

# Study on the Evolution Law of Soil System of Abandoned Farmland in Minqin Sandy Area

Lide Wang<sup>1,2,3\*</sup>, Chunrong Wu<sup>1,3#</sup>, Li Chang<sup>1</sup>, Fanglan He<sup>1,3</sup>, Hao Wu<sup>2,3</sup>, Yunian Zhang<sup>2,3</sup>, Dacheng Song<sup>1,3</sup>, Fanglin Wang<sup>2,3</sup>, Chunxiu Guo<sup>2,3</sup>, Fugui Han<sup>1,3</sup>, Shenghui Han<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Gansu Hexi Corridor Forest Ecosystem National Research Station, Wuwei Gansu

<sup>2</sup>Minqin National Station for Desert Steppe Ecosystem Studies, Mingqin Gansu

<sup>3</sup>Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou Gansu

Email: wld69@tom.com, #wucr\_1984@163.com

Received: Mar. 21<sup>st</sup>, 2020; accepted: Apr. 9<sup>th</sup>, 2020; published: Apr. 16<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

The sand area of Gansu occupies a very important position in China's ecological security, especially in the lower reaches of the Shiyang River in Minqin area. In recent decades, due to man-made damage and deterioration of the natural environment, farmland in this area has been largely retired. In the absence of intervention, it will gradually degenerate and develop into bareness and desertification, the protection and rational use of this part of the land is related to the safety and stability of the entire sand area ecosystem. The research object selects the cultivated land in different ages in Sand Area in Minqin, the vegetation composition, soil physical properties, soil chemical properties, soil biological properties and soil enzyme activities were determined and systematically analyzed by time-space substitution method, clarifies the dynamic changes and processes of soil systems in abandoned farmland and then reveals the driving factors and mechanisms of soil system changes in abandoned farmland in sand area in Minqin, conducive to the restoration and improvement of the ecosystem in the region, and provides a theoretical basis for the protection and sustainable use of the cultivated land in the sand area of Gansu and northwest part of China.

## Keywords

Abandoned Farmland, Law of Evolution, Soil System, Driving Mechanism, Sand Area in Minqin

# 民勤沙区退耕地土壤系统演变规律研究

王理德<sup>1,2,3\*</sup>, 吴春荣<sup>1,3#</sup>, 常丽<sup>1</sup>, 何芳兰<sup>1,3</sup>, 吴昊<sup>2,3</sup>, 张裕年<sup>2,3</sup>, 宋达成<sup>1,3</sup>, 王方琳<sup>2,3</sup>, 郭春秀<sup>2,3</sup>, 韩福贵<sup>1,3</sup>, 韩生慧<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>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

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 王理德, 吴春荣, 常丽, 何芳兰, 吴昊, 张裕年, 宋达成, 王方琳, 郭春秀, 韩福贵, 韩生慧. 民勤沙区退耕地土壤系统演变规律研究[J]. 土壤科学, 2020, 8(2): 90-103. DOI: 10.12677/hjss.2020.82014

<sup>3</sup>甘肃省治沙研究所, 甘肃 兰州  
Email: wld69@tom.com, #wucr\_1984@163.com

收稿日期: 2020年3月21日; 录用日期: 2020年4月9日; 发布日期: 2020年4月16日

## 摘要

甘肃沙区在我国的生态安全中占有十分重要的地位, 特别是石羊河流域下游的民勤地区, 近几十年来, 由于人为破坏及自然环境的恶化, 该区域的农田大面积退(弃)耕, 在无人为干预的情况下会逐渐退化, 向裸露化和沙漠化发展, 这部分土地退耕后的保护与合理利用关系到整个沙区生态系统的安全与稳定。本研究选择民勤沙区不同年代的退耕地为研究对象, 运用时空替代法, 测定和系统分析其植被组成、土壤物理特性、土壤化学特性、土壤生物学特性和土壤酶活性, 阐明民勤沙区退耕地土壤系统动态变化规律、过程, 揭示民勤沙区退耕地土壤系统变化的驱动因素及其机制, 有利于该地区生态系统的修复、改善, 为甘肃沙区及其西北地区退耕地保护与可持续利用提供理论依据。

## 关键词

退耕地, 演变规律, 土壤系统, 驱动机制, 民勤沙区

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

民勤沙区曾经是植被茂密、生态环境良好的天然绿洲[1]。随着人口数量的增加, 生产规模不断扩大, 工业、农业等对水资源的需求量增加, 民勤沙区内的可用水量急剧减少[2], 造成土地大面积弃耕撂荒或者弃耕[3] [4]。如果这部分土地退耕时间过长, 就会慢慢沙化或者盐渍化, 使土壤质量下降, 形成恶性循环[5], 使民勤沙区的生态环境进一步脆弱, 沙尘源逐年增加[6]。如何保护与合理利用民勤沙区退耕地, 改善民勤绿洲生态环境是当前面临的一个难题。

保护与合理利用退耕地, 必须在系统研究不同年代退耕地土壤理化特性和生物学特性的基础上, 深入了解民勤绿洲退耕地土壤系统变化规律、变化机理及演变过程, 才能制定出相应的管理方案与对策。目前, 有关荒漠干旱绿洲区退/弃耕地土壤生物学性质、土壤酶的变化规律及其驱动机制方面较系统的研究鲜见报道。为此, 我们项目组对民勤沙区退耕地植被演替[7]、土壤理化特征[8] [9]、土壤酶[10] [11] [12]、生物学特征[13] [14] [15]及土壤系统动态变化过程[16]进行了对比研究, 阐明了民勤沙区退耕地土壤系统的动态变化规律、过程, 揭示了退地土壤系统变化的驱动因素及其机制, 提出了民勤沙区退耕地土壤系统的人工干预恢复技术对策[17], 为民勤沙区退耕地的保护与合理利用及生态环境的保护、修复和改善提供理论依据。

## 2. 退耕地植被调查和土壤性质研究方法

### 2.1. 研究区概况

研究区位于石羊河下游的青土湖(图 1), 该区域均为退/弃耕地, 当地居民已经搬迁或者移民。地理坐标为 39°01'44"~39°03'28"N、103°35'58"~103°37'54"E, 海拔 1297~1306 m。年平均风速 2.3 m/s; 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, 年日照时数 2832.1 h; 月平均蒸发量 220 mm; 年均降水量 110 mm, 主要降雨量集中在 7~9 月, 分布不均匀; 土壤类型为灰棕漠土。灌木种主要有红砂(*Reamuria soongoria*), 黑果枸杞(*Lycium ruthenicum*)等; 草本植物有盐生草(*Halogeton glomeratus*), 骆驼蓬(*P. harmala*)等。

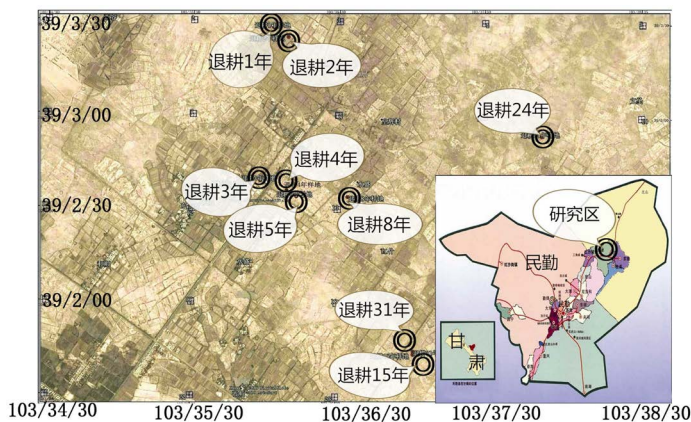


Figure 1. Location of study area schematic plot  
图 1. 研究区位置示意图

## 2.2. 研究内容

(1) 退耕地土壤因子的动态变化规律: 在民勤沙区, 采用时空替代法, 选择不同年限退耕地为演变序列样地, 测定样地土壤水分、容重、粒度、养分、盐分、pH 值、微生物、酶活性等指标, 分析退耕后土壤各因子随着退耕时间及季节动态变化规律。

(2) 退耕地土壤因子的垂直分布规律: 测定不同退耕时间 0~10, 10~20, 20~30 和 30~40 cm 土层中各土壤因子的相关值, 分析不同土层土壤因子的积累特征, 研究土壤因子的垂直变异分布规律。

(3) 退耕地土壤各因子间的数量关系: 通过测定不同退耕时间、不同土层深度土壤因子的含量及值的大小, 分析研究各相关因子间的互动效应。

(4) 退耕地土壤演变的驱动因素及其机制: 调查不同退耕时间土壤生长植被基础上, 结合单位已经积累 50 多年的气候、植被、风蚀、物候等观测资料, 研究土壤系统动态变化的驱动因素及其机制。

## 2.3. 研究方法

(1) 样地选择及植被调查: 2011 年冬季, 走访实验区没有退耕前居住的农户, 并查阅青土湖附近退/弃耕地记录。采用空间替代时间的方法, 选择地形差异较小, 退耕地比较集中, 退耕时间分别为 1, 2, 3, 4, 5, 8, 15, 24 和 31 a 的 9 个样地(表 1), 每个样地面积为 1 hm<sup>2</sup> (100 m × 100 m), 在每个 100 m × 100 m 的样地内以 S 形方法布设 5 个土样采集点, 用 GPS 定位, 并做好标记。2012 年 9 月下旬, 在每个 100 m × 100 m 样地内采用 S 形方法布设 5 个 10 m × 10 m 的植被调查样方, 然后再在每个 10 m × 10 m 的植被调查样方内设置 5 个 1 m × 1 m 草本调查样方, 完成植被调查。

(2) 样品采集: 2012 年 9 月下旬, 在选定的样地内设 5 个土样采集点, 3 次重复, 按 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm 四个层次剖面用环刀取土样, 用于土壤含水率及容重测定; 将同样地五个土样取 3 个重复, 每个重 2 kg 左右, 采集过程中将土壤样品充分混合后分成两份, 一份装入无菌袋中, 并放置于带冰块的泡沫箱内, 另一份直接装入无菌袋中, 将这两份采集的土壤样品带回实验室, 分别用于土壤特性及酶活性等指标的测定。

**Table 1.** The status of sample sites  
**表 1.** 选定样地位置及植被状况

退耕时间 Age BCFF (a)	经纬度 Latitude and longitude	海拔 Altitude/m	群落优势种 Dominant plants population
1	103°36'03"E, 39°03'28"N	1304	藜+田旋花+五星蒿( <i>Echinopilon divaricatum</i> )
2	103°36'09"E, 39°03'25"N	1303	苦苣菜( <i>Sonchus oleraceus</i> ) + 独行菜( <i>Lepidium apetalum</i> ) + 骆驼蒿
3	103°35'58"E, 39°02'39"N	1297	顶羽菊( <i>Acroptilon repens</i> )+盐生草+骆驼蒿
4	103°36'09"E, 39°02'36"N	1305	骆驼蒿+骆驼蓬
5	103°36'13"E, 39°02'34"N	1304	黑果枸杞+独行菜+盐生草
8	103°36'34"E, 39°02'34"N	1304	黑果枸杞+盐生草+骆驼蓬
15	103°37'02"E, 39°01'44"N	1304	黑果枸杞+骆驼蒿+盐生草
24	103°37'54"E, 39°02'54"N	1306	黑果枸杞+盐爪爪+红砂
31	103°37'02"E, 39°01'45"N	1306	黑果枸杞+盐爪爪

### (3) 土壤分析测定

土壤物理特性相关因子的测定：土壤含水量、粒径和容重测定采用常规方法[18]进行。

土壤化学特性相关因子的测定：土壤有机质的测定采用重铬酸钾氧化外加热法[19]；土壤全氮采用凯氏蒸馏法[18]；铵态氮采用靛酚蓝比色法[18]；硝态氮采用紫外分光光度法[18]；全磷采用氢氧化钠溶液-钼锑抗比色法[18]；有效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法[20]；土壤全钾、缓效钾和速效钾采用原子吸收分光光度法[21]；土壤腐殖质采用滴定法[22]；土壤水溶性盐总量采用电导法[23]；土壤 pH 值采用电位法[24]。

土壤微生物数量测定[25]：采用平板表面涂抹法[25]对土壤三大类微生物(细菌、放线菌、真菌)数量进行测定并计数，其中细菌选择牛肉膏蛋白胨作为培养基；真菌选择马丁-孟加拉红作为培养基；放线菌选择改良高氏一号作为培养基。

土壤微生物量测定[26]：采用氯仿熏蒸法，即：样品采用氯仿熏蒸后，以  $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ K}_2\text{SO}_4$  浸提，用滴定法测土壤微生物碳(MBC)，凯氏法测土壤微生物氮(MBN)，钼锑抗比色法测土壤微生物量磷(MBP)。

土壤酶活性测定[27]：分别采用靛酚蓝比色法、3,5-二硝基水杨酸比色法、容量法、磷酸苯二钠比色法测定脲酶活性、蔗糖酶活性、过氧化氢酶活性及磷酸酶活性。

(5) 数据处理：采用 SPSS 19.0 软件对所测数据统计分析，采用单因素方差分析对同一土层不同退耕年限、同一退耕年限不同土层深度处理进行各因子差异性分析，并用 Excel 2010 制表。

## 3. 不同年代退耕地植被、土壤理化特性、生物学特性和土壤酶活性变化规律及其结果分析

### 3.1. 退耕地植被自然演变特征

在民勤沙区退耕地自然演替过程中，植被物种丰富度和多样性指数呈现先增大，后减小的趋势，而均匀度指数呈现出渐渐增大的趋势[7]。由表 2 可知，在研究区共出现 28 种草本、6 种灌木，分属 14 个属 24 个种。退耕 1~3 a 样方内以一年生草本植物为群落优势种，多年生草本和灌木随着退耕年限的增加慢慢出现；退耕 3~8 a 样方内多年生草本演替成为植物群落优势种；退耕 8~24 a 样方内灌木植物演替为优势种；退耕 24~31 a 样方内优势种由黑果枸杞和盐爪爪构成，植被自然演替处于相对稳定阶段。

**Table 2.** The change of vegetation community species composition and important value  
**表 2.** 植被群落物种组成和重要值

物种 species	物种的重要值 The important value of species								
	1 a	2 a	3 a	4 a	5 a	8 a	15 a	24 a	31 a
田旋花	19.02	8.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
茴香 <i>Foeniculum vulgare</i>	40.73	8.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
地锦 <i>Parthenocisus tricuspidata</i>	3.32	10.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
蒙古雅葱 <i>Scorzonera mongolica</i>	4.05	12.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
苦苣菜	18.28	4.81	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
黎	42.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
篇蓄 <i>polygonum aviculare</i>	17.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
打碗花 <i>Calystegia hederacea</i>	11.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
五星蒿	36.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
虫实 <i>Corispermum hyssopifolium</i>	13.97	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	20.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
独行菜	12.13	3.75	0.00	112.84	96.26	0.00	85.36	0.00	0.00
碱蓬 <i>Suaeda glauca</i>	10.60	9.97	0.00	0.00	0.00	1.88	0.00	0.00	0.00
灰绿藜 <i>Chenopodium glaucum</i>	18.74	12.86	0.00	0.00	0.00	1.94	0.00	0.00	0.00
顶羽菊 <i>Acroptilon repens</i>	19.62	8.97	42.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
虎尾草 <i>Chloris virgata</i>	4.05	7.37	3.22	8.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
芦苇 <i>Phragmites communis</i>	8.44	7.78	10.22	0.00	0.00	18.97	0.00	8.78	0.00
画眉草 <i>Eragrostis pilosa</i>	5.43	6.33	5.96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
骆驼蒿	140.67	215.25	130.68	96.41	65.39	152.57	134.16	0.00	0.00
骆驼蓬	91.19	66.56	28.67	30.01	72.66	139.54	18.43	0.00	0.00
盐生草	14.65	7.24	102.39	44.12	46.43	120.02	48.64	0.00	0.00
黑果枸杞	42.73	76.51	107.22	114.53	210.40	115.90	168.90	97.70	74.23
白刺 <i>Nitraria tangutorum</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	90.43	40.17	27.68	11.19
盐爪爪 <i>Kalidium foliatum</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	60.89	71.95	183.97	192.29
芨芨草 <i>Achnatherum splendens</i>	0.00	56.38	134.32	9.46	13.79	0.00	0.00	0.00	0.00
枸杞 <i>Lycium chinense</i>	0.00	0.00	18.29	45.50	34.77	22.94	0.00	0.00	0.00
群心菜 <i>Cardaria draba</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.95	0.00	0.00	0.00
沙生针茅 <i>Stipa glareosa</i>	0.00	0.00	0.00	21.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
蒙古猪毛菜 <i>Salsola ikonnikovii</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
怪柳 <i>Tamarix gansuensis</i>	0.00	0.00	0.00	121.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
铁线莲 <i>Clematis florida</i>	0.00	0.00	0.00	1.78	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
黄花矾松 <i>Limonium aureum</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	4.36	0.00	26.42	0.00	0.00
红砂 <i>Reaumuria soongoria</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.94	10.43	14.31	8.98
泡泡刺 <i>N. sphaerocarpa</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.55	8.78

## 3.2. 退耕地土壤物理性质变化特征

### 3.2.1. 土壤含水量变化特征

由表 3 可知：甘肃沙区不同年限退耕地土壤含水量经历了：降低 - 升高 - 降低的一个变化过程，且第 8 a 土壤含水量达到最大值。随土层深度增加表现出先增后减的变化趋势，除第 1 a 外，第 2 a、3 a、8 a、15 a、24 a 及 31 a 随土层加深含水量升高，但第 4 a 和 5 a 随土层深度增加含水量影响不大。

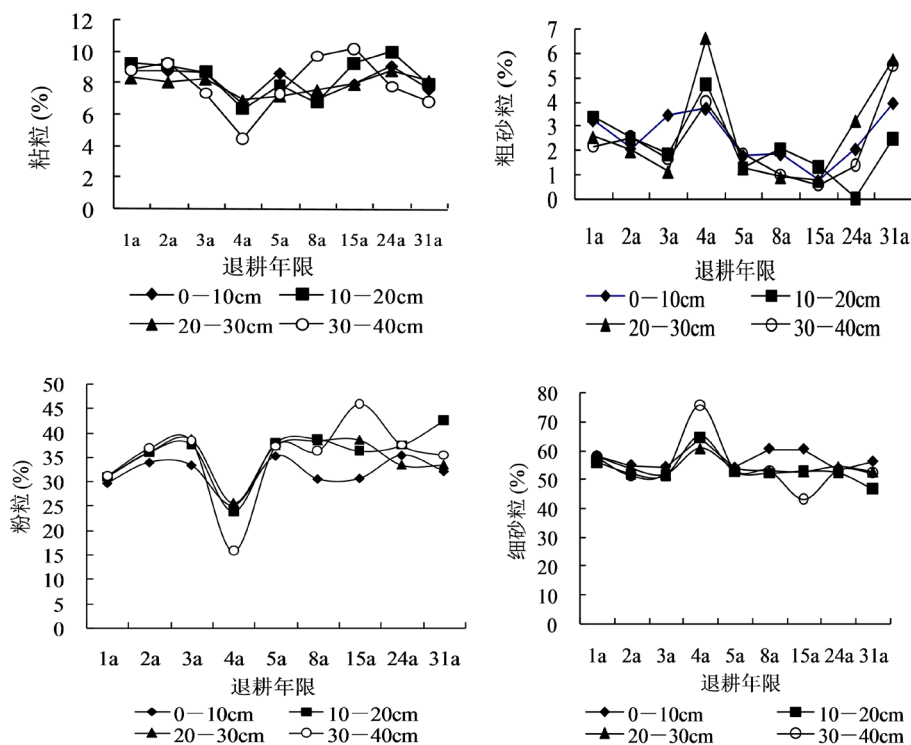
**Table 3.** Soil water content  
**表 3.** 土壤含水量

土层 Soil layer (cm)	不同年限退耕地含水量 Water content of reclaimed farmland in different years (%)								
	1 a	2 a	3 a	4 a	5 a	8 a	15 a	24 a	31 a
0~10	5.85 ± 0.12b	5.66 ± 0.12b	2.90 ± 0.16d	1.32 ± 0.04e	2.92 ± 0.06ad	7.26 ± 0.05a	3.90 ± 0.29c	1.63 ± 0.02e	3.28 ± 0.24d
10~20	7.75 ± 0.11c	7.45 ± 0.10d	6.51 ± 0.07e	3.65 ± 0.03g	6.53 ± 0.19e	9.61 ± 0.09a	7.23 ± 0.06d	4.92 ± 0.08f	8.09 ± 0.10b
20~30	6.52 ± 0.24c	8.00 ± 0.04b	6.74 ± 0.03c	3.28 ± 0.21e	6.87 ± 0.05c	9.19 ± 0.33a	8.12 ± 0.07b	5.03 ± 0.05d	8.25 ± 0.07b
30~40	10.05 ± 1.84a	9.02 ± 0.06a	6.94 ± 0.06bc	2.97 ± 0.41d	6.37 ± 0.06bc	10.00 ± 0.19a	9.30 ± 0.05a	5.11 ± 0.03c	8.27 ± 0.01ab

注：不同小写字母表示同列不同年限退耕地差异显著( $P < 0.05$ )，下同。

### 3.2.2. 退耕地土壤机械组成

由图 2 可知，退耕地土壤机械组成中各样地占比最大的是细砂粒，达到 50% 以上，粉粒居中，粗砂粒和粘粒最少，均在 10% 以下。随退耕年限的增加，各粒径占比发生较大变化，土壤粘粒逐渐减少，粉粒逐渐增加，相对来看 0~10 cm 土层变化幅度较大。



**Figure 2.** Spatial variation of soil mechanical composition in 0 - 40 cm soil in different years  
**图 2.** 不同年限退耕地 0~40 cm 土层土壤机械组成空间变化

### 3.2.3. 容重及孔隙度变化

由表 4 可知, 随退耕年限的延长, 样地内土壤容重逐渐减小, 土壤孔隙度慢慢增大, 渗透能力增强; 不同土层深度土壤容重及孔隙度变化没有明显的变化规律。

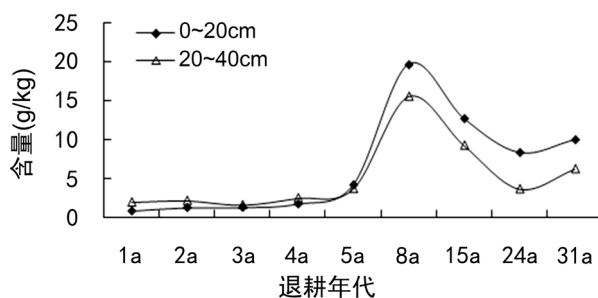
**Table 4.** Soil bulk density and porosity

**表 4.** 土壤容重和孔隙度

退耕年限 (a)	容重(g/cm <sup>3</sup> )					孔隙度(%)				
	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	30~40 cm	平均	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	30~40 cm	平均
1	1.53	1.49	1.47	1.43	1.48	44.36	42.37	43.71	46.08	44.13
2	1.55	1.53	1.50	1.50	1.52	41.58	43.45	43.45	42.42	42.73
3	1.25	1.33	1.58	1.59	1.44	52.96	49.74	40.45	39.87	45.76
4	1.41	1.41	1.48	1.46	1.44	46.94	46.82	44.20	44.84	45.70
5	1.42	1.44	1.51	1.50	1.47	46.56	45.74	43.03	43.40	44.68
8	1.17	1.07	1.31	1.29	1.21	55.93	59.71	50.71	51.38	54.43
15	1.56	1.14	1.34	1.39	1.36	41.32	57.04	49.37	47.48	48.80
24	1.31	1.44	1.44	1.46	1.41	50.75	45.62	45.70	44.81	46.72
31	1.28	1.43	1.46	1.53	1.42	51.71	45.96	44.95	42.43	46.26

### 3.3. 退耕地土壤化学性质变化特征

随着退耕年限的增加, pH 值增大, 盐分含量也增大, 表聚现象十分明显(图 3)。退耕 1~5 a 之间, 土壤含盐量较小, 最小值出现在 1 a 退耕地, 为 2.70 g/kg, 且 0~20 cm 和 20~40 cm 含盐量差异很小; 退耕 8 a 左右样地内土壤盐分含量达到最大值, 为 35.01 g/kg, 表层含量明显高于下层, 并且随土层深度增大, 盐分含量减少。表层 0~20 cm 含盐量是 20~40 cm 的 1.3 倍。



**Figure 3.** Soil salt content

**图 3.** 土壤盐分含量

### 3.4. 土壤微生物变化

#### 3.4.1. 微生物数量变化

##### 1) 细菌数量变化研究

不同年限退耕地同一土层间细菌数量的变化规律不尽相同(表 5), 其中, 随退耕年限延长土壤细菌数量在 0~10 cm 土层呈现下降的趋势; 在 10~30 cm 土层中细菌数量呈上升的趋势, 退耕 8 a、31 a 样地分

别达到最大值；在 30~40 cm 土层中呈现出下降趋势，退耕 3 a 达到最高值。此外，不同土层间土壤细菌数的也出现明显变化，在退耕 1 a、2 a、3 a、4 a、15 a、24 a 土地，土壤细菌数量均随土层的加深而降低；退耕 5 a、8 a 及 31 a 土地，土壤细菌数量均随土层的加深而升高。

### 2) 真菌数量的变化研究

同一年限退耕地不同土层间真菌数量的变化规律不尽相同，土壤表层真菌数量最多，可达  $4.65 \times 10^3$  CFU·g<sup>-1</sup>，其它土层垂直动态总的趋势为随着土层加深呈下降趋势；同时，土壤真菌数量随土层的变化规律不尽相同，除退耕 31 a 的土地各土层间土壤真菌数量变化差异显著，其它年限的退耕地各土层间土壤真菌数量变化差异不显著。且除表层外真菌数量随退耕年限延长呈上升趋势(表 5)。

**Table 5.** Change characteristics of microbial quantity of three types of soil in different years (CFU·g<sup>-1</sup>)

**表 5.** 不同年限退耕地土壤三大类微生物数量变化特征(CFU·g<sup>-1</sup>)

微生物种类	土层 (cm)	退耕年限(a)								
		1	2	3	4	5	8	15	24	31
细菌	0~10	23.06a	2.22c	2.68c	7.30b	1.11de	0.45e	1.37d	7.71b	0.45e
	10~20	2.85b	1.09d	1.94c	2.08c	3.25b	19.39a	0.29e	1.05d	3.16b
	20~30	1.44de	0.91f	1.30e	1.75cd	2.26b	2.08bc	0.26g	0.26g	7.10a
	30~40	0.45cd	0.58bc	1.11a	0.64bc	1.30a	0.71b	0.13e	0.13e	0.26de
真菌	0~10	0.72de	0.52ef	2.16b	4.65a	0.72de	1.10c	0.91cd	0.45f	0.45f
	10~20	0.45d	0.71cd	0.84c	1.30b	1.24b	0.52d	0.58d	2.29a	0.90c
	20~30	0.26d	0.91b	0.71c	0.32d	1.03b	0.32d	0.26d	1.69a	0.45d
	30~40	0.13b	0.13b	0.13b	0.13b	0.71a	0.32b	0.13b	0.78a	0.26b
放线菌	0~10	1.04de	0.46f	0.46f	7.69b	0.59ef	8.37a	1.43d	3.63c	0.97def
	10~20	0.65ef	1.09e	2.39cd	3.05b	2.15d	6.33a	0.23f	2.82bc	2.20d
	20~30	0.52e	2.60a	0.26f	0.91d	1.42c	0.91d	0.19f	0.91d	2.00b
	30~40	0.13e	0.71b	0.20de	0.58bc	1.23a	0.32cde	0.13e	0.45bcd	1.04a

### 3) 放线菌数量的变化

表 5 可知，放线菌数量的变化规律 0~10 cm 和 10~20 cm 土层基本一致，且 0~10 cm 土层放线菌数量最多，表聚现象明显；20~40 cm 土壤放线菌数量变化幅度较小。在退耕 2 a、3 a、5 a 及 31 a 的土样中亚表层放线菌数量高于表层；在 1 a、4 a、8 a、15 a 及 24 a 的土地土壤放线菌数量均随土层的加深而降低。其总的趋势为随着土层加深呈下降趋势，与真菌的变化规律一致。随退耕年限的延长土壤放线菌数量总的趋势呈现出逐渐上升，再缓慢下降，且四层土壤中放线菌数量分别在退耕 8 a、8 a、2 a 及 5 a 达到最大值。

通过方差分析可知，土壤微生物数量与退耕年限之间无显著影响，而与土层深度有极显著的影响( $P < 0.01$ )，表层高于深层，特别是退耕 1 a 样方中表层土壤三大微生物数量分别为最下层土壤中的 51、5.6 及 8.1 倍。

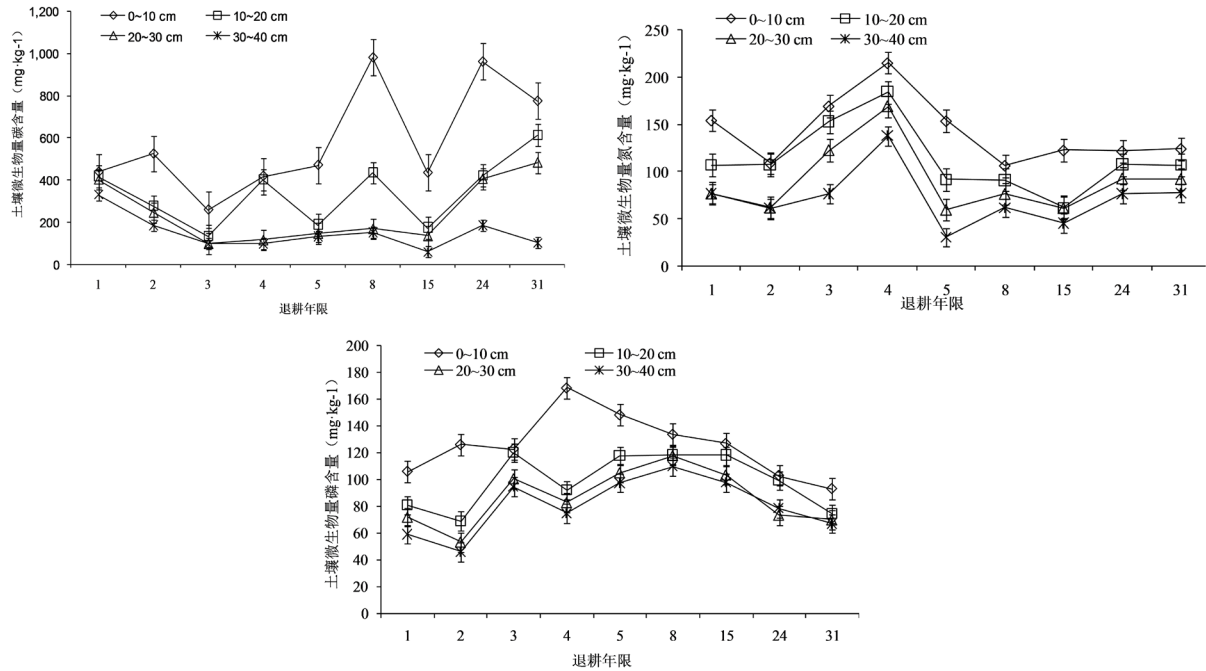
## 3.4.2. 土壤微生物生物量变化研究

### 1) 土壤微生物碳(MBC)的变化研究

由图 4 可以看出：同一退耕年限，土壤微生物量碳含量随土层加深而降低，在 0~30 cm 土层中 1~5 a 呈下降的趋势，8 a~31 a 呈上升趋势，各土层最大值分别为 979.13 mg·kg<sup>-1</sup>、610.00 mg·kg<sup>-1</sup>、480.22 mg·kg<sup>-1</sup>，



出现在退耕 8 a、31 a 的样方中；在 30~40 cm 土层中退耕 1 a 土壤微生物量碳含量达到最大值 327.74 mg·kg<sup>-1</sup>，随退耕年限的延长其值逐渐减少。不同年限退耕地不同土层，土壤微生物量碳总体表现为：随着退耕年限的增加呈波动性上升的趋势，各土层土壤微生物碳含量分别在退耕 8 a、24 a 达到最大值，且表聚现象明显。



**Figure 4.** Spatial variation characteristics of soil microbial biomass in different years of cultivated land  
**图 4.** 不同年限退耕地土壤微生物量空间变异特征

2) 土壤微生物氮(MBN)的变化研究

同一退耕年限不同土层土壤微生物量氮呈先下降后上升的趋势，变化范围在 61.39~215.50 mg·kg<sup>-1</sup> (图 4)；在 4~8 a 的土壤中除表层外，其它土层随退耕年限的延长，也呈现先下降后上升的趋势，变化范围在 30.70~215.50 mg·kg<sup>-1</sup> 之间；8~31 a 的土地，随退耕年限的增长，表层土壤微生物量氮呈先上升，后下降的趋势，其它土层则相反，表聚现象十分明显。随退耕年限的增加土壤微生物量氮表现为先上升，在第 4 a 达到最高值，分别为 215.50 mg·kg<sup>-1</sup>、184.49 mg·kg<sup>-1</sup>、169.00 mg·kg<sup>-1</sup> 及 138.23 mg·kg<sup>-1</sup>，然后开始下降最后趋于稳定。

3) 土壤微生物量磷(MBP)的变化研究

不同年限退耕地土壤微生物量磷表现为：0~10 cm 土层，随退耕年限的增加先上升，退耕第 4 a 其含量达到最大值为 168.35 mg·kg<sup>-1</sup>，然后慢慢下降(从 4 a 到 31 a)；其它土层表现为随退耕年限的增加先下降，再上升，最后再下降的趋势，总之同一退耕年限随着土层的加深，土壤微生物量磷逐渐减小，其变化趋势与微生物量 C、N 相似，表聚现象明显(图 4)。同时，其时间特征变化为：在退耕较短的年限(1~8 a)微生物量磷随退耕年限增加，呈现有规律的变化趋势，退耕 8 a 以后微生物量 P 随退耕年限的增加基本呈下降的趋势。最大值出现在第 4 a，最大值为 168.35 mg·kg<sup>-1</sup>，最小值出现在第 2 a，最小值为 45.72 mg·kg<sup>-1</sup>。

随土层深度的加深微生物生物量逐渐减小，经方差分析可知，微生物生物量与土层之间存在极显著的差异( $P < 0.01$ )。微生物生物量氮与退耕年限有显著性差异( $P < 0.05$ )，而土壤微生物量碳与微生物量磷与退耕年限影响不大。

### 3.5. 退耕地土壤酶活性变化特征

#### 3.5.1. 不同年限退耕地过氧化氢酶活性特征

由表 6 可知, 不同年限退耕地过氧化氢酶空间变化特征为: 随着土层的加深酶活性逐渐下降, 并且表层过氧化氢酶活性在 4 层该酶活性中占较大的比例。0~10 cm, 10~20 cm, 20~30 cm, 30~40 cm 土层之间过氧化氢酶活性基本达到显著水平( $P < 0.05$ ), 退耕年限中除 1 a, 3 a 与 5 a 外, 0~10 cm 土层中过氧化氢酶活性与 10~20 cm, 20~30 cm, 30~40 cm 土层的差异均达到极显著水平( $P < 0.01$ )。而且表层酶活性显著高于其它土层。同时, 其时间变化特征为: 退耕 4 a 时过氧化氢酶显著减小; 第 5 a 时, 达到最大值; 第 5 a 后变化规律呈逐渐减小的趋势, 但在退耕 24 a 后又出现增大的趋势。总体来看, 随着退耕地恢复年限的增加, 过氧化氢酶活性没有明显的变化规律, 特别是表层土壤过氧化氢酶活性相对稳定。

**Table 6.** Distribution of catalase in different soil layers in different years [mL/(g.20 min)]

**表 6.** 不同土层不同年限退耕地土壤过氧化氢酶分布[mL/(g.20 min)]

土层(cm)	退耕年限(a)								
	1	2	3	4	5	8	15	24	31
0~10	0.94 <sup>dC</sup>	0.95 <sup>cC</sup>	0.90 <sup>dC</sup>	0.76 <sup>dD</sup>	0.97 <sup>dC</sup>	0.93 <sup>dD</sup>	0.90 <sup>cC</sup>	0.80 <sup>dD</sup>	0.94 <sup>dC</sup>
10~20	0.91 <sup>cC</sup>	0.82 <sup>bB</sup>	0.80 <sup>bB</sup>	0.69 <sup>cC</sup>	0.93 <sup>cC</sup>	0.81 <sup>cC</sup>	0.66 <sup>bB</sup>	0.77 <sup>cC</sup>	0.83 <sup>cB</sup>
20~30	0.82 <sup>bB</sup>	0.80 <sup>aA</sup>	0.84 <sup>cB</sup>	0.65 <sup>bB</sup>	0.82 <sup>bB</sup>	0.69 <sup>B</sup>	0.64 <sup>bB</sup>	0.75 <sup>bB</sup>	0.78 <sup>bB</sup>
30~40	0.71 <sup>aA</sup>	0.70 <sup>aA</sup>	0.68 <sup>aA</sup>	0.48 <sup>aA</sup>	0.70 <sup>aA</sup>	0.58 <sup>aA</sup>	0.46 <sup>aA</sup>	0.34 <sup>aA</sup>	0.44 <sup>aA</sup>

注: 同列不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ ), 不同大写字母表示差异极显著( $P < 0.01$ ); 下同。

#### 3.5.2. 不同年限退耕地蔗糖酶活性特征

不同年限退耕地蔗糖酶呈现出了明显的空时变化(表 7), 其空间变化特征为: 表层蔗糖酶活性显著高于 30~40 cm 土层, 除退耕 2 a 的 20~40 cm、退耕 3 a 的 10~30 cm 土层外, 蔗糖酶活性随着土层深度的增加逐渐减小, 各土层间存在显著差异; 随着退耕年限的增加酶活性呈现出先增大、再逐渐减小的趋势。随着退耕年限的增加, 当退耕 4 a 时, 蔗糖酶活性达到同一层的最大值[21.80, 20.84, 17.399 和 10.06 mg/(g.d)], 然后随着退耕年限的增加活性逐渐减小; 退耕 15 a 时, 表层酶活性增大, 深层蔗糖酶活性减小, 20~30 cm、30~40 cm 土层分别降低到最小值 2.06 和 1.69 mg/(g.d)。

**Table 7.** Distribution of sucrase in different soil layers in different years [mg/(g.d)]

**表 7.** 不同土层不同年限退耕地土壤蔗糖酶的分布[mg/(g.d)]

土层(cm)	退耕年限(a)								
	1	2	3	4	5	8	15	24	31
0~10	8.2340 <sup>dD</sup>	14.34 <sup>cC</sup>	12.89 <sup>cC</sup>	21.80 <sup>dC</sup>	12.22 <sup>dC</sup>	15.02 <sup>dD</sup>	9.71 <sup>dC</sup>	12.67 <sup>dC</sup>	17.39 <sup>cC</sup>
10~20	6.6492 <sup>cC</sup>	12.12 <sup>bB</sup>	9.94 <sup>bB</sup>	20.84 <sup>cC</sup>	9.99 <sup>cC</sup>	12.75 <sup>cC</sup>	6.57 <sup>cB</sup>	7.00 <sup>cBC</sup>	7.639 <sup>bB</sup>
20~30	4.7671 <sup>bB</sup>	5.96 <sup>aA</sup>	9.39 <sup>bB</sup>	17.38 <sup>bB</sup>	6.43 <sup>bB</sup>	8.76 <sup>bB</sup>	5.78 <sup>bB</sup>	4.79 <sup>bB</sup>	2.067 <sup>aA</sup>
30~40	2.9459 <sup>aA</sup>	4.95 <sup>aA</sup>	6.86 <sup>aA</sup>	10.06 <sup>aA</sup>	3.961 <sup>aA</sup>	5.65 <sup>aA</sup>	4.64 <sup>aA</sup>	2.71 <sup>aA</sup>	1.68 <sup>aA</sup>

#### 3.5.3. 不同年限退耕地脲酶活性特征

退耕地土壤脲酶活性随退耕年限延长和土层加深变化而变化。由表 8 可以看出, 在 0~40 cm 土层中,

表层土壤脲酶活性总体高于其它土层；除退耕 1 a 和 4 a 外，其余各土层间酶活性均达到显著差异水平( $P < 0.05$ )，特别是退耕 24 a 的样方中相差较大，各层间存在极显著差异( $P < 0.01$ )。同时，脲酶活性表现出随着退耕时间的增加其酶活性慢慢降低，退耕 15 a 左右趋于相对平稳状态。

**Table 8.** Distribution of urease in different soil layers in different years [mg/(g.d)]

**表 8.** 不同土层不同年限退耕地土壤脲酶分布[mg/(g.d)]

土层(cm)	退耕年限(a)									
	1	2	3	4	5	8	15	24	31	
0~10	0.60 <sup>bB</sup>	0.63 <sup>cC</sup>	0.54 <sup>cC</sup>	0.57 <sup>aA</sup>	0.53 <sup>bB</sup>	0.52 <sup>bB</sup>	0.45 <sup>cC</sup>	0.48 <sup>dD</sup>	0.23 <sup>bA</sup>	
10~20	0.61 <sup>bB</sup>	0.61 <sup>bBC</sup>	0.43 <sup>bB</sup>	0.56 <sup>aA</sup>	0.42 <sup>bAB</sup>	0.51 <sup>bB</sup>	0.36 <sup>bB</sup>	0.27 <sup>cC</sup>	0.13 <sup>aA</sup>	
20~30	0.55 <sup>bB</sup>	0.56 <sup>aAB</sup>	0.26 <sup>aA</sup>	0.53 <sup>aA</sup>	0.41 <sup>bAB</sup>	0.43 <sup>aA</sup>	0.16 <sup>aA</sup>	0.19 <sup>bB</sup>	0.12 <sup>aA</sup>	
30~40	0.43 <sup>aA</sup>	0.51 <sup>aA</sup>	0.20 <sup>aA</sup>	0.53 <sup>aA</sup>	0.34 <sup>aA</sup>	0.41 <sup>aA</sup>	0.13 <sup>aA</sup>	0.13 <sup>aA</sup>	0.24 <sup>bA</sup>	

### 3.5.4. 不同年限退耕地磷酸酶活性特征

退耕年限和土层深度对土壤磷酸酶活性产生了显著影响(表 9)。在空间分布中表现出随着土层深度的增加土壤酶活性逐渐减小，表层磷酸酶活性显著高于其它各层，在 4 层总酶中占比分别为 39%，37%，32%，35%，38%，38%，30%，35%，30%，特别是退耕初期(1~5 a)表层酶活性与其它各层间都存在极显著的差异。随着退耕年限的增加，土壤磷酸酶活性逐渐增加，退耕 4 a 时达到最大值 3.60 mg/(g.d)，然后又逐渐减小，当退耕 15 a 左右慢慢趋于平稳，土壤磷酸酶活性与最大值相差范围在 2.03~3.19 mg/(g.d)。

**Table 9.** Distribution of soil phosphatase in different soil layers in different years [mg/(g.d)]

**表 9.** 不同土层不同年限退耕地土壤磷酸酶分布[mg/(g.d)]

土层(cm)	退耕年限(a)									
	1	2	3	4	5	8	15	24	31	
0~10	2.55 <sup>dC</sup>	2.88 <sup>cC</sup>	2.01 <sup>dC</sup>	3.60 <sup>dD</sup>	2.17 <sup>cC</sup>	3.36 <sup>dC</sup>	1.58 <sup>bB</sup>	0.85 <sup>bA</sup>	1.24 <sup>bB</sup>	
10~20	1.74 <sup>bB</sup>	2.10 <sup>bB</sup>	1.80 <sup>cB</sup>	2.68 <sup>cC</sup>	1.33 <sup>bB</sup>	2.33 <sup>bC</sup>	1.40 <sup>abAB</sup>	0.68 <sup>abA</sup>	1.09 <sup>bB</sup>	
20~30	1.24 <sup>bA</sup>	1.47 <sup>aA</sup>	1.36 <sup>bA</sup>	2.26 <sup>bB</sup>	1.18 <sup>bcAB</sup>	1.86 <sup>bB</sup>	1.18 <sup>aA</sup>	0.49 <sup>aA</sup>	1.06 <sup>bB</sup>	
30~40	0.93 <sup>aA</sup>	1.22 <sup>aA</sup>	1.08 <sup>aA</sup>	1.70 <sup>aA</sup>	0.97 <sup>aA</sup>	1.29 <sup>aA</sup>	1.09 <sup>aA</sup>	0.41 <sup>aA</sup>	0.79 <sup>aA</sup>	

为了进一步了解不同年限退耕地 0~40 cm 土层中土壤酶活性变化，将 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 和 30~40 cm 土层中各酶活性分别被进行了加权平均(表 10)，结果显示，随着退耕年限的增加，土壤酶活性的变化各有差异。过氧化氢酶活性与蔗糖酶活性总体表现大致相似，随着退耕年限的延长逐渐增大，分别于退耕第 2 a、4 a 时加权平均值达到最大值 1.03 mL/(g.20 min)、16.51 mg/(g.d)，然后逐渐减小。脲酶活性总体表现为随着退耕年限的延长逐渐减小，退耕 15 a 左右加权平均值的最小值 0.12 mg/(g.d) 出现，然后脲酶活性趋于稳定。随着退耕年限的延长，磷酸酶活性逐渐下降，退耕 3 a 时加权平均值的最小值 1.42 mg/(g.d) 出现，然后渐渐增大，退耕 5~8 a 时加权平均值最大值 3.17 mg/(g.d) 出现，最后慢慢减小，磷酸酶活性趋于稳定。总之，各参试土壤酶活性都随土层深度增加逐渐减小，表层土壤酶活性占比较大。研究参试酶的活性，总的趋势是随着退耕地恢复年限的增加，呈波动式下降。

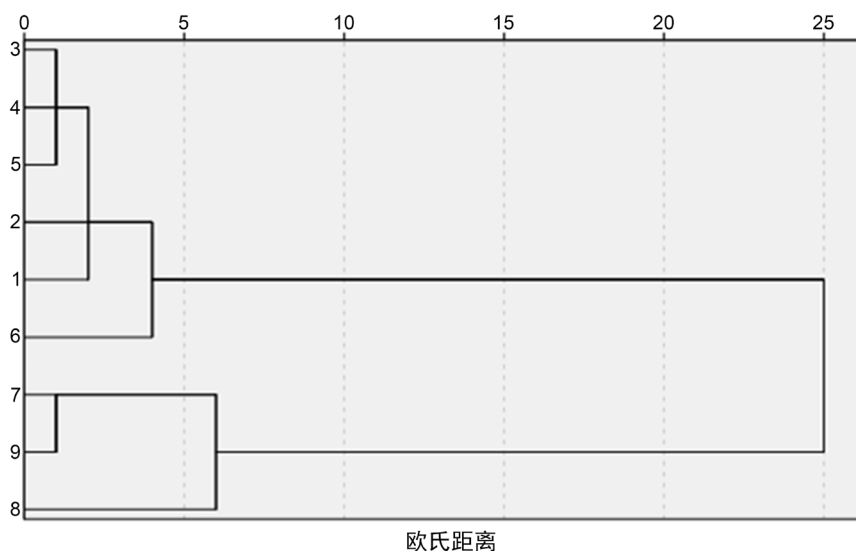
**Table 10.** Value of soil enzyme activity  
**表 10.** 土壤酶活性值

土壤酶	退耕年限(a)								
	1	2	3	4	5	8	15	24	31
过氧化氢酶[mL/(g.20 min)]	0.97	1.03	0.94	1.02	0.98	1.01	1.01	0.99	0.97
脲酶[mg/(g.d)]	0.43	0.44	0.35	0.44	0.42	0.21	0.12	0.21	0.19
蔗糖酶[mg/(g.d)]	8.61	9.02	12.23	16.51	9.14	12.06	16.03	10.48	9.81
磷酸酶[mg/(g.d)]	2.93	2.51	1.42	2.66	3.17	3.17	2.39	2.72	2.42

注：表中数值为 0~10 cm, 10~20 cm, 20~30 cm 和 30~40 cm 各土壤酶活性的加权平均值。

### 3.6. 退耕地土壤系统演变特性

为了更加清楚地认识民勤绿洲退耕地土壤系统演变特性, 对测定的土壤理化性质、微生物特性及土壤酶活性等 33 个土壤因子, 退耕 31 a 左右 27 个样地 4 个土层进行聚类分析(图 5)。以距离系数阈值 10 作为分类标准, 试验样地可分为两大类: 退耕 1~8 a 左右的次生草地为第一类; 退耕 15~31 a 组成第二类。从聚类分析的这一结果可以看出, 退耕地土壤系统演变过程中, 退耕 1~5 a 的土壤特性十分相近, 退耕 8 a 的样地与退耕 1~5 a 的土壤特性虽有差别, 但不大, 可以归为一类; 退耕 15 a 后, 土壤特性与前 8 a 的土壤产生了较大差别, 可能发生了质的变化, 所以退耕 15~31 a 的土壤归为另一类。可见, 在民勤绿洲退耕地演变过程中, 5 a、8 a 及 15 a 左右分别是三个关键时期。



注：图中纵坐标 1、2、3.....9 分别表示退耕 1 a、2 a、3 a、4 a、5 a、8 a、15 a、24 a、31 a

**Figure 5.** Clustering genealogy of cultivated land abandoned in different years

**图 5.** 不同年限退耕地聚类谱系图

从以上分析可知, 退耕地土壤物理、化学及微生物学特性的变化主要是由于土壤中的水、肥因素造成的, 该地区干旱少雨、土壤非常瘠薄, 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, 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。民勤沙区农田退耕后, 第 5 年时, 出现了物种丰富度与多样性指数明显下降, 土壤养分流失、盐渍化程度变高, 机械组成粗化、微生物数量

与微生物量减少、酶活性减弱、抗干扰能力减少等诸多问题。因此,在退耕后 5 年时是个关键时期,应该采用生态与经济的双赢式人工干预,使退耕地土壤系统得到较好的演变。

#### 4. 成果推广应用

本研究坚持“边研究、边示范、边推广”。2012~2018 年,先后在民勤湖区退耕地推广应用,对退耕 4~5 a 的土地进行了人工干预,防止退耕区土地的沙化与盐渍化,种植了节水植物及牧草,并建成濒危动物放养场试验示范区,为退耕区土地的修复及保护起到了科技支撑的作用,使退耕区的生态环境明显改善,取得了良好的效果。

#### 5. 展望

针对石羊河流域中下游不同年限退耕地土壤系统演变特征我们已做了较系统的研究[28]-[36],认为土壤粘粒、含水量、pH 值、全钾、速效钾、速效磷、硝态氮、Cl<sup>-</sup>、有机质、微生物生物量磷、脲酶、蔗糖酶等因素是退耕区民勤沙区土壤系统演变的主要驱动因子;其次有效钾、硝态氮、有效磷、钾离子、氯离子、全盐量、微生物生物量碳、微生物生物量氮、微生物数量、碳酸氢根离子、全氮及电导率等因子也与土壤系统演变有显著的相关性;退耕区民勤沙区土壤系统演变过程中,5 a、8 a 及 15 a 左右分别是三个关键时期;在民勤退耕区民勤沙区保护过程中,从退耕第 5 a 左右就要引起高度重视,进行人工有效干预,否则到第 8 a 左右就难以修复,到第 15 a 以后,土壤质量发生了质的变化,进一步加大了修复及保护难度,修复相当困难。

#### 基金项目

国家自然科学基金资助项目(31760709, 41801102, 31860175, 31560128);甘肃省青年科技基金项目(18JR3RA019)。

#### 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.
- [2] 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] 张莹花, 刘世增, 纪永福, 刘虎俊, 李发明, 李银科. 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] 刘虎俊, 王继和, 常兆丰, 马全林, 杨自辉, 詹科杰. 石羊河下游荒漠植物区系及其植被特征[J]. 生态学杂志, 2006, 25(2): 113-118.
- [5] 常兆丰, 赵明. 石羊河下游荒漠生态研究[M]. 兰州: 民勤科学技术出版社, 2006: 9-127.
- [6] 赵明瑞, 徐天军, 彭祥荣, 刘蓉, 李超超. 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.
- [7] 王方琳, 王理德, 韩富贵, 何芳兰, 张莹花, 郭春秀, 柴成武, 魏林源. 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.
- [8] Wang, L.D., Yao, T., Cheng, L., Chai, X.H., Guo, C.X., Man, D.D., Wang, D.Z. and Sun, G.Z. (2016) Soil Chemical Properties and Biological Characteristics of Discontinued Farmland in the Downstream of Shiyang River. *Nature Environment & Pollution Technology*, **15**, 117-122.
- [9] 王方琳, 魏小红, 王理德, 柴成武, 韩富贵, 张莹花, 魏林源, 郭春秀. 民勤绿洲不同年限退耕地土壤养分变化及其相关性分析[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(2): 119-124.
- [10] 王理德, 姚拓, 王方琳, 魏林源, 郭春秀, 吴春荣, 李发明. 石羊河下游退耕地土壤微生物变化及土壤酶活性[J]. 生态学报, 2016, 36(15): 4769-4779.
- [11] 王理德, 王方琳, 郭春秀, 韩福贵, 魏林源, 李发明. 土壤酶学研究进展[J]. 土壤, 2016, 48(1): 12-21.

- [12] 王理德, 姚拓, 何芳兰, 韩福贵, 郭春秀, 王方琳, 魏林源. 石羊河下游退耕地自然恢复过程及土壤酶活性的变化[J]. 草业学报, 2014, 23(4): 253-261.
- [13] 柴晓虹, 王理德, 姚拓, 韩福贵, 魏林源, 郭春秀, 张莹花. 石羊河中下游不同退耕年限次生草地土壤理化及生物学特性研究[J]. 草业学报, 2015, 24(8): 24-34.
- [14] Wang, L.D., Yao, T., Guo, C.X., Han, F.G., Wang, F.L., Sun, T. and Zhang, Y.H. (2015) Research Progress of Soil Microbiology. *Agricultural Science & Technology*, **16**, 2367-2371.
- [15] 王理德, 柴晓虹, 姚拓, 王多泽, 徐先英, 孙广正, 陈龙, 张涛. 石羊河下游绿洲边缘次生草地自然恢复过程及微生物特性的研究[J]. 草原与草坪, 2015, 35(6): 14-21.
- [16] 王理德, 郭春秀, 韩福贵, 何芳兰, 王方琳, 魏林源, 张莹花, 吴春荣. 石羊河中下游退耕地土壤系统演变规律及其驱动机制研究[J]. 中国科技成果, 2017, 20(18): 58-60.
- [17] 王理德, 徐丰, 韩福贵, 郭春秀, 王方琳, 李发明, 张莹花. 民勤绿洲生态环境保护修复与可持续发展[J]. 农学学报, 2015, 5(4): 52-57.
- [18] 李永强, 赵萌莉, 韩国栋, 焦树英. 不同年限草原撂荒地土壤理化特性研究[J]. 中国草地学报, 2012, 34(3): 61-64, 69.
- [19] 双龙, 妮萨娜, 杜江, 滕朝阳, 石成纲. 重铬酸钾氧化 - 外加加热法测定化探土壤样品中有机碳含量[J]. 安徽化工, 2016, 42(4): 110-112.
- [20] 胡俊. 土壤中有效氮磷钾的快速检验[J]. 生物化工, 2018, 4(4): 30-36.
- [21] 陈爱新. 原子吸收分光光度法在环境监测中的研究与应用[J]. 云南化工, 2018, 45(8): 179-180.
- [22] 毛静春. 中国干旱半干旱草原地区土壤中腐殖质的提取与表征研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [23] 卢芸. 采用电导法测定土壤中水溶性盐技术[J]. 农村科技, 2007(9): 21-22.
- [24] 范庆锋. 保护地土壤酸度特征及酸化机理研究[D]: [博士学位论文]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2009.
- [25] 蔡伟, 王焱, 伏兵哲, 李惠惠, 贺自春, 陈鹏安, 摆志强. 宁夏引黄灌区苜蓿品种对土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. 基因组学与应用生物学, 2018, 37(10): 4349-4356.
- [26] 文都日乐, 李刚, 张静妮, 赖欣, 易津, 范国艳, 杨殿林. 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.
- [27] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [28] Wang, L.D., Yao, T., Xu, F., Han, F.G., Guo, C.X., Wang, F.L. and Li, F.M. (2016) Ecological Environment Conservation and Sustainable Development of Minqin Oasis. *Journal of Landscape Research*, **8**, 13-17.
- [29] Wang, L.D., Guo, C.X., Xu, B.Y., Wu, H., Wang, F.L. and Li, X.J. (2019) Soil Properties in Different Years of Cultivation Abandonment in the Midstream and Downstream of Shiyang River Area. *Applied Ecology and Environmental Research*, **17**, 7561-7572. [https://doi.org/10.15666/aecer/1704\\_75617572](https://doi.org/10.15666/aecer/1704_75617572)
- [30] Guo, C.X., Wang, L.D., He, F.L., Ma, J.M., Li, J.H., An, F.B., Yuan, H.B. and Liu, K.L. (2019) Structural Characteristics of *Lycium ruthenicum* Community & Soil Properties on Different Types of Desert Rangeland in the Lower Reaches of Shiyang River. *Medicinal Plant*, **10**, 58-65.
- [31] 陈龙, 姚拓, 柴晓虹, 王理德, 马剑平, 孙广正, 安雅君, 李发明. 石羊河中下游不同退耕年限次生草地土壤无机氮、酶及微生物量冬季动态研究[J]. 草地学报, 2016, 24(2): 330-336.
- [32] Guo, C.X., Wang, L.D., Han, F.G., Ma, J.P., He, F.L., Liu, S.H.J. and Wang, F.L. (2015) Studies of Soil Physical Property on Different Abandoned Lands in the Minqin Oasis, Downstream of the Shiyang River. *Agricultural Science & Technology*, **16**, 1014-1018.
- [33] 韩福贵, 徐先英, 王理德, 王键, 张应昌, 韩生慧. 民勤荒漠区典型草本植物马蔺的物候特征及其对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2013, 33(13): 4156-4164.
- [34] 郭春秀, 王理德, 韩福贵, 马剑平, 何芳兰, 刘淑娟, 王方琳, 张莹花, 魏林源. 石羊河下游民勤绿洲不同年限退耕地土壤物理性质变化研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(27): 72-76.
- [35] 王林德, 王理德, 马剑平, 吴春荣, 郭春秀, 常丽, 张慧文. 土壤微生物学研究进展[J]. 石河子科技, 2017, 235(5): 88-94.
- [36] 韩福贵, 王理德, 王芳琳, 张莹花, 何芳兰, 郭春秀, 魏林源. 石羊河流域下游退耕地土壤酶活性及土壤肥力因子的相关性[J]. 土壤通报, 2014, 45(6): 1396-1401.