

# 青土湖不同年限退耕地植被物种多样性 及土壤酶活性研究

王佳<sup>1</sup>, 田青<sup>1\*</sup>, 王理德<sup>1,2,3\*</sup>, 何洪盛<sup>1</sup>, 宋达成<sup>2,3</sup>, 闫沛迎<sup>2</sup>

(1 甘肃农业大学 林学院, 兰州 730070; 2 甘肃省治沙研究所, 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:** 采用时空替代法, 对甘肃省民勤县青土湖不同年限退耕地(退耕 1 a、2 a、4 a、8 a、13 a、20 a、30 a、40 a)的植被演替特征、土壤酶活性进行调查, 以耕地为对照(CK), 分析植被群落与土壤酶活性的相关性, 以揭示其变化规律及其驱动机制, 为青土湖区及其相似地区退耕地生态系统修复及生态环境建设提供理论基础。结果表明: (1) 青土湖在退耕 40 a 自然恢复过程中, 9 个样方中共出现 16 科 32 属 42 种植物, 物种构成表现为: 多数种归于少数科, 大部分植物种为单属单科。(2) 随着退耕年限的增加, 群落优势种由草本植物逐渐转化成灌木植物, 植物种由退耕初期(1 a 或 2 a)的 19 种降低到退耕 4 a 的 14 种、退耕 20 a 的 13 种、退耕 30 a 的 5 种; 退耕 30 a 时耐盐碱灌木植物盐爪爪成为该地的优势种, 其重要值达到 52.862, 但退耕 40 a 时优势种盐爪爪的重要值降为 36.008。(3) 随着退耕年限增加, 植物 Margalef 丰富度指数呈波动式下降的趋势; Shannon 多样性指数和 Pielou 均匀度指数总体趋势呈先增加后减小, 再逐渐趋于稳定; Simpson 优势度指数整体变化幅度较小, 最终呈稳定的趋势。(4) 在不同土层(0~20 cm 和 20~40 cm)中, 4 种土壤酶活性随退耕年限增加总体表现出先升高后下降再逐渐趋于稳定的趋势, 均在退耕 8 a 后显著下降, 且磷酸酶和脲酶活性均显著低于蔗糖酶和过氧化氢酶活性; 与对照样地(CK)相比, 磷酸酶活性与脲酶活性均随退耕年限增加而下降; 土壤磷酸酶、蔗糖酶和脲酶活性均随土层加深而降低。(5) 相关分析结果显示, 0~20 cm 土层中, 物种数与土壤蔗糖酶活性、磷酸酶活性以及脲酶活性均呈显著正相关关系; 20~40 cm 土层中, 物种数与土壤脲酶活性呈极显著正相关关系, 与土壤过氧化氢酶活性呈显著负相关关系; Margalef 丰富度指数与 0~20 cm 土层的磷酸酶活性和蔗糖酶活性均呈显著正相关关系, 与脲酶活性呈极显著正相关关系; 20~40 cm 土层中, Margalef 丰富度指数与脲酶活性呈极显著正相关关系; Shannon 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Simpson 优势度与 4 种土壤酶活性间相关性较低且均不显著。研究认为, 在青土湖区退耕地植被自然演替过程中, 植物群落变得比较单一, 物种多样性逐年降低, 脲酶活性对物种多样性起着关键性作用。

**关键词:** 青土湖; 退耕地; 植被自然演替; 土壤酶活性

**中图分类号:** Q948.12<sup>+</sup>2.3 **文献标志码:** A

## Study on Vegetation Succession and Soil Enzyme Activities of Abandoned Land in Different Years in Qingtu Lake

WANG Jia<sup>1</sup>, TIAN Qing<sup>1\*</sup>, WANG Lide<sup>1,2,3</sup>, HE Hongsheng<sup>1</sup>, SONG Dacheng<sup>2,3</sup>, YAN Peiying<sup>2</sup>

(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)

**Abstract:** Using space-time substitution method, we investigated and analyzed the vegetation succession characteristics, changes in soil enzyme activities and their correlations for different years of abandoned land

收稿日期: 2021-07-01; 修改稿收到日期: 2021-10-06

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)

作者简介: 王佳(1996-), 女, 在读硕士研究生, 主要从事林业研究。E-mail: 2507326198@qq.com

\* 通信作者: 王理德, 研究员, 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

(returned fields 1 a, 2 a, 4 a, 8 a, 13 a, 20 a, 30 a, 40 a) in Minqin Qingtu Lake, farmland as control (CK), to explore the correlation between vegetation communities and soil enzyme activities, To reveal its change pattern and its driving mechanism, and to provide a scientific and theoretical basis for the restoration of receding farmland ecosystem and ecological environment construction in Qingtu Lake area and its similar areas. The results showed that: (1) Qingtu Lake during the natural recovery process after 40 a of fallowing, a total of 42 species, 32 genera and 16 families were found in 9 quadrats, the species composition is as follows: most species belong to a few families, and most species belong to a single genus and family. (2) With the increase of the period of returning farmland, plant species decreased from 19 species at the beginning of fallowing (1 a or 2 a) to 14 species at 4 a, 13 species at 20 a, and 5 species at 30 a. The saline-tolerant shrub plant salt claw became the dominant species in this area at 30 a of fallowing, with a maximum importance value of 52.862. The importance value of the dominant species salt claw decreased to 36.008 at 40 a of fallowing. (3) With the increase of the period of returning farmland, there is a fluctuating downward trend in the plant Margalef richness index. The overall trend of Shannon diversity index and Pielou evenness index increased first, then decreased, and then gradually stabilized. Simpson dominance index has a small change range and a stable trend. (4) The activities of the four kinds of soil enzymes in different soil layers (0—20 cm and 20—40 cm) increased firstly, then decreased and then gradually stabilized with the increase of returning years. All decreased significantly after 8 a of farmland withdrawal, and phosphatase activity and urease activity were significantly lower than sucrase activity and peroxidase activity. Both phosphatase activity and urease activity decreased with increasing years of fallowing compared to the control sample plot (CK). Soil phosphatase, sucrase and urease activities all decreased with deepening of the soil layer. (5) Correlation analysis showed that, in the 0—20 cm soil layer, the number of species was significantly and positively correlated with soil sucrase activity, phosphatase activity and urease activity; in the 20—40 cm soil layer, the correlation between the number of species and soil urease activity was extremely significant and positive, while it was significantly negatively correlated with soil peroxidase activity. Margalef richness index was significantly and positively correlated with both phosphatase activity and sucrase activity in the 0—20 cm soil layer, and was highly significantly and positively correlated with urease activity; in the 20—40 cm soil layer, Margalef richness index was extremely significantly positively correlated with urease activity. The correlations between Shannon diversity index, Pielou evenness index and Simpson dominance with the four soil enzyme activities were low and none of them were significant. The research suggests that Qingtu Lake during the natural recovery process of 40 a of fallowing, the plant community became relatively simple, and the species diversity decreased year by year, urease activity played a key role in species diversity.

**Key words:** Qingtu-Lake; abandoned land; natural succession of vegetation; soil enzyme activity

青土湖曾是民勤境内石羊河最大的湖泊<sup>[1]</sup>,是武威市民勤县绿洲边缘的荒漠-绿洲过渡带<sup>[2]</sup>。然而,近年来,由于石羊河流域中上游地区人工绿洲的扩张,使该区生态用水日趋减少,自然植被枯萎,生态环境受到严重的破坏<sup>[3-4]</sup>,使该区土地大面积弃耕而撂荒,若这些土地保护方式不当,便会加速该区风蚀沙化程度,成为新的沙尘源,形成恶性循环,严重破坏民勤绿洲生态系统<sup>[5]</sup>,给当地生态和经济造成不可估量的损失,同时国内其他地区也出现同样问题<sup>[6-8]</sup>。20世纪90年代初,引起专家学者的高度重视,并开始对退耕地生态修复进行相关研究<sup>[6]</sup>。李进等<sup>[7]</sup>在河北坝上退耕地的植被研究表明“退耕的时间并不是影响植被演替与数目增加的唯一因素”。进入21世纪后,邱阳等<sup>[8]</sup>通过DCCA排序轴分类

对黄土丘陵的退耕地植被演替的研究认为均匀度呈下降趋势,物种丰富度逐渐上升。可见,植被演替能促进退耕地的生态修复,实现可持续发展<sup>[9]</sup>。

植物多样性对生态系统的功能起着重要的作用<sup>[10]</sup>,而植物多样性中对物种多样性的研究占有很重要的地位,是群落生态学研究的重要课题<sup>[11]</sup>。当前国内外对于植物多样性的研究有慕宗杰等<sup>[12]</sup>对沙地植被研究表明随年限的延长,沙地植物群落的物种数明显增加;张仕豪<sup>[13]</sup>对石漠化区域植被研究表明物种多样性总体随着石漠化的加剧呈下降的趋势;张巧凤等<sup>[14]</sup>对草原植被研究发现位于坡地的草原群落物种多样性普遍下降,而位于低山丘陵间平坦地带的草原群落物种多样性维持稳定或有所上升;杨晶晶等<sup>[15]</sup>对山地草甸植被研究发现放牧强度

的增加能改变山地草甸植物群落物种组成;研究表明在高寒草甸区多样性指数、丰富度指数和均匀度指数总体上随退化程度的加剧呈减小的趋势<sup>[16-17]</sup>,李军豪等<sup>[18]</sup>认为随高寒草甸退化程度的加剧,物种多样性总体呈减小的趋势,但在其退化前期多样性指数会有所增大。总体来说,植被演替过程比较缓慢这是所有学者的共识,只是植被自然演替特征的差异不同<sup>[19]</sup>。

土壤是构成生态系统的要素,既是反映土壤结构和水文状况及评价土壤质量的重要指标,也是植被生长发育的载体,为其生长提供所需的养分、水分和热量<sup>[20]</sup>。而植被生长又可改善土壤结构、保持土壤肥力。土壤和植被作为一个有机整体,两者相互作用、相互影响<sup>[21]</sup>。目前植被-土壤系统的相互作用在国内外的研究比较热门,赵富王等<sup>[22]</sup>对黄土丘陵区的相关研究表明,植物根系是植物与土壤进行物质交换的通道,其根系能够改善土壤结构,提高土壤稳定性。由政等<sup>[23]</sup>对于不同演替阶段群落根系分布与土壤团聚体特征的协同变化的研究发现,植物细根在群落演替以及土壤结构变化中发挥着重要的作用,土壤植被复合系统可提高土壤质量,改善土壤结构。因此,明确植被群落特征与土壤二者关系,对于退耕地植被恢复与利用具有重要的意义。土壤酶是土壤的重要组成部分<sup>[24]</sup>,土壤酶活性的强弱是土壤肥力的重要指标,也是土壤健康程度的重要指标<sup>[25]</sup>。当前,关于土壤酶活性的相关研究主要涉及牧草对土壤酶活性的影响<sup>[26]</sup>、除草剂等农药施肥下土壤酶活性变化<sup>[27-28]</sup>、不同耕作方式对土壤酶活性的影响<sup>[29]</sup>、旅游踩踏对土壤酶活性的影响<sup>[30]</sup>、土壤结皮对土壤酶活性的影响<sup>[31]</sup>以及其他相关土壤酶活性的研究<sup>[32-33]</sup>。但对于不同年限退耕地土壤酶活性与植物演替相关性的研究甚少。本研究采用时空替代法,选取青土湖不同年限退耕地为研究对象,对植物物种多样性、土壤酶活性及相关性进行研究,旨在为该区生态系统的修复提供理论依据,为青土湖及其相似地区的生态环境建设提供技术支撑。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省武威市民勤县东部的西渠镇,样地附近已无居民居住,地理坐标为 $39^{\circ}01'44.11''\sim 39^{\circ}03'57.53''N$ 、 $103^{\circ}35'09.84''\sim 103^{\circ}37'55.49''E$ ,平均海拔为1 305 m,东、西、北三个方向都是以以前的青土湖湖面为主,东部和北部与内蒙古自治区

接壤,西靠甘肃省金昌市,南邻甘肃省武威市,多年的平均气温为 $7.4^{\circ}C$ ,极端最低气温是 $-28.8^{\circ}C$ ,极端的最高气温达 $38.1^{\circ}C$ ;年日照时数2 832.1 h;无霜期175 d,时期短,冻害天气多;全年无雨163天,年均降水量110 mm,主要集中在7—9月,占年均降雨量的73%;年平均风速2.3 m/s;沙尘暴日数26.8 d;该区气候属于温带大陆性干旱气候,干旱发生频率高,光照充足,四季分明,冬季寒冷,夏季炎热;土壤以灰棕漠土为主;地貌类型主要有3种,分别为平原地貌、风沙地貌和低山地貌;名优特产主要有:黑瓜籽、棉花、甜瓜、黄瓜;草本植物主要有碱蓬(*Suaeda glauca*)、骆驼蓬(*Peganum harmala*)、骆驼蒿(*Peganum nigellastrum*)、田旋花(*Convolvulus arvensis*)、藜(*Chenopodium album*)、虎尾草(*Chloris virgata*)等;灌木植物主要有小果白刺(*Nitraria sibirica*)、红砂(*Reaumuria soongoria*)、黑果枸杞(*Lycium ruthenicum*)、白刺盐爪爪(*Kalidium foliatum*)、怪柳(*Tamarix chinensis*)等。

### 1.2 野外调查与采样

2018年8—9月,选择未受自然因素和人为因素影响的试验区地段,退耕地时间为退耕1 a、2 a、4 a、8 a、13 a、20 a、30 a、40 a,并以耕地(CK)作为对照样地。测量并详细记录样方中物种数量、地理坐标、海拔高度(表1)。每个样地面积为 $100\text{ m}\times 100\text{ m}$ ,在每个样地内四角和中心分别布设5个灌木样方( $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ )用于测定灌木的个体数、高度、盖度以及冠幅等指标;再在每个 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 的灌木样方内四角和中心各布设1个草本样方( $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ )用于测定草本的个体数、高度和盖度等指标。

在植被调查的同时,在样方周边分别采取剖面法和5点混合法采集土壤样品,土层分为上下2个土层( $0\sim 20\text{ cm}$ 、 $20\sim 40\text{ cm}$ ),每个样点3次重复,筛掉土壤中的杂物,每个样品取重约1 kg,装入无菌袋放置于带冰块的泡沫箱内,带回实验室,存储在 $4^{\circ}C$ 的冰箱中,用于土壤酶活性的测定。

### 1.3 测定方法

**1.3.1 物种多样性的测定** 植物物种多样性可加速恢复生态系统<sup>[34]</sup>,物种多样性是植物群落的基本特征<sup>[35]</sup>,因此选用Shannon多样性指数、Simpson优势度指数、Pielou均匀度指数、Margalef丰富度指数和重要指等对青土湖区不同年限退耕地的植被群落进行测量计算。计算公式分别为:

重要值:  $IV = (\text{相对多度} + \text{相对盖度} + \text{相对高度}) \times 100/3$ <sup>[36]</sup>

表 1 不同年限退耕地的基本特征

Table 1 Basic characteristics in abandoned farmland in different years

退耕年限 Years of returning farmland/a	经纬度 Latitude and longitude	海拔 Altitude/m	群落优势种 Community dominant species
CK	39°03'52.00"N,103°35'14.00"E	1 308.1	茴香 <i>Foeniculum vulgare</i>
1	39°03'57.53"N,103°35'07.29"E	1 305.9	地肤+中亚滨藜+稗子草 <i>Kochia scoparia</i> + <i>Atriplex centralasiatica</i> + <i>Echinochloa crus-galli</i>
2	39°03'49.18"N,103°35'11.43"E	1 314.2	中亚滨藜+稗子草+枸杞 <i>Atriplex centralasiatica</i> + <i>Echinochloa crus-galli</i> + <i>Lycium chinense</i>
4	39°03'50.69"N,103°35'10.2"E	1 308.7	芨芨草+骆驼蒿+白刺+沙枣 <i>Achnatherum splendens</i> + <i>Peganum nigellastrum</i> + <i>Nitraria tangutorum</i> + <i>Elaeagnus angustifolia</i>
8	39°03'25.13"N,103°36'08.92"E	1 305.0	黑果枸杞+盐爪爪 <i>Lycium ruthenicum</i> + <i>Kalidium foliatum</i>
13	39°02'30.29"N,103°36'18.18"E	1 306.4	黑果枸杞 <i>Lycium ruthenicum</i>
20	39°01'44.11"N,103°37'01.85"E	1 308.1	黑果枸杞 <i>Lycium ruthenicum</i>
30	39°02'39.51"N,103°37'29.73"E	1 302.0	黑果枸杞+盐爪爪 <i>Lycium ruthenicum</i> + <i>Kalidium foliatum</i>
40	39°02'54.31"N,103°37'55.49"E	1 302.8	黑果枸杞+盐爪爪 <i>Lycium ruthenicum</i> + <i>Kalidium foliatum</i>

Shannon 多样性指数:  $H = -\sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$

Simpson 优势度指数:  $C = \sum_{i=1}^s \frac{N_i(N_i - 1)}{N(N - 1)}$

Pielou 均匀度指数:  $E = \frac{H}{\ln S}$

Margalef 丰富度指数:  $D_{MG} = \frac{S - 1}{\ln N}$

$P_i$  是频度,  $N_i$  是第  $i$  个物种的个体数,  $S$  是物种数量,  $N$  是所有物种的总个体数<sup>[37]</sup>。

**1.3.2 土壤酶活性的测定** (1) 土壤过氧化氢酶活性采用容量法测定<sup>[38]</sup>。用 A 表示滴定 25 mL 原始的过氧化氢混合液所消耗的高锰酸钾量(毫升数), 用 B 表示滴定土壤滤液所消耗的高锰酸钾量(毫升数), 用 T 表示高锰酸钾滴定度的矫正值, 代表高锰酸钾标定后的真正浓度与试验所需配制的高锰酸钾的浓度(即 0.02 mol/L)的比值。(A - B) × T 即为过氧化氢酶活性, 表示 30 min 后 1 g 土壤的 0.02 mol/L 高锰酸钾的毫升数。

(2) 土壤脲酶活性采用靛酚蓝比色法测定<sup>[39]</sup>。酶活性用 24 h 后 1 g 土壤中 NH<sub>3</sub>-N 的毫克数表示。

NH<sub>3</sub>-N(mg) =  $a \times V \times n / m$   $a$  为从标准曲线中查得的 NH<sub>3</sub>-N 毫克数;  $V$  为显色液体积(50 mL);  $n$  为分取倍数;  $m$  为烘干土的质量。

(3) 土壤蔗糖酶活性使用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定<sup>[39]</sup>。蔗糖酶活性以 24 h 后 1 g 土壤葡萄糖的毫克数表示。

葡萄糖(mg) =  $a \times V \times n / m$   $a$  为标准曲线中葡萄糖毫克数;  $V$  为显色液体积(50 mL);  $n$  为分取

倍数;  $m$  为烘干土的质量。

(4) 土壤磷酸酶活性使用磷酸苯二钠比色法测定<sup>[39]</sup>。磷酸酶活性以 24 h 后 1 g 土壤中释出的酚的毫克数表示。

酚(mg) =  $a \times V \times n / m$   $a$  为标准曲线中酚毫克数;  $V$  为显色液体积(50 mL);  $n$  为分取倍数;  $m$  为烘干土的质量。

#### 1.4 数据处理与分析

Excel 2013 软件用于基础数据处理, SPSS 20.0 软件用于单因素方差分析、相关性分析, 在差异显著条件下采用 LSD 进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 青土湖区不同年限退耕地植物群落物种组成及重要值

在青土湖退耕 40 a 的植被自然演替过程中, 调查的 9 个样地共出现 16 科 32 属 42 种植物, 其中一年生草本(15 种)占总物种数的 35.71%、多年生草本(16 种)占总物种数的 38.10%、灌木(8 种)占总物种数的 19.05%, 木质落叶大藤本、落叶乔木和缠绕草质藤本各 1 种占总物种数的 7.14%, 而且藜科(8 属 13 种)、禾本科(7 属 7 种)、蒺藜科(2 属 5 种)3 种植物种类占总物种数的 59.52%, 分别占总种属数的 25%、21.88% 和 6.25%; 剩余物种包括十字花科、菊科、怪柳科分别为 2 属 2 种, 茄科为 1 属 2 种共占总物种数的 19.05%。其余物种如白花丹科(黄花补血草 *Limonium aureum*)、豆科(甘草 *Glycyrrhiza uralensis*)、胡颓子科(沙枣 *Elaeagnus an-*

*gustifolia*)、兰雪科(玛多黄花补血草 *Limonium aureum* var. *maduoensis*)、萝藦科(鹅绒藤 *Cynanchum chinense*)、葡萄科(地锦 *Parthenocissus tricuspidata*)、伞形科(茴香 *Foeniculum vulgare*)、十字花科(独行菜 *Lepidium apetalum*)和紫草科(砂引草 *Tournefortia sibirica*)分别为1科1属。

不同年限退耕地植被群落的物种组成和重要值见表2,在退耕1 a后,田间大部分为一年生草本[稗子草(*Echinochloa crus-galli*)、藜(*Chenopodium album*)和地肤(*Kochia scoparia*)等]和少数多年生草本植物[赖草(*Leymus secalinus*)、田旋花(*Convolvulus arvensis*)、山苦荬(*Ixeris chinensis*)和细叶骆驼蓬(*Peganum harmala*)等],并伴有少数灌木,如盐爪爪(*Kalidium foliatum*)、怪柳(*Tamarix chinensis*)等植物;退耕2 a后,一年生草本稗子草、盐生草、地肤、藜和狗尾草的重要值明显减少为10.726、7.716、6.334、7.599、0.412;退耕4 a后,植物群落中一年生和多年生草本植物种数量明显减少,其重要值也随之降低。碱蓬、田旋花等植物的重要值减小为1.212和2.467;退耕后8~20 a,群落内灌木植物的数量逐渐增多,但植物种类总数量较稳定,木质落叶大藤本地锦和小灌木红砂等的植物首次出现,其中一年生草本,如藜、地肤、碱蓬、独行菜等植物完全退出,群落优势种由草本植物逐渐转化成灌木植物,盐爪爪、黑果枸杞等灌木植物成为群落优势种,物种数由退耕1 a的19种降低到退耕20 a的13种;退耕30 a后,物种数下降到5种,主要以黑果枸杞和盐爪爪灌木植物为主,植物群落相对稳定;退耕40 a时耐盐碱植物盐爪爪成为该地的优势种,其重要值为36.008。

## 2.2 不同年限退耕地植被群落的物种多样性变化

由表3可知,在退耕40 a的自然恢复过程中,个体数(N)、物种数(S)和Margalef丰富度指数随退耕年限增加呈波动式下降的趋势,其中Margalef丰富度指数在退耕1~4 a中呈上升的趋势,在退耕4 a时达到最大值2.194,在退耕4~40 a中缓慢地下降。Shannon多样性指数和Pielou均匀度指数在退耕1~4 a中不断增加,在退耕4~13 a里逐渐减小,在退耕20 a后慢慢趋于稳定。Simpson优势度指数在退耕13 a时达到最大值0.412,但整体变化幅度较小,最终呈稳定的趋势。

## 2.3 不同年限退耕地土壤酶活性变化

由图1可知,在0~20 cm土层中,土壤磷酸酶活性在退耕1 a时达到极大值 $0.023 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ,

退耕13 a时达到极小值 $0.004 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ,在退耕8~13 a时波动幅度大,差异显著;在0 a时土壤蔗糖酶活性达到极大值 $0.592 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ,在退耕1~2 a时下降,4~8 a时上升后再迅速下降,在退耕30~40 a时回升,在退耕30 a达到极小值 $0.092 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ,且在不同年限退耕样地间差异性均不显著;土壤脲酶活性变化比较明显,在退耕0~1 a呈上升趋势,退耕1 a时达到极大值 $0.036 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ,在退耕1~2 a呈降低趋势,退耕2~8 a较为稳定,退耕8~13 a脲酶活性差异显著,波动幅度大,在退耕13~30 a时脲酶活性变化平稳,在退耕30~40 a时回升;过氧化氢酶活性总体呈先上升后下降再逐渐趋于稳定,退耕8 a时达到极大值 $0.842 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ,退耕20 a达到极小值 $0.624 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ,8~13 a和20~30 a过氧化氢酶活性波动幅度大,差异显著。在20~40 cm土层中,土壤磷酸酶活性呈先升高(0~1 a)后波动式下降(1~20 a)再升高(20~40 a)的趋势,退耕1 a时达到极大值 $0.0250 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ,退耕20 a达到极小值 $0.002 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ,退耕1~2 a和8~13 a土壤磷酸酶活性波动幅度大,差异显著。除退耕1 a、13 a、30 a和40 a以外,其他退耕年限均表现出土壤磷酸酶活性上土层高于下土层;土壤蔗糖酶活性在退耕1 a时达到极大值 $0.368 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ,退耕13 a时达到极小值 $0.053 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ,在退耕0~1 a时迅速上升,退耕1~2 a时急速下降,退耕2~13 a时呈波动式下降趋势,退耕13~20 a呈上升趋势,退耕20~30 a呈下降趋势,退耕30~40 a呈上升趋势,在退耕0~13 a中土壤蔗糖酶活性随土层加深而降低,在退耕20~40 a中随土层加深而升高;脲酶活性呈先上升后下降趋势,退耕1 a时达到极大值 $0.034 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ,30 a时达到极小值 $0.0003 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ,除13 a外,其他年限的土壤脲酶活性均随土层加深而降低;但土壤过氧化氢酶活性的变化趋势不显著,退耕2 a时达到极小值 $0.756 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ,退耕40 a时达到极大值 $0.819 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ,除退耕8 a外,其他年限的土壤过氧化氢酶活性均随土层加深而升高。

## 2.4 植物群落特征与土壤酶活性间的相关性

对不同深度的土壤酶活性和植物群落特征之间的关系进行相关性分析,由表4可知,0~20 cm土层中,过氧化氢酶活性与个体数呈显著负相关关系( $P < 0.05$ );物种数与土壤蔗糖酶活性、磷酸酶活性以及脲酶活性呈显著正相关关系( $P < 0.05$ );20~40

表 2 不同退耕年限植被群落的物种组成和重要值

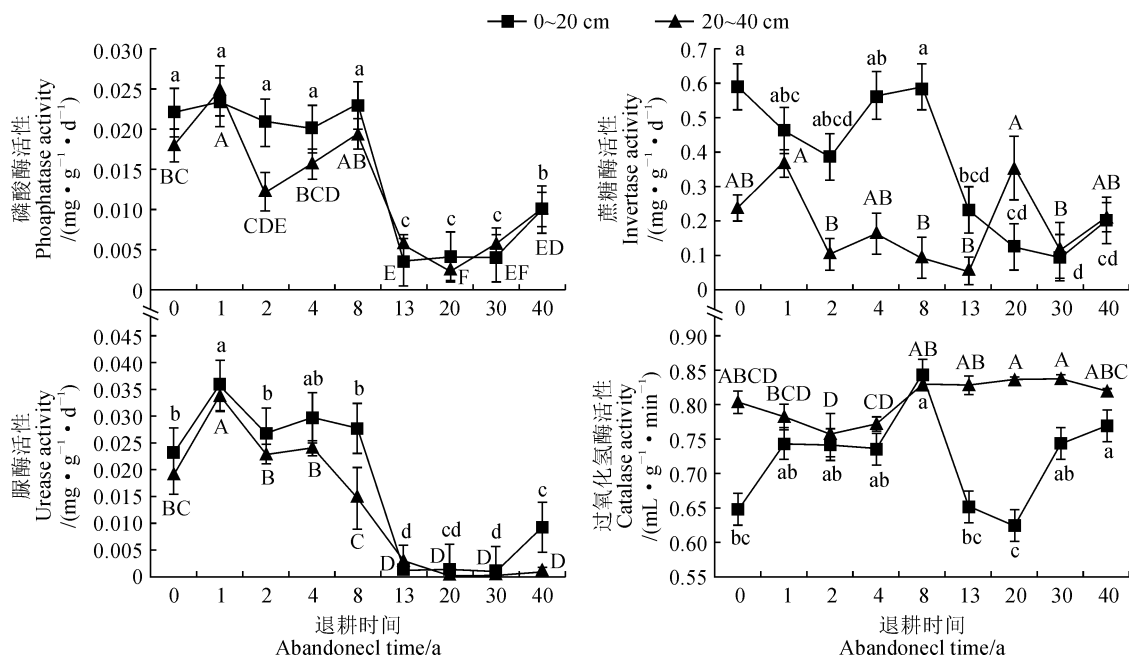
Table 2 Species composition and importance values of vegetation communities in different years of fallowing

物种 Species	退耕时间 Abandoned time/a							
	1	2	4	8	13	20	30	40
灰绿藜 <i>Chenopodium glaucum</i>	3.57	0	0	0	0	0	0	0
盐生草 <i>Halogeton glomeratus</i>	9.459	7.716	0	0	0	0	0	0
藜 <i>Chenopodium album</i>	8.049	7.599	0	0.379	0	0	0	0
中亚滨藜 <i>Atriplex centralasiatica</i>	10.225	11.017	8.508	3.306	0	4.191	0	0
稗子草 <i>Echinochloa crus-galli</i>	22.003	10.726	0	0	0	0	0	0
地肤 <i>Kochia scoparia</i>	9.855	6.334	4.306	1.329	0	0	0	0
狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	2.273	0.412	0	0	0	0	0	0
碱蓬 <i>Suaeda glauca</i>	2.404	4.101	1.212	1.025	0	0	0	0
虎尾草 <i>Chloris virgata</i>	3.959	4.257	0	0	5.171	5.441	0	0
白茎盐生草 <i>Halogeton arachnoideus</i>	3.51	5.458	0	6.231	7.391	7.461	3.468	3.843
平卧碱蓬 <i>Suaeda prostrata</i>	0	2.943	0	0	0	0	0	0
星花碱蓬 <i>Suaeda stellatiflora</i>	0	0	0	0	0	1.039	0	0
画眉草 <i>Eragrostis pilosa</i>	0	0	0	0	0.099	1.305	0	0.883
蒙古猪毛菜 <i>Salsola ikonnikovii</i>	0	0	0	0	4.705	0	0	0
茴香 <i>Foeniculum vulgare</i>	2.767	0	0	0	0	0	0	0
独行菜 <i>Lepidium apetalum</i>	0	0	0	0.094	0	0	0	0
蒿 <i>Artemisia selengensis</i>	3.867	0	0	0	0	0	0	0
山苦荬 <i>Ixeris chinensis</i>	3.997	0	0	0	0	0	0	0
砂引草 <i>Tournefortia sibirica</i>	0.597	0	0	0	0	0	0	0
田旋花 <i>Convolvulus arvensis</i>	5.383	4.438	2.469	0	2.969	0	0	0
赖草 <i>Leymus secalinus</i>	2.193	3.268	4.767	0	10.288	0	0	0
细叶骆驼蓬 <i>Peganum harmala</i>	1.616	3.184	5.151	6.001	8.739	0	0	0
球果群心菜 <i>Lepidium chalepense</i>	0	2.525	0	0	0	0	0	0
甘草 <i>Glycyrrhiza uralensis</i>	0	1.15	0	0	0	0	0	0
五星蒿 <i>Echinopilon divaricatum</i>	0	0	0	0	0	0	0	0.736
玛多黄花补血草 <i>Limonium aureum</i> var. <i>maduensis</i>	0	0	0	0	0	0.438	0	0
骆驼蓬 <i>Peganum harmala</i>	0	0	0	0	0	0	0	1.913
骆驼蒿 <i>Peganum nigellastrum</i>	0	0	14.682	4.311	10.452	9.74	11.605	10.068
芨芨草 <i>Achnatherum splendens</i>	0	0	10.002	0	0	0	0	0
黄花补血草 <i>Limonium aureum</i>	0	0	8.989	0	6.813	4.257	0	0
芦苇 <i>Phragmites australis</i>	0	0	4.954	1.279	0	0	0	0
鹅绒藤 <i>Cynanchum chinense</i>	0	1.843	0	0	0	0	0	0
小果白刺 <i>Nitraria sibirica</i>	0	8.91	9.049	7.506	0	0	0	0
红砂 <i>Reaumuria soongarica</i>	0	0	0	9.967	0	13.8	6.241	8.214
小叶碱蓬 <i>Suaeda microphylla</i>	0	0	0	0	7.881	8.722	0	0
白刺 <i>Nitraria tangutorum</i>	0	0	11.533	8.143	0	0	0	8.5
枸杞 <i>Lycium chinense</i>	0	10.307	0	10	11.563	0	0	0
怪柳 <i>Tamarix chinensis</i>	2.318	3.812	4.359	4.128	0	0	0	0
地锦 <i>Parthenocissus tricuspidata</i>	0	0	0	1.033	1.221	2.017	0	0
黑果枸杞 <i>Lycium ruthenicum</i>	0	0	0	18.235	22.708	23.188	25.824	29.835
盐爪爪 <i>Kalidium foliatum</i>	1.955	0	0	17.033	0	18.401	52.862	36.008
沙枣 <i>Elaeagnus angustifolia</i>	0	0	10.019	0	0	0	0	0
样地物种数	19	19	14	17	13	13	5	9

表3 物种多样性随退耕年限变化表

Table 3 Changes of species diversity with the number of years of conversion

退耕时间 Abandoned time /a	个体数 Individual number(N)	物种数 Species number(S)	Shannon 多样性指数(H)	Pielou 均匀度指数(E)	Simpson 优势度指数(C)	Margalef 丰富度指数(D <sub>MG</sub> )
1	1 125	19	1.81	0.419	0.409	1.875
2	1 516	19	2.576	0.606	0.234	1.704
4	405	14	3.447	0.798	0.112	2.194
8	863	17	2.481	0.652	0.239	1.333
13	2 172	13	1.839	0.483	0.412	1.173
20	3 445	13	2.194	0.593	0.277	1.021
30	567	5	1.652	0.639	0.335	0.547
40	652	9	2.221	0.74	0.251	0.749



不同字母表示处理间差异达  $P < 0.05$

图1 不同年限退耕地土壤酶活性变化

Different letters above the bars mean significant difference at the 5% level

Fig. 1 Changes in soil enzyme activities of fallow land in different years

表4 植被群落多样性和土壤酶活性相关性表

Table 4 Correlation between vegetation community diversity and soil enzyme activities

土层 Soil layer	酶 Enzyme	个体数 Individual number(N)	物种数 Species number(S)	Shannon 多样性指数 (H)	Pielou 均匀度指数 (E)	Simpson 优势度指数 (C)	Margalef 丰富度指数 (D <sub>MG</sub> )
0~20 cm	磷酸酶活性 Phosphatase activity	-0.456	0.738 *	0.508	0.052	-0.359	0.772 *
	蔗糖酶活性 Invertase activity	-0.429	0.792 *	0.634	0.129	-0.420	0.818 *
	脲酶活性 Urease activity	-0.404	0.757 *	0.513	0.340	-0.330	0.845 **
	过氧化氢酶活性 Catalase activity	-0.793 *	-0.034	0.219	0.348	-0.316	0.107
20~40 cm	磷酸酶活性 Phosphatase activity	-0.532	0.581	0.247	-0.130	-0.077	0.666
	蔗糖酶活性 Invertase activity	0.342	0.168	-0.147	-0.269	0.154	0.121
	脲酶活性 Urease activity	-0.333	0.842 **	0.390	-0.191	-0.149	0.893 **
	过氧化氢酶活性 Catalase activity	0.287	-0.811 *	-0.561	-0.058	0.370	-0.833 *

注: \* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关。 \*\* 在 0.01 水平(双侧)上显著相关

Note: \* Correlation is significant on the 0.05 level (bilateral); \*\* Correlation is significant on the 0.01 level (bilateral)

cm 土层中,物种数和土壤脲酶活性呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ ),而与过氧化氢酶活性呈显著负相关关系( $P < 0.05$ );Margalef 丰富度指数与 0~20 cm 土层的磷酸酶活性和蔗糖酶活性均呈显著正相关关系( $P < 0.05$ ),与脲酶活性呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ );20~40 cm 土层中,Margalef 丰富度指数与脲酶活性呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ ),与过氧化氢酶活性呈显著负相关关系( $P < 0.05$ );Shannon 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Simpson 优势度与 4 种土壤酶活性间相关性较低且均不显著( $P > 0.05$ )。

### 3 讨 论

群落结构是植物群落的基本属性,也是认识群落的组成、变化和发展趋势的基础<sup>[40]</sup>,群落物种多样性是一个群落结构和功能复杂性的量度<sup>[41]</sup>,研究物种多样性是群落生态学的重要研究课题<sup>[42]</sup>,利于阐明植物群落结构特征的发展阶段及稳定性的问题<sup>[43]</sup>。

从不同样地植被群落物种组成及重要值综合分析来看,在青土湖退耕 40 a 的植被演替过程中,9 个样方共出现 16 科 32 属 42 种植物,其中,藜科、禾本科、蒺藜科、十字花科、菊科、柽柳科、茄科以上 7 科占总物种数的 78.57%,比例比较大,说明这些植物在退耕地的植被演替中起着重要的作用,而且物种构成表现为多数种属于少数科、少数种属于多数科,大部分植物种为单属单科;植被演替过程中表现出连续性特征,如白茎盐生草基本在不同年限退耕地中连续出现。此外,不同年限退耕地植被群落演替还具有递进性。总体来说,随退耕年限增加,植物群落演替大致经历了地肤→盐生草→狗尾草→骆驼蒿→小叶碱蓬→黑果枸杞→红砂→盐爪爪的演替过程。符合荒漠地区植物区系的总体特征,这种结构和王理德<sup>[44]</sup>对民勤退耕区次生草地研究相一致。

青土湖 40 a 退耕地植被恢复过程中,随退耕年限增加,物种在逐渐减少并趋于简单。在退耕 1~4 a 中,Shannon 多样性和 Pielou 均匀度指数不断增加,说明在退耕初期时,群落内物种的种类在逐渐增加,此时由于退耕前农作物的施肥,使得植被的生长空间和生长资源相对充足,一年生草本植被生长没有受到限制;在退耕 4~13 a 中逐渐减小,在退耕 20 a 后慢慢趋于稳定。当一年生草本植被数量达到土地承载上限后,植被的生长空间和生长资源不足,不能供所有植被生长,因此开始出现竞争,部分植被没

有足够的生长空间和生长资源被淘汰,因此植被种类开始减少,最后趋于稳定。Simpson 优势度指数的变化表明,植物群落物种在自然演替过程中向着简单、稳定的方向逐渐发展。退耕过程由草本植物向灌木演替,这一结论与李治元等<sup>[45]</sup>研究的石羊河下游盐渍化弃耕地植被演替特征分析的结果相似,但与白文娟等<sup>[46]</sup>研究黄土丘陵沟壑区退耕地、李永强等<sup>[47]</sup>研究典型草原区撂荒地的结果不同,这可能是由于不同环境条件所导致的,本实验地为青土湖干旱区退耕地,与典型草原区撂荒地、黄土丘陵沟壑区退耕地的水文、土壤、地形、气候等不同,因此导致结果也不同。

土壤酶是土壤中不可缺少的成分,可反映土壤的环境健康状况<sup>[48]</sup>,可作用于转化土壤的有机质<sup>[49]</sup>。在不同土层(0~20 cm 和 20~40 cm)的 4 种土壤酶活性随退耕年限增加表现出先升高后下降再逐渐趋于稳定,在退耕初期,随着植被的恢复,其种类和数量逐渐增加,植被的根系和枯落物为土壤微生物提供了良好的生存环境,土壤微生物数量种类也随之增加<sup>[50]</sup>,而土壤酶多来源于土壤微生物和植被根系,与此同时植被枯落物和植物根系分解也会需要大量土壤酶进行催化,因此土壤酶活性逐渐升高。随后植被经过竞争演替阶段逐渐稳定下来,植被数量和种类也随之降低,其产生的枯落物以及土壤中的有机质也随之减少,因此土壤酶活性逐渐降低趋于稳定。本研究发现随退耕年限增加,土壤磷酸酶活性与土壤脲酶活性的变化显著,但土壤蔗糖酶活性与土壤过氧化氢酶活性变化均不显著,两者均于退耕 1 a 时达到最大值,这与韩福贵等<sup>[51]</sup>在石羊河下游退耕地的研究结果相似,但是与孟立君<sup>[52]</sup>研究的不同种植年限土壤酶活性特征、刘雨等<sup>[53]</sup>研究燕沟流域退耕地土壤酶活性特征的结果有差异。这是由于退耕初期,土壤中持有原来耕作时的大量水分和养分,致使退耕后,出现大量的杂草,以 1 a 生的草本植物为主,种类繁多,植物根系释放出较多的酶,土壤中有有机质和其他因子含量较多,加之在土壤表层伴有大量的腐殖质及枯枝落叶等,使土壤中微生物数量增加,土壤物质代谢能力加强,致使土壤酶活性大幅提高,之后,土壤水分和养分随退耕年限增加而逐渐被消耗,部分植物死亡,极少数耐干旱的植被存活下来,植物种类的降低,其产生的枯枝落叶和腐殖质相应减少,微生物的数量也随之下降,土壤脲酶活性和磷酸酶活性均出现不同程度的下降,但随退耕年限的增加,土壤过氧化氢酶



活性升降变化不显著,说明该区退耕年限的变化对土壤过氧化氢酶活性的影响不明显。

从土层垂直分布来看,土壤磷酸酶、蔗糖酶和脲酶活性均随土层深度的增加而下降,这与有关的研究报道一致<sup>[54]</sup>,但与王学林等<sup>[55]</sup>在沙地樟子松人工林土壤酶活性的研究结果不同。这是因为研究区20~40 cm土壤层的腐殖质和枯枝落叶比0~20 cm土壤层的少,0~20 cm土壤层有充分的营养源,促进微生物大量的繁殖和生长,而且,土壤表层的水分条件,温度条件及通气状况较好,使微生物的生长速度加快,代谢更加活跃,导致土壤表层酶活性大。另外,由于该区光照充足,蒸发强烈,降雨稀少,天气干燥,属于典型的温带大陆性气候<sup>[56]</sup>,若遇降雨也只能存留在土壤的表层,随土层不断的加深,水分和养分也随之降低,细根和凋落物的数量减少,抑制微生物生长,导致土壤酶活性随土层加深而降低,但是深层土壤的酶活性(蔗糖酶)出现了较高的现象,主要是因为退耕13 a后,植被数量和种类因缺水等因素降低,出现了以黑果枸杞为主的单一群落,降低对土壤水分的消耗<sup>[57]</sup>,在这一阶段,大多数的植被主要是以深根系的灌木植物为主,根系作为土壤与植物进行信息传递和物质交换的重要载体,是植物响应外界环境改变的重要途径,也是构成不同根际微生态特征的关键因素<sup>[58]</sup>。根系分泌物,腐殖质及枯枝落叶的增加,会直接作用于根际土壤,加速了土壤的养分积累,这会使根际土壤酶活性在一定程度上有所提高,从而改善土壤性质,提高土壤肥力<sup>[59]</sup>。而土壤肥力提高后,可以为该研究区的植被生长提供更丰富的营养物质。

土壤酶系主要来源于微生物的分泌、残体的腐解及动植物的分泌<sup>[60]</sup>,土壤酶的含量可直接或间接地受植物的影响<sup>[61]</sup>。植物群落特征与土壤酶活性相关性分析表明物种数越多,土壤脲酶活性越强,可见土壤脲酶活性对植物群落特征的变化影响较大;通过0~40 cm土层Margalef丰富度指数与土壤脲酶活性的相关性分析表明:Margalef丰富度指数越大,土壤脲酶活性越高,Margalef丰富度指数对土壤脲酶活性影响较大。总体来看,Shannon多样性指数、Simpson优势度和Pielou均匀度指数与4种土壤酶活性影响较小;个体数、物种数、Margalef丰富度指数对4种土壤酶活性影响较大。这主要是植被在自然恢复的过程中,其覆盖度的增加,生长产生的枯枝落叶和腐殖质以及根系的分泌物也随之增

加,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,最终影响土壤酶活性,使其发生变化。同样的,土壤酶活性的变化又会使植物的生长受到影响。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。

## 4 结 论

1)青土湖退耕40 a自然恢复过程中,9个样方中共出现16科32属42种植物,物种构成表现为:多数种属于少数科,大部分植物种为单属单科。

2)随着退耕年限的增加,群落优势种由草本植物逐渐转化成灌木植物。

3)植物Margalef丰富度指数呈波动式下降的趋势;Shannon多样性指数和Pielou均匀度指数总体趋势为先增加后减小,再逐渐趋于稳定;Simpson优势度指数整体变化幅度较小,最终呈稳定的趋势。植物群落物种在自然演替过程中向着简单、稳定的方向逐渐发展。

4)在不同土层(0~20 cm和20~40 cm)中,4种土壤酶活性随退耕年限增加总体表现出先升高后下降再趋于稳定的趋势。均在退耕8 a后显著下降,且磷酸酶和脲酶活性均显著低于蔗糖酶活性和过氧化氢酶活性。与对照样地(CK)相比,磷酸酶活性与脲酶活性均随退耕年限增加而下降;土壤磷酸酶、蔗糖酶和脲酶活性均随土层加深而降低。

5)通过相关分析显示,在0~20 cm土层中,过氧化氢酶活性与个体数呈显著负相关关系;物种数与蔗糖酶活性、磷酸酶活性以及脲酶活性的关系显著相关,呈正相关关系;20~40 cm土层中,物种数与土壤脲酶活性呈极显著正相关关系,与土壤过氧化氢酶活性呈显著负相关关系;Margalef丰富度指数与土壤0~20 cm土层的磷酸酶活性和蔗糖酶活性均呈显著正相关关系,与脲酶活性呈极显著正相关关系;在20~40 cm土层中,Margalef丰富度指数与土壤脲酶活性呈极显著正相关关系;Shannon多样性指数、Pielou均匀度指数和Simpson优势度与4种土壤酶活性间相关性较低且均不显著。

6)青土湖退耕地植被自然演替过程中,物种多样性逐年降低,多样性指数总体趋于减少,土壤酶活性对物种多样性影响较大,特别是脲酶活性对物种多样性起着关键性作用。

## 参考文献:

- [1] 赵 军, 杨建霞, 朱国锋. 生态输水对青土湖周边区域植被覆盖度的影响[J]. 干旱区研究, 2018, **35**(6): 1 251-1 261.  
ZHAO J, YANG J X, ZHU G F. Effect of ecological water conveyance on vegetation coverage in surrounding area of the qingtu lake[J]. *Arid Zone Research*, 2018, **35**(6): 1 251-1 261.
- [2] 张 华, 张玉红, 张改改. 民勤绿洲青土湖植被优势种地上生物量估算[J]. 干旱区地理, 2020, **43**(1): 201-210.  
ZHANG H, ZHANG Y H, ZHANG G G. Aboveground biomass estimation of the dominant species of vegetation in the Qingtu Lake at Minqin Oasis[J]. *Arid Land Geography*, 2020, **43**(1): 201-210.
- [3] 王 蓓, 赵 军, 胡秀芳. 石羊河流域生态系统服务权衡与协同关系研究[J]. 生态学报, 2018, **38**(21): 7 582-7 595.  
WANG B, ZHAO J, HU X F. Analysis on trade-offs and synergistic relationships among multiple ecosystem services in the Shiyang River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(21): 7 582-7 595.
- [4] 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 G Y, WANG L, ZHANG W X. 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.
- [5] 王新友, 马全林, 靳虎甲, 等. 石羊河下游人工梭梭林土壤呼吸变化特征及其与水热因子的关系[J]. 干旱区地理, 2019, **42**(3): 570-580.  
WANG X Y, MA Q L, JIN H J, *et al.* Soil respiration variation characteristics and its relationship with hydrothermic factor of artificial *Haloxyylon ammodendron* forest in lower reaches of Shiyang River[J]. *Arid Land Geography*, 2019, **42**(3): 570-580.
- [6] 王 博, 赵沛义, 任永峰, 等. 退耕地生态恢复的研究进展[J]. 内蒙古农业科技, 2015, **43**(4): 113-116.  
WANG B, ZHAO P Y, REN Y F, *et al.* Research progress on ecological restoration of abandoned farmland[J]. *Inner Mongolia Agricultural Science and Technology*, 2015, **43**(4): 113-116.
- [7] 李 进, 赵 雪, 宝 音, 等. 河北坝上弃耕地植被的演替特征及环境因子的影响[J]. 中国沙漠, 1994, (4): 15-22.  
LI J, ZHAO X, BAO Y, *et al.* Successional characteristics of vegetation on old field and effects of environment factors on the vegetation[J]. *Journal of Desert Research*, 1994, (4): 15-22.
- [8] 邱 扬, 张金屯. DCCA 排序轴分类及其在关帝山八水沟植物群落生态梯度分析中的应用[J]. 生态学报, 2000, (2): 199-206.  
QIU Y, ZHANG J T. The ordination axes clustering based on detrended canonical correspondence analysis ordination and its application to the analysis of the ecological gradients of plant communities[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, (2): 199-206.
- [9] 任 海, 蔡锡安, 饶兴权, 等. 植物群落的演替理论[J]. 生态科学, 2001, **20**(4): 59-67.  
REN H, CAI X A, RAO X Q, *et al.* The theory on succession of plant community[J]. *Ecological Science*, 2001, **20**(4): 59-67.
- [10] SA W J, AN L Z, SA W. Changes in plant community diversity and aboveground biomass along with altitude within an alpine meadow on the Three-River source region[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, **57**(27): 3 573-3 577.
- [11] 岳永杰, 苏志成, 韩 君, 等. 内蒙古大兴安岭林区典型森林群落物种多样性研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2020, **41**(4): 21-26.  
YUE Y J, SU Z C, HAN J, *et al.* Species diversity and community structure research of forest vegetation in greater higgan mountain[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2020, **41**(4): 21-26.
- [12] 慕宗杰, 刘果厚, 桂 荣, 等. 飞播年限对浑善达克沙地植物群落特征的影响[J]. 中国草地学报, 2020, **42**(2): 58-66.  
MU Z J, LIU G H, GUI R, *et al.* The effect of aerial-seeding years on plant community characteristics in Otindag sandy land [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2020, **42**(2): 58-66.
- [13] 张仕豪. 喀斯特石漠化植物群落演替规律与结构经营技术[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2020.
- [14] 张巧凤, 刘桂香, 于红博, 等. 锡林郭勒草原主要植被群落变化[J]. 草业科学, 2015, **32**(9): 1 381-1 391.  
ZHANG Q F, LIU G X, YU H B, *et al.* The changes of main plant communities in Xilingol grassland[J]. *Pratacultural Science*, 2015, **32**(9): 1 381-1 391.
- [15] 杨晶晶, 吐尔逊娜依·热依木, 张青青, 等. 放牧强度对天山北坡中段山地草甸植被群落特征的影响[J]. 草业科学, 2019, **36**(8): 1 953-1 961.  
YANG J J, TUERXUNNAYI·RENYIMU, ZHANG Q Q, *et al.* Effects of grazing intensity on plant community characteristics in mountain meadows in the middle section of the northern slope of the Tianshan Mountains[J]. *Pratacultural Science*, 2019, **36**(8): 1 953-1 961.
- [16] 杨元武, 李希来, 周旭辉, 等. 高寒草甸植物群落退化与土壤环境特征的关系研究[J]. 草地学报, 2016, **24**(6): 1 211-1 217.  
YANG Y W, LI X L, ZHOU X H, *et al.* Study on relationship between plant community degradation and soil environment in an alpine meadow[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2016, **24**(6): 1 211-1 217.
- [17] 王彦龙, 马玉寿, 孙小弟, 等. 大武地区不同程度退化草地群落结构及植物量分析[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2007, **37**(6): 1-3.  
WANG Y L, MA Y S, SUN X D, *et al.* Analysis of community structure and biomass among grasslands with different degraded level in Dawu region[J]. *Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary Sciences*, 2007, **37**(6): 1-3.
- [18] 李军豪, 杨国靖, 王少平. 青藏高原区退化高寒草甸植被和土壤特征[J]. 应用生态学报, 2020, **31**(6): 2 109-2 118.  
LI J H, YANG G J, WANG S P. Vegetation and soil characteristics of degraded alpine meadows on the Qinghai-Tibet Plateau, China: a review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(6): 2 109-2 118.
- [19] 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.
- [20] 吴江琪, 马维伟, 李 广, 等. 黄土高原 4 种植被类型对土壤物理特征及渗透性的影响[J]. 水土保持学报, 2018, **32**(4): 133-138.  
WU J Q, MA W W, LI G, *et al.* Effects of four vegetation types on soil physical characteristics and permeability in Loess Plateau (in China)[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, **32**(4): 133-138.

- [21] 濮阳雪华, 王月玲, 赵志杰, 等. 陕北黄土区不同植被恢复模式植被与土壤耦合关系研究[J]. 草业学报, 2021, **30**(5): 13-24.  
PUYANG X H, WANG Y L, ZHAO Z J, *et al.* Coupling relationships between vegetation and soil in different vegetation restoration models in the Loess region of Northern Shaanxi Province [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, **30**(5): 13-24.
- [22] 赵富王, 王 宁, 苏雪萌, 等. 黄土丘陵区主要植物根系对土壤有机质和团聚体的影响[J]. 水土保持学报, 2019, **33**(5): 105-113.  
ZHAO F W, WANG N, SU X M, *et al.* Effects of main plant roots on soil organic matter and aggregates in Loess hilly region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, **33**(5): 105-113.
- [23] 由 政, 姚 旭, 景 航, 等. 不同演替阶段群落根系分布与土壤团聚体特征的协同变化[J]. 水土保持研究, 2016, **23**(6): 20-25+31.  
YOU Z, YAO X, JING H, *et al.* Coordinated variation between root distributions and soil aggregate characteristics at different successional stages[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, **23**(6): 20-25+31.
- [24] 许 江, 戴慧敏, 刘国栋, 等. 不同土地利用方式下土壤酶活性的变化研究[J]. 地质与资源, 2020, **29**(6): 579-584.  
XU J, DAI H M, LIU G D, *et al.* Study on the changes of soil enzyme activity under different land use types[J]. *Geology and Resources*, 2020, **29**(6): 579-584.
- [25] MARX M C, WOOD M, JARVIS S C. A microplate fluorimetric assay for the study of enzyme diversity in soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, **33**(12-13): 1 633-1 640.
- [26] 韩国君, 何明珠, 黄海霞, 等. 黄土高原种植不同人工牧草对土壤酶活性的影响[J]. 水土保持通报, 2019, **39**(3): 19-24.  
HAN G J, HE M Z, HUANG H X, *et al.* Effects of different forage varieties on soil enzyme activities in Loess Plateau[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, **39**(3): 19-24.
- [27] 杨峰山, 高梦颖, 孙 丛, 等. 4类除草剂对土壤酶活性的影响研究进展[J]. 中国农学通报, 2021, **37**(8): 97-102.  
YANG F S, GAO M Y, SUN C, *et al.* The effect of four herbicides on soil enzyme activity: research progress [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, **37**(8): 97-102.
- [28] LI G D, CONYERS M K, HELYAR K R, *et al.* Long-term surface application of lime ameliorates subsurface soil acidity in the mixed farming zone of South-eastern Australia[J]. *Geoderma*, 2019, **338**: 236-246.
- [29] 王永慧, 轩清霞, 王丽丽, 等. 不同耕作方式对土壤有机碳矿化及酶活性影响研究[J]. 土壤通报, 2020, **51**(4): 876-884.  
WANG Y H, XUAN Q X, WANG L L, *et al.* Soil organic carbon mineralization and soil enzyme activities under different tillage methods[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, **51**(4): 876-884.
- [30] 段青倩, 樊文华, 吴艳军, 等. 旅游踩踏对五台山东台山草地草甸土壤酶活性的影响[J]. 水土保持通报, 2015, **35**(4): 97-100.  
DUAN Q Q, FAN W H, WU Y J, *et al.* Effect of tourist trampling on enzyme activity of Dongtai meadow in Wutai Mountain[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, **35**(4): 97-100.
- [31] 杨航宇, 刘艳梅, 王廷璞. 荒漠区生物土壤结皮对土壤酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2015, **52**(3): 654-664.  
YANG H Y, LIU Y M, WANG T P. Effects of biological soil crusts on soil enzyme activities in desert area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, **52**(3): 654-664.
- [32] 张 鹏, 赵 洋, 黄 磊, 等. 植被重建对露天煤矿排土场土壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2016, **36**(9): 2 715-2 723.  
ZHANG P, ZHAO Y, HUANG L, *et al.* Effect of revegetation on soil extracellular enzyme activity in the dumping site of an open-pit coal mine in Heidaigou[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(9): 2 715-2 723.
- [33] 张体彬, 展小云, 冯 浩. 盐碱地土壤酶活性研究进展和展望[J]. 土壤通报, 2017, **48**(2): 495-500.  
ZHANG T B, ZHAN X Y, FENG H. Research advance and prospect of soil enzymes activities in salinealkali soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, **48**(2): 495-500.
- [34] 胡婵娟, 刘国华, 陈利顶, 等. 黄土丘陵区坡面尺度上不同植被格局下植物群落和土壤性质研究[J]. 干旱区地理, 2012, **35**(5): 787-794.  
HU C J, LIU G H, CHEN L D, *et al.* Vegetation and soil properties under different vegetation patterns along the slope in the hilly area of the Loess Plateau[J]. *Arid Land Geography*, 2012, **35**(5): 787-794.
- [35] 王 蒙, 董治宝, 罗万银, 等. 巴丹吉林沙漠南缘植被物种多样性及其与土壤特性的关系[J]. 西北植物学报, 2015, **35**(2): 379-388.  
WANG M, DONG Z B, LUO W Y, *et al.* Species diversity of vegetation and its relationship with soil characteristics in the southern marginal zone of the Badain Jaran Desert[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2015, **35**(2): 379-388.
- [36] 袁刚毅, 郭其强, 杨 瑞. 草海国家级自然保护区森林群落优势种群数量动态及物种多样性研究[J]. 西北植物学报, 2021, **41**(7): 1 229-1 239.  
YUAN G Y, GUO Q Q, YANG R. Study on the quantitative dynamics and species diversity of dominant species in forest communities in Caohai National Nature Reserve[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, **41**(7): 1 229-1 239.
- [37] 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 H S, TIAN Q, WANG L D, *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.
- [38] 王晨冰, 张 帆, 赵秀梅, 等. 垄膜保墒集雨对旱地桃园土壤养分及酶活性的影响[J]. 干旱区地理, 2018, **41**(3): 572-581.  
WANG C B, ZHANG F, ZHAO X M, *et al.* Effects of the ridge mulching and soil moisture on soil nutrient and enzyme activity in dryland peach orchard[J]. *Arid Land Geography*, 2018, **41**(3): 572-581.
- [39] 姚槐应, 黄昌勇. 土壤微生物生态学及其实验技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [40] 袁 蕾, 周华荣, 宗召磊, 等. 乌鲁木齐地区典型灌木群落结构特征及其多样性研究[J]. 西北植物学报, 2014, **34**(3): 595-603.  
YUAN L, ZHOU H R, ZONG Z L, *et al.* Structural characteristics and diversity of typical shrub plant community in the Urumqi region[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2014, **34**(3): 595-603.
- [41] 尹林克, 南伟疆, 严 成, 等. 乌鲁木齐城市植被类型及其

- 特点[J]. 干旱区研究, 2011, **28**(6): 1 011-1 019.
- YIN L K, NAN W J, YAN C, *et al.* Study on types and features of urban vegetation in Urumqi[J]. *Arid Zone Research*, 2011, **28**(6): 1 011-1 019.
- [42] 梁雪琼, 周华荣, 黄世光. 新疆灌木植物地理成分分析[J]. 西北植物学报, 2010, **30**(3): 593-600.
- LIANG X Q, ZHOU H R, HUANG S G. Geographical elements analysis of shrub plants in Xinjiang[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2010, **30**(3): 593-600.
- [43] 孙一梅, 田 青, 吕 朋, 等. 极端干旱与氮添加对半干旱沙质草地物种多样性、叶性状和生产力的影响[J]. 干旱区研究, 2020, **37**(6): 1 569-1 579.
- SUN Y M, TIAN Q, LÜ P, *et al.* Effects of extreme drought and nitrogen addition on species diversity, leaf trait, and productivity in a semiarid sandy grassland[J]. *Arid Zone Research*, 2020, **37**(6): 1 569-1 579.
- [44] 王理德. 民勤退耕区次生草地植被及土壤系统演变研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016.
- [45] 李治元, 李昌龙, 王多泽, 等. 石羊河下游盐渍化弃耕地植被演替特征分析[J]. 西北植物学报, 2010, **30**(10): 2 087-2 092.
- LI Z Y, LI C L, WANG D Z, *et al.* Characteristics of vegetation succession on salinized abandoned fields in lower reaches of Shiyang River[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2010, **30**(10): 2 087-2 092.
- [46] 白文娟, 焦菊英. 黄土丘陵沟壑区退耕地主要自然恢复植物群落的多样性分析[J]. 水土保持研究, 2006, **13**(3): 140-142, 145.
- BAI W J, JIAO J Y. Analyses on diversity of primary natural restoration vegetation communities in abandoned croplands in the hilly-gulled region of the Loess Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, **13**(3): 140-142, 145.
- [47] 李永强, 许志信. 典型草原区撂荒地植物群落演替过程中物种多样性变化[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2002, **23**(4): 26-31.
- LI Y Q, XU Z X. Changes of species diversity in successional of plant community of abandoned land in typical steppe[J]. *Journal of Inner Mongola Institute of Agriculture and Animal Husbandry*, 2002, **23**(4): 26-31.
- [48] 王振东, 刘根源, 余 阳, 等. 草甘膦对土壤酶活性的影响[J]. 河南科技学院学报(自然科学版), 2020, **48**(6): 37-42.
- WANG Z D, LIU G Y, YU Y, *et al.* Effects of glyphosate herbicide on the activities of soil enzyme[J]. *Journal of Henan Institute of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2020, **48**(6): 37-42.
- [49] 王彦武, 柴 强, 欧阳雪芝, 等. 民勤绿洲荒漠过渡带固沙林土壤微生物数量和酶活性研究[J]. 干旱区地理, 2016, **39**(1): 104-111.
- WANG Y W, CHAI Q, OUYANG X Z, *et al.* Soil microbial populations and enzyme activities under different sand-fixation forests in oasis-desert ecotone of Minqin Desert[J]. *Arid Land Geography*, 2016, **39**(1): 104-111.
- [50] 闵 红, 和文祥, 李晓明, 等. 黄土丘陵区植被恢复过程中土壤微生物数量演变特征[J]. 西北植物学报, 2007, **27**(3): 588-593.
- MIN H, HE W X, LI X M, *et al.* Evaluative feature of soil microbial population under plant restored process in Loess regions[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2007, **27**(3): 588-593.
- [51] 韩福贵, 王理德, 王芳琳, 等. 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): 1 396-1 401.
- HAN F G, WANG L D, WANG F L, *et al.* Analysis of relationship between soil enzymes activities and fertilities in the field of grain for green in downstream of the Shiyang River[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, **45**(6): 1 396-1 401.
- [52] 孟立君. 设施不同种植年限土壤酶活性及其与土壤肥力关系的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2004.
- [53] 刘 雨, 郑粉莉, 安韶山, 等. 燕沟流域退耕地土壤有机碳、全氮和酶活性对植被恢复过程的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2007, **25**(6): 220-226.
- LIU Y, ZHENG F L, AN S S, *et al.* The responses of soil organic carbon, total nitrogen and enzymatic activity to vegetation restoration in abandoned lands in Yangou watershed[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007, **25**(6): 220-226.
- [54] 于德良. 沙地樟子松人工林地土壤酶活性变化及影响因子[D]. 辽宁阜新: 辽宁工程技术大学, 2019.
- [55] 王学林, 高广磊, 丁国栋, 等. 沙地樟子松人工林地土壤酶活性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2021, **35**(1): 114-120.
- WANG X L, GAO G L, DING G D, *et al.* Characteristics of soil enzyme activities of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, **35**(1): 114-120.
- [56] 杨丽娟, 黄 峰, 潘若云, 等. 青土湖绿洲植被指数适用性及优选研究[J]. 安徽农业科学, 2020, **48**(19): 65-68, 72.
- YANG L J, HUANG F, PAN R Y, *et al.* Study on the applicability and optimization of vegetation index in Qingtu oasis[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2020, **48**(19): 65-68, 72.
- [57] 柴成武, 王理德, 尉秋实, 等. 民勤青土湖区不同年限退耕地土壤水分和养分变化[J]. 水土保持研究, 2020, **27**(5): 101-105.
- CHAI C W, WANG L D, WEI Q S, *et al.* Soil moisture and nutrient changes in different years of abandoned farmlands in Qingtu district[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, **27**(5): 101-105.
- [58] 王小平, 肖 肖, 唐天文, 等. 连香树人工林根系分泌物输入季节性变化及其驱动的根本微生物特性研究[J]. 植物研究, 2018, **38**(1): 47-55.
- WANG X P, XIAO X, TANG T W, *et al.* Seasonal changes of the input of root exudates and its driving characteristics of rhizosphere microbe in a *Cercidiphyllum japonicum* Sieb. plantation[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2018, **38**(1): 47-55.
- [59] LI L, XING M, LÜ J W, *et al.* Response of rhizosphere soil microbial to *Deyeuxia angustifolia* encroaching in two different vegetation communities in alpine tundra[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 43 150.
- [60] GUAN S Y. Soil Enzyme and Study Methods[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986: 206-239.
- [61] CASTELLANO S D. Influence of cropping and sulfur fertilization on sulfur transformations in soil/[EB/OL]. 2009.