性的变化^[16]。基于此，本文通过研究民勤绿洲不同年限退耕地土壤理化性质、微生物学性质及土壤酶活性的变化特征及植被群落演替，探讨民勤绿洲退耕地土壤演变规律，旨在为该区域退耕地的管理提供实践参考，为干旱绿洲生态系统的持续健康发展提供科学依据。

1 材料与方方法

1.1 研究区概况

研究区位于石羊河下游的甘肃省民勤县西渠镇,地理坐标为 103°35′7.29″~103°37′55.49″ E、39°01′44.11″~39°03′57.53″ N,海拔 1 302~1 308 m。年日照时数 2 832 h,年均温度 7.4℃,极端最高气温 38.1℃,极端最低气温-28.8℃,昼夜温差大;年均降水量 110 mm,年内分布不均匀,73%的降雨量集中在 7—9 月;年均蒸发量 2 644 mm;年平均风速 2.3 m·s⁻¹。该区域土壤均为灰棕漠土,所选实验样地退耕前为种植茴香 (*Foeniculum vulgare* Mill.) 的农田,退耕后在自然状态下自然演替,未进行过人工干预,附近居民已经搬迁或者移民。灌木种主要有黑果枸杞 (*Lycium ruthenicum*)、盐爪爪 (*Kalidium foliatum*)、小果白

刺 (*Nitraria sibirica*) 等;草本植物有地肤 (*Kochia scoparia*)、中亚滨藜 (*Atriplex centralasiatica* Iljin)、白茎盐生草 (*Halogeton arachnoideus*)、碱蓬 (*Suaeda glauca*) 等。

1.2 样地布设

2017 年 10 月,走访调查当地农户和查阅西渠镇煌辉村与志云村退耕土地使用记录。采用空间替代时间的方法,在集中连片的退耕地上,选择植物生长均匀、微地形差异较小,并且土壤没有因自然因素而导致地形的变迁或因人为因素而引起的土壤物质再分配的地段,分别选择退耕年限为 1, 2, 4, 8, 13, 20, 30, 40 年和耕地作为对照的 9 个样地 (表 1),用 GPS 定位,样地面积为 1 hm² (100 m×100 m)。每个样地内选 5 个 10 m×10 m 的样方 (调查植被),在每个样地中以 S 形方法布设 5 个土样采集点,做好标记。

表 1 不同退耕年限样地状况

Table 1 Status of the plot relative to "Grain for Green" history

退耕年限 Restoration years/a	海拔 Altitude/m	经度 Longitude	纬度 Latitude	群落优势种 Dominant plants species
CK	1 308	103°35′14.01″E	39°03′52.00″N	茴香
1	1 306	103°35′7.29″E	39°03′57.53″N	地肤 + 中亚滨藜
2	1 307	103°35′9.84″E	39°03′51.62″N	白茎盐生草 + 地肤 + 中亚滨藜
4	1 308	103°35′10.89″E	39°03′50.80″N	碱蓬 + 地肤 + 小果白刺
8	1 305	103°36′8.92″E	39°03′25.13″N	小果白刺 + 黑果枸杞
13	1 306	103°36′18.18″E	39°02′30.29″N	黑果枸杞
20	1 308	103°37′1.85″E	39°01′44.11″N	黑果枸杞
30	1 302	103°37′29.73″E	39°02′39.51″N	黑果枸杞 + 盐爪爪
40	1 303	103°37′55.49″E	39°02′54.31″N	黑果枸杞 + 盐爪爪

1.3 土壤样品采集

2018 年 9 月 19—20 日,在每个样地内布设 5 个土样采集点,在剖面按 0~20 cm、20~40 cm 两个层次用环刀取土样,用于容重及土壤含水率测定;将同一样地五个土样取 3 个重复,每个重 1 kg 左右,装入布袋中,带回实验室风干处理,用于测定土壤理化性质;同时每个样品取重 1 kg 左右,装入无菌袋放于带冰块泡沫箱内,带回实验室,贮存于 4℃ 冰箱,用于土壤微生物及土壤酶活性的测定。

1.4 植物群落调查

在 5 m×5 m 固定样方中,调查草本植物个体数、物种数、物种组成、测定草本植物的盖度;在 10 m×10 m 的样方中,调查半灌木、灌木的个体数、物种数、亚优势种、建群种,并测定植被盖度。

1.5 土壤分析测定

土壤理化性质采用常规方法^[17]测定。土壤水分—恒温箱烘干法;土壤容重—环刀法;土壤粒径—粒度仪测定;全氮—凯氏蒸馏法;速效钾—原子吸收分光光度法;速效磷—钼锑抗比色法;土壤有机

质—重铬酸钾—硫酸外加热法。

土壤微生物数量采用平板表面涂抹法计数测定^[18]；细菌数量采用牛肉膏蛋白胨琼脂培养基测定；真菌数量采用马丁—孟加拉红培养基测定；放线菌数量采用改良高氏一号培养基测定。土壤微生物量采用氯仿熏蒸法^[18]测定。土壤酶活性采用过氧化氢酶活性—容量法测定^[19]；脲酶活性采用靛酚蓝比色法测定；蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定；磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定。

1.6 数据处理

Shannon 多样性指数：

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

Pielou 均匀度指数：

$$E = \frac{H}{\ln S} \quad (2)$$

Simpson 优势度指数：

$$C = \sum_{i=1}^S \frac{N_i(N_i - 1)}{N(N - 1)} \quad (3)$$

Margalef 丰富度指数：

$$D_{MG} = \frac{S - 1}{\ln N} \quad (4)$$

式中， P_i 为频度， S 为类群数目， N_i 为第 i 个类群的个体数， N 为所有类群的总个体数。

土壤酶活性加权平均值：

$$G_m = \sum_{k=1}^n V_{ik} \cdot \omega_{ik}, \quad \omega_{ik} = \frac{V_{ik}}{\sum ik}$$

式中， ω_i 为权重系数，将土壤酶活性各性状记作 X_{ik} (i 表示退耕年限， $i=1, 2, \dots, 9$ 分别表示 CK 及退耕 1 年、2 年、4 年、8 年、13 年、20 年、30 年、40 年； k 表示土层深度， $k=1, 2$ 分别表示 0~20 cm、20~40 cm 土层； m 为土壤酶活性指标数。

试验数据先使用 Excel 2007 软件进行统计整理，用 SPSS 18.0 软件进行分析处理，不同年代退耕地土壤理化性质、土壤微生物数量、微生物量及

土壤酶活性差异显著性采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 检验。

2 结果与讨论

2.1 退耕地植被自然演变特征

退耕年限的延长，必然改变植被群落组成与植物数量，导致凋落物和根系生物量的改变，对土壤系统产生较大的影响^[20]。在研究区共出现 43 种植物，分属 15 科 29 属。由表 2 可知，在退耕地植物群落自然演替过程中，物种多样性指数和丰富度指数呈现出先增大，后波动式减小的规律；均匀度指数呈波动式增大的规律，在退耕第 4 年达到峰值，8~40 年基本趋于稳定；而优势度指数呈减小趋势。这说明退耕 1~4 年植被群落物种数在逐年增加，生态环境有所改善，退耕 4 年后植被逐年减少，不利于生态环境修复。此外，研究还发现，不同年限退耕地植被的演替可分为如下 4 个阶段：第一阶段（退耕 1~2 年）为一年生草本和宿根植物迅速恢复阶段；第二阶段（退耕 2~8 年）为一年生草本植物向多年生草本演替阶段；第三阶段（退耕 8~20 年）多年生草本向多年生灌木演替阶段；第四阶段（退耕 20 年以后）灌木植物稳定阶段。可见民勤绿洲退耕地植被自然演变过程具有较强的递增性。此外，从物种组成来看，在退耕 40 年的所有样方中均出现黑果枸杞这种灌木，说明研究区植被自然演变还具有很强的连续性。其结果与王方琳等^[14]、马俊梅等^[21]对干旱荒漠区植被演替研究结果相似，而与李永强等^[22]对草甸草原撂荒地植被演替研究结果不同，这可能是由于研究区不同气候、土壤因子等环境状况的差异造成。总的来看植被演替过程比较缓慢这是所有学者的共识，只是植被自然演变特征有所差异^[23]。

2.2 退耕地土壤理化性质变化特征

2.2.1 土壤含水率和土壤容重变化特征 土壤水分是干旱荒漠植物生长的主要因素，同时对土壤真菌、土壤微生物量碳有着显著的相关性，对土壤质量的影响较大^[24-25]。由表 3 可知：民勤绿洲不同年限退耕地土壤含水率在相同土层深度，随着退耕年限的增加经历了：降低（CK~8 年）—升高（8~13 年）—降低（13~40 年）并趋于稳定的一个变化过程，且第 8 年土壤含水率平均值达到最小。土壤含

水率空间分布表现为：退耕初期（CK~2年）表层土壤含水率低于深层，退耕中后期，表层土壤含水率高于或者约等于深层。这是由于随着退耕年限延长植被覆盖度下降，地表裸露^[25]，蒸发量增大，再加上退耕初期植被为一年生草本和宿根植物迅速恢复阶段，主要吸收表层水分，表层土壤水分对植物生长贡献较大。退耕8年左右，因为降水和自然沉

积共同作用，使土壤结构不断恢复，土壤毛管水有效贮存^[24]，加之退耕中后期，植被逐渐由草本植物演替为灌木植物，此类植物根系可在较深的土层中获取水分，而表层土壤含水率对其贡献较小^[26]，导致土壤含水率整体呈倒“N”字型分布的变化趋势，并且表层土壤含水率高于或者约等于深层，随着退耕年限的延长这种变化趋势会得到缓解。

表2 不同年限退耕地植被群落变化特征

Table 2 Vegetation community of the plot relative to "Grain for Green" history

多样性指数 Diversity index	退耕年限 "Grain for Green" history / a							
	1	2	4	8	13	20	30	40
个体数 Individual number (N)	1 125	1 516	405	863	2 172	3 455	567	652
类群数 Group number (S)	20	19	20	14	14	13	6	8
Shannon 多样性指数	1.81	2.576	3.447	2.481	1.839	2.194	1.652	2.221
Pielou 均匀度指数	0.419	0.606	0.798	0.652	0.483	0.593	0.639	0.74
Simpson 优势度指数	0.409	0.234	0.112	0.239	0.412	0.277	0.335	0.251
Margalef 丰富度指数	1.875	1.704	2.194	1.333	1.173	1.021	0.547	0.749

表3 不同年限退耕地土壤含水率和土壤容重的差异

Table 3 Soil water content and soil bulk density of the plot relative to "Grain for Green" history

退耕年限 "Grain for Green" history / a	含水率 Moisture content/%		容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)	
	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm
CK	0.11±0.01ab	0.117±0.015a	1.73±0.04a	1.70±0.05a
1	0.078±0.007cde	0.088±0.012abc	1.51±0.13bc	1.52±0.13b
2	0.074±0.003de	0.078±0.007bcd	1.53±0.10bc	1.68±0.03ab
4	0.070±0.017de	0.065±0.006bcd	1.68±0.03b	1.62±0.04ab
8	0.059±0.005e	0.060±0.006cd	1.60±0.05ab	1.61±0.01ab
13	0.126±0.031a	0.115±0.019a	1.29±0.16d	1.62±0.08ab
20	0.094±0.011abc	0.066±0.035ab	1.38±0.05bc	1.64±0.106ab
30	0.103±0.016de	0.093±0.016d	1.45±0.04bc	1.57±0.10ab
40	0.068±0.008bcd	0.053±0.011bcd	1.48±0.06cd	1.54±0.11ab

注：同列不同小写字母表示不同年限退耕地差异显著 ($P<0.05$)，下同。Note: The different lowercase letters in the same column indicate significant difference between plots different in "Grain for Green" history ($P<0.05$). The same below.

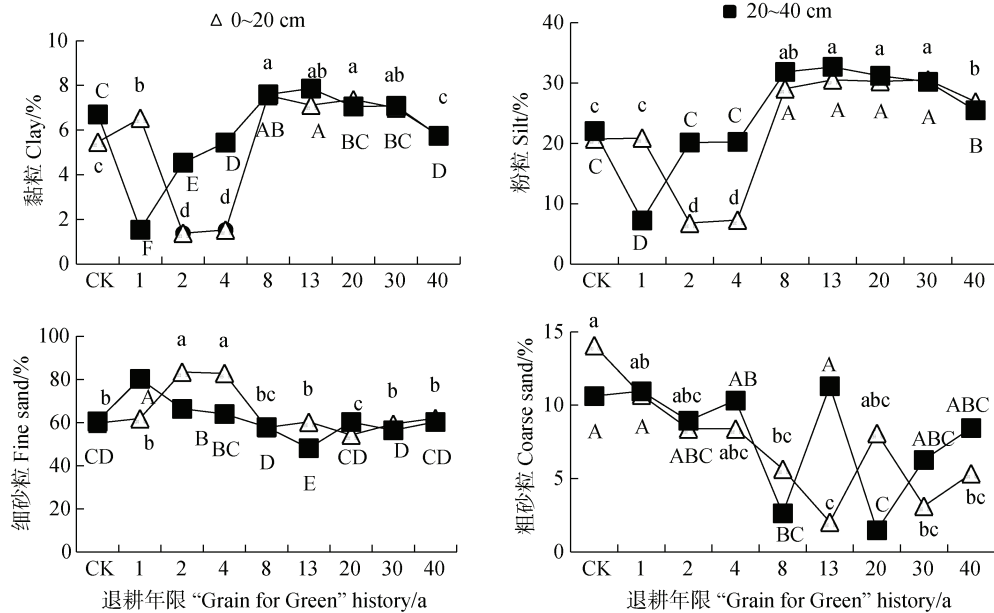
土壤容重是判断土壤结构及评价土壤退化程度的重要指标^[27]。由表3可以看出，退耕初期表层土壤容重逐年增加，退耕4年时达到极大值1.68 g·cm⁻³，随后逐渐减小，并趋于稳定。20~40 cm土层除CK与退耕1年外，变化不明显，差异不显著。表层土壤容重值大于或者约等于深层。这一结果基

本与Guo等^[28]研究结果相似，这主要是退耕初期一年生或者多年生草本大量繁殖^[14]，增加了地表凋落物及腐殖质层，同时也增加了根系分泌物^[29]，从而降低了土壤表层容重，渗透能力增强^[30]。

2.2.2 土壤机械组成变化特征 土壤机械组成是衡量抗侵蚀能力与保持土壤肥力的主要指标^[31-32]。

由图 2 可知, 退耕区各样地细砂粒含量最大, 其比值均在 50% 以上, 最大值达到了 83.4%, 黏粒的含量最小, 其比值均小于 10%, 最小值只有 1.4%。随退耕年限延长, 土壤黏粒、粉粒逐渐减少, 其平均值在退耕 2a 达到最小值, 然后逐渐增加, 并趋于稳定。细沙粒在退耕初期 (1~2a) 比例较大, 然后逐渐减小, 退耕 4 年后逐渐趋于稳定。粗沙粒呈现出先减小, 后增大的趋势, 并且除退耕 30 年、40 年

外, 其他各样地具有显著差异。0~20 cm 土层变化幅度较大。出现这一变化的原因可能是随退耕年限的延长植被丰富度指数和多样性指数呈不同程度的降低^[14], 特别退耕 4~8 年后草本植物逐渐退出, 土壤裸地面积逐渐增加, 加之民勤绿洲风大^[28], 样地沙化及风蚀作用增强, 而土壤砂粒不易被风蚀, 特别是表层由于强烈的风蚀作用, 最终导致了土壤黏粒含量减少, 细砂粒含量增大的现象^[33]。



注: 图中不同小写字母表示不同年限退耕地差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示差异极显著 ($P < 0.01$)。Note: The different lowercase letters indicate significant difference between plots different in "Grain for Green" history ($P < 0.05$), and different uppercase letters mean extremely significant difference ($P < 0.01$).

图 1 不同年限退耕地 0~40 cm 土层土壤机械组成

Fig. 1 Soil mechanical composition of the 0~40 cm soil layer of the plot relative to "Grain for Green" history

2.2.3 土壤养分变化特征 随着土层的加深, 土壤养分总体呈现逐渐降低趋势 (如表 4), 表聚现象明显。这主要是由于植物在地表形成枯枝败叶层, 分解产生的养分聚集在土壤表层, 然后随着水分或者其他介质扩散至土壤深层^[34], 导致表聚现象的产生。退耕初期土壤全氮与土壤有机质含量在 0~20 cm 土层中, 随退耕年限的增加逐渐增大, 退耕 4 年时分别达峰值 $0.36 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $13.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 然后逐渐下降; 在 20~40 cm 土层中总体表现为逐渐减小趋势, 退耕 20 年趋于稳定。这一结果与唐梦迎等^[35]研究结果相似。这是由于退耕 4 年植被 Shannon 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数均达到峰值, 植被数量和种类较多, 土壤表层产

生的枯枝落叶层较厚, 导致全氮含量在退耕 4 年达到最大值 $0.36 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。随后植被覆盖度逐渐降低, 而且群落中灌木逐渐增加, 其根系主要吸收深层土壤, 因此上下层土壤中全氮与土壤有机质含量逐渐下降。速效钾在退耕初中期呈上升趋势, 上下土层的峰值 $411 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $393 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 分别出现在第 13 年和 20 年, 然后随着退耕年限的增加逐渐下降。这一结果与隋媛媛等^[36]在黄土丘陵区撂荒群落中的研究相一致, 本实验区属于富钾土壤, 再加上退耕前期产生的大量枯枝落叶, 分解产生速效钾导致速效钾上升, 退耕后期植被覆盖度逐渐降低, 而且群落中灌木逐渐增加, 其根系主要吸收深层土壤, 因此上下层土壤中速效钾含量逐渐下降。速效磷含量变

化较大, 特别在表层土壤中, 退耕 1 年后就由 CK 的 $0.039 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 下降至 $0.014 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。随着退耕年限的延长, 表现出下降 (1~2 年) — 上升 (2~13 年) — 下降 (13~40 年) 的趋势, 且上下两层土壤均在

13 年出现极大值 $0.015 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.007 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。其变化趋势与由政等^[37]研究结果相似, 峰值出现的时间不同主要是由于试验样地的植被类型、气候、土质差异, 导致峰值出现的退耕年限不同。

表 4 不同年限退耕地土壤养分变化

Table 4 Soil nutrient contents of the plot relative to "Grain for Green" history

退耕年限 "Grain for Green" history / a	全氮 Total N / ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)		速效磷 Avail P / ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)		速效钾 Avail K / ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)		有机质 Organic matter / ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	
	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm
	CK	0.23ab	0.21a	0.039bc	0.005b	227c	189d	12.3ab
1	0.32c	0.29bc	0.014bcd	0.005b	142ab	132cd	12.7bc	12.6cd
2	0.24a	0.22ab	0.010bcd	0.002ab	159ab	152d	11.6a	9.0bc
4	0.36bc	0.26bc	0.010bcd	0.003ab	148b	112cd	13.5cd	9.2b
8	0.25c	0.21c	0.011b	0.005a	234a	154a	10.6de	9.3bcd
13	0.22c	0.21d	0.015cd	0.007ab	411ab	377bc	9.3e	8.7bcd
20	0.18c	0.17cd	0.009d	0.006ab	393a	393bc	7.7e	7.1d
30	0.18c	0.15cd	0.008bcd	0.003ab	199a	262ab	8.3e	7.9cd
40	0.17c	0.18c	0.005a	0.004ab	337ab	263cd	8.4abc	6.9b

2.3 土壤微生物变化特性

土壤微生物在生态功能和生态系统服务中发挥着积极的调节作用^[38-39], 促进植物凋落物分解、土壤能量转移、养分循环与平衡、土壤理化性质改善及林分发育^[40]。由表 5 可见, 土壤微生物数量随退耕年限的延长, 细菌及放线菌所占比例不同程度的减少, 真菌变化规律不明显, 其中细菌所占比例最大, 而真菌所占比例最小。土壤细菌数量随退耕年限延长呈波动性下降的趋势, CK 均值 $377.64 \times 10^5 \text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ 显著高于其他年限退耕地 ($P < 0.05$), 退耕 13 年降至极小值 $22.11 \times 10^5 \text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$, 只有 CK 的 5.8%; 除退耕 1 年外, 随土层深度的增加呈减小趋势。真菌数量在 0~20 cm 土层, CK 值 $48.11 \times 10^3 \text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ 显著高于其他年限退耕地 ($P < 0.05$), 在上下层土壤中随着退耕年限的增加变化规律不明显, 退耕 30 年、13 年分别降至极小值 $0.64 \times 10^3 \text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $0.61 \times 10^3 \text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$; 除退耕 2 年、4 年和 30 年外, 随土层深度的增加呈减小趋势。放线菌数量总体表现为随着土层的加深与随退耕年限的延长逐渐下降, 退耕 13 年降至最小值 $0.15 \times 10^5 \text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $0.11 \times 10^5 \text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$, 然后波动式上升, 最后趋于稳定。土壤中细菌数量主要是微生物类群, 最大数量达 $611.46 \times 10^5 \text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$, 其

次是放线菌, 真菌最少, 这可能是因为本研究区土壤呈微碱性, 有利于细菌和放线菌生长, 而真菌在微碱性的环境中生长较差, 这与 Wang 等^[41]、谭秋锦等^[42]前期研究结果相一致。不同退耕年限土壤细菌、真菌及放线菌数量最大值均在退耕初中期, 这是由于退耕初中期农田耕作、施肥等农业管理措施刚停止或停止时间不长, 土壤表层良好的水分条件和通气状况, 加之土壤养分含量较高, 使微生物活动旺盛, 土壤微生物数量增加导致其比例相应的增加。

随着土层加深, 土壤微生物量逐渐降低, 表聚现象十分明显 (表 5)。随退耕年限的延长, 上下两层土壤中 SMBC 呈波动式先上升 (1~13 年) 后下降 (13~30 年) 趋势, 不同退耕年限间差异显著 ($P < 0.05$), 退耕 13 年达到最大值 ($459.29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $288.32 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 30 年降至最小值 ($67.24 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $49.84 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。SMBN 先上升, 0~20 cm、20~40 cm 土层分别与退耕 2 年、20 年达到最大值 $69.51 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $47.02 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 然后逐渐下降, 最后趋于稳定。SMBP 在 0~20 cm 土层中先上升, 退耕 2 年时达到最大值 $49.47 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 然后随着退耕年限的延长逐渐下降, 至退耕第 8 年时降至最小值 $8.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 最后逐渐上升达到稳定状态; 在 20~40 cm

土层中先上升(1~4年),再下降,至退耕第8年时降至最小值 $3.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,然后逐渐上升,退耕20年达到最大值 $15.63 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,最后逐渐下降,趋于稳定。退耕第13年上下两层土壤SMBC含量均最高,SMBN和SMBP含量在退耕2a表层达到最大值,退耕20年深层达到最大值,且显著高于其他退耕年限($P<0.05$),这可能是由于退耕2年是一年生草本和宿根植物迅速恢复的高峰期^[21],表层聚集大量

枯枝落叶,使土壤有机质丰富,且该层水热和通气状况良好^[43],为微生物生长和繁殖提供适宜的环境,促进了微生物的生物活性。由表2可知退耕第13年是多年生草本向多年生灌木演替的高峰期,多年生草本逐渐死亡,根系慢慢腐烂回归表层土壤中,多年生灌木植物成为优势种,深层根系分泌物增加,使土壤养分不断积累,导致退耕第13年上下两层SMBC含量增加。

表5 不同退耕年限土壤微生物学特性

Table 5 Soil microbial properties of the plot relative to "Grain for Green" history

退耕年限 "Grain for Green" history /a	细菌 Bacteria/ ($\times 10^5 \text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$)		真菌 Fungi/ ($\times 10^3 \text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$)		放线菌 Actinomycetes/ ($\times 10^5 \text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$)		微生物生物量碳 SMBC/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)		微生物量氮 SMBN/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)		微生物量磷 SMBP/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	
	0~	20~	0~	20~	0~	20~	0~	20~	0~	20~	0~	20~
	20cm	40cm	20cm	40cm	20cm	40cm	20cm	40cm	20cm	40cm	20cm	40cm
CK	611.46b	143.82ab	48.11c	3.03a	34.87b	16.75b	124.17ab	91.31a	21.33a	14a	28.09bc	3.2a
1	67.95a	178.48bc	32.82bc	3.11a	30.87ab	15.37ab	290.16cd	218.39b	46.69ab	22.02ab	37.97cd	4.39a
2	130.54a	80.48ab	2.79a	12.41a	17.42ab	4.95ab	346.7d	122.94a	69.51b	31.81ab	49.47e	6.45ab
4	87.59a	87.56ab	25.18b	66.52b	26.27ab	12.5ab	277.7cd	231.16b	34.95ab	17.7ab	17.96cb	9.5ab
8	201.87a	113.32ab	31.47bc	16.82a	25.84ab	12.58ab	300.3cd	233.19b	56.36ab	30.87ab	8.5a	3.3a
13	26.30a	17.92a	0.98a	0.61a	0.15a	0.11a	459.29e	288.32b	27.82ab	18.46ab	37.23cd	13.33b
20	50.87a	49.83ab	16.49b	10.73a	3.67ab	1.86ab	288.37cd	217.24b	60.22ab	47.02b	22.24bc	15.63b
30	24.16a	17.92a	0.64a	2.49a	0.34a	0.19a	67.24a	49.84a	54.33ab	44.74ab	9.21ab	5.52ab
40	94.94a	28.24ab	18.33ab	10.36a	12.06b	5.77ab	192.17bc	117.65a	39.95ab	21.16ab	23.55bc	6.05ab

2.4 土壤酶活性变化特征

土壤酶直接参与土壤养分矿化分解、能量转化过程,是具有高度专一催化作用的一种蛋白质,是评价土壤质量变化的重要生物指标^[44]。为了精确研究土壤酶在民勤退耕地演替过程中的变化特征,将研究区8个样地(1年,2年,4年,8年,13年,20年,30年,40年)和CK,两个土层酶活性进行了加权平均(表6)。分析可知不同年限退耕地过氧化氢酶活性波动式变化,加权平均值的最大值 $2.505 \text{ mL}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 出现在第8年,最小值 $0.73 \text{ mL}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 出现在第40年,并且差异不显著。脲酶活性呈现出随着退耕年限的增加而波动式减小趋势,退耕前期、中期与末期差异显著($P<0.05$),退耕8年年后,降幅较大,酶活性明显减小,趋于相对平稳,退耕20年前后,降到加权平均值的最大

小值 $0.001 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$ 。蔗糖酶活性总体表现出随着退耕年限的增加波动减小的趋势,最后趋于稳定。退耕1年时,蔗糖酶活性处于加权平均值的最大值 $0.415 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$,退耕20年时,降至最小值 $0.103 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$,但差异不显著。磷酸酶活性呈现出随着退耕年限的增加而波动式减小,最后相对平稳的趋势。退耕1年时,其酶活性处于加权平均值的最大值 $0.024 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$,然后逐渐减小,退耕40年时,降至最小值 $0.003 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$,差异显著($P<0.05$)。不同年限退耕地自然恢复过程中,研究参试酶的活性,虽变化规律不一致,但总趋势随退耕地恢复年限延长,表现出波动式下降趋势。四种土壤酶加权平均值的最大值均出现在退耕前期与中期,这是由于土壤酶活性与退耕地植被恢复及土壤理化性质存在显著相关^[25,45],其活性很

大程度依赖于有机质的存在^[11],退耕前期耕作施肥刚刚停止,同时一年生草本植物产生大量枯枝落叶,使土壤有机质和其他相关因子含量较高,提供了大量的酶促反应底物,土壤酶活性增强;退耕 8

年以后,植被覆盖率下降,土壤中留存的速效钾、土壤有机质等与之相关的理化因子含量下降,酶的转化和分解过程减弱,循环变慢,酶活性功能也随之减小^[46]。

表 6 不同退耕年限土壤酶活性

Table 6 Soil enzyme activities of the plot relative to "Grain for Green" history

退耕年限 "Grain for Green" history / a	过氧化氢酶 Catalase / [mL·(g·h) ⁻¹]	脲酶 Urease / [mg·(g·d) ⁻¹]	蔗糖酶 Sucrase / [mg·(g·d) ⁻¹]	磷酸酶 Phosphatase / [mg·(g·d) ⁻¹]
CK	2.178a	0.021b	0.414a	0.020b
1	2.289a	0.035a	0.415a	0.024a
2	2.247a	0.025b	0.244a	0.017b
4	2.262a	0.027b	0.363a	0.018b
8	2.505a	0.021b	0.342a	0.021ab
13	2.220a	0.002c	0.142a	0.005d
20	2.373a	0.001c	0.103a	0.005d
30	2.382a	0.005c	0.205a	0.010c
40	2.190a	0.002c	0.239a	0.003d

注:表中数据均为不同土层(0~20 cm, 20~40 cm)各指标的加权平均值。Note: The data in the table are the weighted average of each index of the soil layer relative to depth (0~20 cm, 20~40 cm) .

2.5 退耕地土壤系统演变特性

为了更加系统研究民勤绿洲退耕地灰棕漠土变化特征以及退耕地土壤系统演变规律,对研究区内退耕 1~40 年左右 24 个样地土壤物理性质、微生物特性及土壤酶活性等相关土壤因子进行聚类分析。以距离系数阈值 15 作为分类标准,试验样地可分为两大类:退耕 1~8 年退耕地为第一类;退耕 13~40 年退耕地为第二类;退耕 8~13 年是退耕地从第一类向第二类转变的过程,也就是土壤系统由量变向质变转化的过程。从聚类分析结果可以看出,退耕 1~4 年土壤特性十分相近,退耕 8 年样地与退耕 1~4 年样地土壤特性虽有不同,但差别不大,可以归为一类;退耕 13 年后,土壤特性与前 8 年样地产生了较大差别,可能发生了质的变化,所以退耕 13~40 年土壤归为另一类。可见,在民勤绿洲退耕地演变过程中,4 年、8 年及 13 年左右分别是三个关键时期。该地区干旱少雨^[2-4]、土壤非常瘠薄^[24],退耕初期,由于之前农业生产中施入的水、肥尚有残余,因此退耕地土壤性质呈正向发展,但随着退耕年限的延长,残存水、肥逐渐耗减,土壤微生物数量相

对较少^[41],植物残体分解缓慢,因而水、肥下降,土壤性质开始呈负向发展。民勤绿洲农田退耕后,第 4 年时,物种丰富度与多样性指数明显下降^[14],土壤养分流失、盐渍化程度变高^[25],机械组成粗化、微生物数量与微生物生物量减少、酶活性减弱、抗干扰能力减少等诸多问题。因此,在退耕后 4 年左右是个关键时期,应该采用基于抗阻阻沙覆盖度指标、节水造林种草、菌肥改土等先进生态修复技术,以自然修复并辅以人工措施,形成近自然植被承载力、健康稳定和可持续发展的退耕地生态修复体系,在提高区域防沙治沙效能的同时,提升绿洲生产力,改善民生环境,为干旱绿洲区退耕地保护、治理及风沙灾害防治提供理论与技术支撑。

3 结 论

民勤绿洲不同年限退耕地在植被自然演替过程中,植被群落由一年生草本植物逐渐演替为灌木植物,具有较强的连续性与递进性。随着退耕年限延长土壤微生物量氮呈波动上升趋势;土壤容重、细

菌数量及土壤酶活性表现为下降趋势, 细菌是土壤中主要的微生物类群; 土壤粒径、速效磷含量变化不明显, 各样地细砂粒占比较大, 粗砂粒和黏粒最少; 速效磷含量变化幅度较大, 特别在表层土壤中, 退耕 1 年后就由 CK 的 $0.039 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 下降至 $0.014 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。放线菌数量、真菌数量及微生物生物量磷呈先下降后上升趋势; 土壤含水率呈先降再升后降的趋势, 呈倒“N”字型变化; 土壤全氮、速效钾、土壤有机质含量、微生物量碳呈先上升后下降趋势; 随着土层的加深土壤养分、土壤微生物逐渐降低, 表聚现象明显。通过退耕地聚类谱系图可以推断出民勤绿洲退耕地土壤系统演变过程中, 退耕 4 年、8 年及 20 年分别是土壤质量发生重大变化的节点, 退耕 4 年为民勤绿洲退耕地恢复治理的关键时期。此时就要引起高度重视, 按照抗蚀阻沙覆盖度指标, 选择抗逆性强的旱生、超旱生植物或耐盐碱植物, 采用节水及菌肥改土等技术进行造林种草, 以自然修复并辅以人工措施, 防止退耕地的沙化与盐渍化, 否则到第 8 年左右就难以修复, 到第 20 年以后, 土壤质量发生了质的变化, 修复及保护难度进一步加大。

参考文献 (References)

- [1] Feng S W. The evolution of the drainage system of the Minchin Oasis[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1963, 29 (3): 241—249. [冯绳武. 民勤绿洲的水系演变[J]. 地理学报, 1963, 29 (3): 241—249.]
- [2] Chang G Y, Wang L, Zhang W X. Perceptions of peasants in Minqin County for the water conservation polices of Shiyang River basin and their effects[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30 (2): 13—19. [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.]
- [3] Zhang Y H, Liu S Z, Ji Y F, et al. Spatial pattern of reed community in middle reaches of Shiyang river[J]. *Journal of Desert Research*, 2016, 36 (2): 342—348. [张莹花, 刘世增, 纪永福, 等. 石羊河中游河岸芦苇群落空间格局[J]. 中国沙漠, 2016, 36 (2): 342—348.]
- [4] Zhao M R, Xu T J, Peng X R, et al. Variation characteristics of water resources in Minqin County before and after comprehensive management in Shiyang River Basin[J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2018, 12 (5): 55—59. [赵明瑞, 徐天军, 彭祥荣, 等. 石羊河流域综合治理前后民勤水资源变化特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2018, 12 (5): 55—59.]
- [5] Hu C J, Guo L. Advances in research of ecological effects of vegetation restoration[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21 (9): 1640—1646. [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.]
- [6] Yuan J Y, Ouyang Z Y, Zheng H, et al. Effects of different grassland restoration approaches on soil properties in the southeastern Horqin sandy land, Northern China[J]. *Applied Soil Ecology*, 2012, 61: 34—39.
- [7] Kardol P, Cornips N J, van Kempen M M L, et al. Microbe-mediated plant-soil feedback causes historical contingency effects in plant community assembly[J]. *Ecological Monographs*, 2007, 77 (2): 147—162.
- [8] Harris J A. Measurements of the soil microbial community for estimating the success of restoration[J]. *European Journal of Soil Science*, 2003, 54 (4): 801—808.
- [9] Singh A K, Bordoloi L J, Kumar M, et al. Land use impact on soil quality in eastern Himalayan region of India[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, 186 (4): 2013—2024.
- [10] Zhou L K. Enzyme activity of soil[J]. *Advances of Soil Science*, 1980 (4): 9—15. [周礼恺. 土壤的酶活性[J]. 土壤学进展, 1980 (4): 9—15.]
- [11] Paul E A, Clark F E. Soil microbiology and biochemistry in perspective[M]//*Soil Microbiology and Biochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 1989: 1—10.
- [12] Badiane N N Y, Chotte J L, Pate E, et al. Use of soil enzyme activities to monitor soil quality in natural and improved fallows in semi-arid tropical regions[J]. *Applied Soil Ecology*, 2001, 18 (3): 229—238.
- [13] Zhao H L, Zhou R L, Zhao X Y, et al. Desertification mechanisms and process of soil chemical and physical properties in Hulunbeir sandy grassland, Inner Mongolia[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21 (2): 1—7. [赵哈林, 周瑞莲, 赵学勇, 等. 呼伦贝尔沙质草地土壤理化特性的沙漠化演变规律及机制[J]. 草业学报, 2012, 21 (2): 1—7.]
- [14] Wang F L, Wang L D, Han F G, et al. Natural vegetation succession characteristics and species diversity in abandoned lands in the Minqin oasis, downstream of the Shiyang river[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2013, 33 (7): 1459—1464. [王方琳, 王理德, 韩富贵, 等. 石羊河下游民勤绿洲退耕地植被自然演替特征及物种多样性分析[J]. 西北植物学报, 2013, 33 (7): 1459—1464.]
- [15] Hu Q, Chen W F, Song X L, et al. Effects of reclamation/cultivation on soil quality of saline-alkali soils in the Yellow River Delta[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (4): 824—833. [胡琴, 陈为峰, 宋希亮, 等. 开垦年限对黄河三角洲盐碱地土壤质量的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57 (4): 824—833.]
- [16] Zhao H, Zhou Y C, Ren Q F. Evolution of soil microbial

- community structure and functional diversity in *Pinus Massoniana* plantations with age of stand[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (1): 227–238. [赵辉, 周运超, 任启飞. 不同林龄马尾松人工林土壤微生物群落结构和功能多样性演变[J]. *土壤学报*, 2020, 57(1): 227–238.]
- [17] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.]
- [18] Sparling G P. Soil microbial biomass, activity and nutrient cycling as indicators of soil health//Pankhurst C, Doube B M, Gupta V V S R. Biological indicators of soil health[M]. Wallingford, UK; New York: CAB International, 1997.
- [19] Guan S Y. Soil enzyme and its research method[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986. [关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.]
- [20] Huang W J, Liu J X, Han T F, et al. Different plant covers change soil respiration and its sources in subtropics[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2017, 53 (4): 469–478.
- [21] Ma J M, Man D Q, Li D L, et al. Characteristics of vegetation succession and soil moisture in abandoned cropland of arid desert region[J]. *Journal of Desert Research*, 2018, 38 (4): 800–807. [马俊梅, 满多清, 李得禄, 等. 干旱荒漠区退耕地植被演替及土壤水分变化[J]. *中国沙漠*, 2018, 38 (4): 800–807.]
- [22] Li Y Q, Jiao S Y, Zhao M L, et al. Change of plant community diversity index during abandoned succession in meadow steppe[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2016, 38 (3): 116–120. [李永强, 焦树英, 赵萌莉, 等. 草甸草原撂荒地演替过程中植被多样性指数变化[J]. *中国草地学报*, 2016, 38 (3): 116–120.]
- [23] Kamala H, Sunanda S, Chumkijini C. Secondary succession in abandoned agricultural lands of Western Odisha, India[J]. *Journal of Biodiversity and Environmental Science*, 2016, 8 (1): 75–85.
- [24] Guo C X. Characteristics of *Lycium ruthenicum* population, soil property and microbial diversity in the desert grassland of Minqin[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018. [郭春秀. 民勤荒漠草地黑果枸杞群落特征、土壤特性及微生物多样性研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.]
- [25] Wang LD, Guo CX, Xu BY, et al. Soil properties in different years of cultivation abandonment in the midstream and downstream of Shiyang River area[J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2019, 27 (4): 7561–7572.
- [26] Walter H. Vegetation of the earth: Second edition[M]. New York: Springer-Verlag, 1979.
- [27] Fan W, Wu J G, Li J M, et al. Effects of straw return on soil physico-chemical properties of chernozem in northeast China and maize yield therein[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (4): 835–846. [范围, 吴景贵, 李建明, 等. 秸秆均匀还田对东北地区黑钙土土壤理化性质及玉米产量的影响[J]. *土壤学报*, 2018, 55 (4): 835–846.]
- [28] Guo C X, Wang L D, Han F G, et al. Studies of soil physical property on different abandoned lands in the Minqin Oasis, downstream of the Shiyang River[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2015, 16 (5): 1014–1018.
- [29] Cao C Y, Jiang D M, Teng X H, et al. Soil chemical and microbiological properties along a chronosequence of *Caragana microphylla* Lam. plantations in the Horqin sandy land of Northeast China[J]. *Applied Soil Ecology*, 2008, 40 (1): 78–85.
- [30] Jiao M Y, Cong H J, Yao J, et al. Soil bulk density changes and its water-storage capacity of abandoned farmland in natural restoration series gradient of Loess Hilly-gully Region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32 (5): 128–133. [焦梦妍, 从怀军, 姚静, 等. 自然恢复序列梯度上退耕地土壤容重变化及其蓄水性能效应[J]. *水土保持学报*, 2018, 32 (5): 128–133.]
- [31] Liang B, Nie X G, Wan D, et al. Impacts of forest typical of the southern piedmont of the Himalaya Mountains on soil physicochemical properties and erodibility *K*[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (6): 1377–1388. [梁博, 聂晓刚, 万丹, 等. 喜马拉雅山脉南麓典型林地对土壤理化性质及可蚀性 *K* 值影响[J]. *土壤学报*, 2018, 55 (6): 1377–1388.]
- [32] Wang Y W, Luo L, Zhang F, et al. Soil conservation effect of *Haloxylon ammodendron* bushes in Hexi oasis-desert ecotone[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (3): 749–762. [王彦武, 罗玲, 张峰, 等. 河西绿洲荒漠过渡带梭梭林土壤保育效应[J]. *土壤学报*, 2019, 56 (3): 749–762.]
- [33] Yuan Y X, Wang R D, Chang C P, et al. Protective effect of cropland conversion with different years on soil in Bashang district, North China[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, 32 (9): 84–89. [苑依笑, 王仁德, 常春平, 等. 坝上地区不同年限退耕工程对土壤的保护作用[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, 32 (9): 84–89.]
- [34] Liu W, Cheng J M, Gao Y, et al. Distribution of soil organic carbon in grassland on Loess Plateau and its influencing factors[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49 (1): 68–76. [刘伟, 程积民, 高阳, 等. 黄土高原草地土壤有机碳分布及其影响因素[J]. *土壤学报*, 2012, 49 (1): 68–76.]
- [35] Tang M Y, Ding J L, Xia N, et al. Distribution of soil organic matter content and its affecting factors in oases typical of arid region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (3): 759–766. [唐梦迎, 丁建丽, 夏楠, 等. 干旱区典型绿洲土壤有机质含量分布特征及其影响因素[J].

- 土壤学报, 2017, 54 (3): 759—766.]
- [36] Sui Y Y, Du F, Zhang X C. Spatial heterogeneity of available soil nutrients in abandoned ole-field communities in the Loess Hilly Region[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20 (2): 76—84. [隋媛媛, 杜峰, 张兴昌. 黄土丘陵区撂荒群落土壤速效养分空间变异性研究[J]. 草业学报, 2011, 20 (2): 76—84.]
- [37] You Z, Zhang P, Xue S, et al. Effect of vegetation succession on abandoned cropland on soil stoichiometry characteristics[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2017, 25 (3): 657—661. [由政, 张鹏, 薛蕊, 等. 退耕地植被演替过程对土壤化学计量特征的影响[J]. 草地学报, 2017, 25 (3): 657—661.]
- [38] Philippot L, Spor A, Hénault C, et al. Loss in microbial diversity affects nitrogen cycling in soil[J]. *The ISME Journal*, 2013, 7 (8): 1609—1619.
- [39] Wagg C, Bender S F, Widmer F, et al. Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111 (14): 5266—5270.
- [40] Chen X, Li W M, Liu Q. Bibliometric-based analysis of researches on soil microbes at home and abroad in the past 30 years[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (6): 1458—1470. [陈香, 李卫民, 刘勤. 基于文献计量的近30年国内外土壤微生物研究分析[J]. 土壤学报: 2020, 57 (6): 1458—1470.]
- [41] Wang L D, Yao T, Cheng L, et al. Soil chemical properties and biological characteristics of discontinued farmland in the downstream of Shiyang river[J]. *Nature Environment & Pollution Technology*, 2016, 15 (1): 117—122.
- [42] Tan Q J, Song T Q, Peng W X, et al. Characteristics of soil microbial populations and biomass under different ecosystems in a canyon karst region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34 (12): 3302—3310. [谭秋锦, 宋同清, 彭晚霞, 等. 峡谷型喀斯特不同生态系统的土壤微生物数量及生物量特征[J]. 生态学报, 2014, 34 (12): 3302—3310.]
- [43] Wendu R L, Li G, Zhang J N, et al. The study of soil microbial biomass and soil enzyme activity on different grassland in Hulunbeier, Inner Mongolia[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2010, 19 (5): 94—102. [文都日乐, 李刚, 张静妮, 等. 呼伦贝尔不同草地类型土壤微生物量及土壤酶活性研究[J]. 草业学报, 2010, 19 (5): 94—102.]
- [44] Burns R G, DeForest J L, Marxsen J, et al. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 58: 216—234.
- [45] Wang Y Q, Yin Y L, Li S S. Physicochemical properties and enzymatic activities of alpine meadow at different degradation degrees[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28 (6): 1108—1116. [王玉琴, 尹亚丽, 李世雄. 不同退化程度高寒草甸土壤理化性质及酶活性分析[J]. 生态环境学报, 2019, 28 (6): 1108—1116.]
- [46] Shu J J, Chen Q B, Wang Y X, et al. Path analysis of soil enzyme activity and soil chemical-physical properties of *Pinus armandii* plantation[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2014, 42 (9): 88—92, 97. [舒蛟靖, 陈奇伯, 王艳霞, 等. 华山松人工林土壤酶活性与理化因子的通径分析[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42 (9): 88—92, 97.]

(责任编辑: 檀满枝)