

# 疏勒河流域不同植被类型土壤酶活性动态变化

南丽丽<sup>1</sup>, 郭全恩<sup>2,3</sup>, 曹诗瑜<sup>2</sup>, 钱美宇<sup>1</sup>

(1. 甘肃农业大学草业学院/草业生态系统教育部重点实验室/甘肃省草业工程实验室/中-美草地畜牧业可持续研究中心, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省农科院土壤肥料与节水农业研究所, 甘肃 兰州 730070; 3. 甘肃农业大学甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:**以疏勒河流域中游玉门饮马农场不同植被类型(白刺、小麦、苜蓿、孜然和茴香)土壤为研究对象,以荒地作为对照,探讨疏勒河流域绿洲荒漠过渡带不同植被类型条件下土壤酶活性季节变化特征。结果表明:不同植被类型显著提高了土壤脲酶、碱性磷酸酶、硝酸还原酶、脱氢酶和过氧化氢酶活性,且 0~20 cm 土层高于 20~40 cm 土层。其中苜蓿地土壤脲酶和硝酸还原酶含量最高,其平均值比对照分别增加了 77.88% 和 156.94%;孜然地碱性磷酸酶含量最高,平均是对照的 4.43 倍;小麦地脱氢酶和过氧化氢酶活性最高,其平均值比对照分别提高了 112.72% 和 51.00%。土壤脱氢酶活性与土壤磷酸酶、过氧化氢酶之间呈显著、极显著的正相关关系。土壤酶活性受生长季节影响较大,但无明显的规律性。5 种植被类型土壤酶活性存在差异,但因季节因素的影响,很难确定哪种植被类型对土壤酶活性的影响最大。

**关键词:**疏勒河流域;植被类型;土壤酶活性

中图分类号: S154.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2014)01-0134-06

## Dynamic changes of soil enzyme activities of different vegetation types in Shulehe River Basin, China

NAN Li-li<sup>1</sup>, GUO Quan-en<sup>2,3</sup>, CAO Shi-yu<sup>2</sup>, QIAN Mei-yu<sup>1</sup>

(1. College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University; Ministry of Education Key Laboratory of Ecosystem/Gansu Province Laboratory of Pratacultural Engineering; Sino-US Center for Grazingland Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China; 2. Soil Fertilizer and water-saving agriculture Institute, GAAS, Lanzhou, 730070, China; 3. Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Land Crop Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** Activities of soil enzymes were measured for the five vegetation types (*Nitraria sibirica*, *Triticum aestivum*, *Medicago sativa*, *Cuminum cyminum*, and *Foeniculum vulgare*) in Shulehe River Basin. The results showed that activities of soil enzymes including urease, alkaline phosphatase, nitrate reductase, dehydrogenase, and catalase increased significantly after planting different vegetations. Enzyme activities in the 0~20 cm soil layer were higher than those in the 20~40 cm soil layer. Alfalfa soil had the highest urease and nitrate reductase contents, increased by 77.88% and 156.94% compared with CK, respectively. Cumin soil had the highest alkaline phosphatase content, being 4.43 times than CK, and wheat soil had the highest dehydrogenase and catalase activities, being 112.72% and 51.00% greater than CK, respectively. Correlation analysis showed that there existed significant correlations among the dehydrogenase, alkaline phosphatase, and catalase. There were significant differences in enzyme activities between five tested vegetation types, but it varied with growing seasons, indicating that the enzyme activities should be an important index for soil fertility.

**Keywords:** Shulehe River Basin; vegetation type; soil enzyme activity

土壤酶是一种生物催化剂,主要来源于土壤中的动物、植物和微生物<sup>[1]</sup>,参与土壤中各种有机质的

分解、合成与转化,以及无机物质的氧化与还原等过程,其活性可以反映土壤中生物代谢的强弱和物质

收稿日期:2013-04-11

基金项目:国家自然科学基金(41163002,41363004);甘肃省高校基本科研业务费、甘肃省自然科学基金(1208RJZA142,0803KJZA04);甘肃农业大学干旱生境作物学重点实验室开放基金(GSCS-2010-15)专项资助

作者简介:南丽丽(1979—),女,甘肃天水人,博士,副教授,主要从事牧草栽培与育种研究。E-mail: nanli@gasu.edu.cn.

转化过程的速度,是土壤生态质量的良好标记<sup>[2]</sup>,特别是在极其脆弱的荒漠化生态系统中土壤酶的生态作用就显得更加重要。

近年来,国内外针对不同的土地利用方式<sup>[3]</sup>、种植制度<sup>[4]</sup>、培肥措施<sup>[5]</sup>、秸秆还田<sup>[6]</sup>和重金属污染<sup>[7]</sup>等对土壤酶活性的影响做了大量研究,针对绿洲荒漠过渡带领域的研究主要集中在过渡带的特征分析、分类、生态恢复重建以及遥感监测和环境质量综合评价等方面<sup>[8-12]</sup>,而有关绿洲荒漠过渡带不同植被类型对土壤酶活性的影响研究还鲜见报道。因此,本文选取甘肃疏勒河流域 5 种植被类型土壤为研究对象,分析土壤酶活性的季节变化特征,旨在从植被恢复的角度探讨不同植被对土壤质量的影响,为绿洲区的可持续发展和荒漠区的生态恢复和重建提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区自然概况

所选研究区位于甘肃省河西走廊玉门市境内西北边缘(96°45' ~ 97°12'E, 40°26' ~ 40°30'N),属疏勒河流域中游,为大陆性荒漠气候,年平均气温 7.6℃,极端最低气温 -28.2℃,年日照时数 3 150 h,日照率 68%,太阳年辐射总量 609.19 kJ·cm<sup>-2</sup>。≥10℃积温 2 870℃,无霜期 140 d 左右。年平均降水量 75 mm,多集中于 7—9 月,年均蒸发量 2 511 mm,年相对湿度 39%。多年平均风速 3.7 m·s<sup>-1</sup>,最大风速 28 m·s<sup>-1</sup>,主导风向为东、西风。

以疏勒河流域的 5 种植被类型为研究对象,它们分别为白刺(*Nitraria sibirica*, NS)、小麦(*Triticum aestivum*, TA)、苜蓿(*Medicago sativa*, MS)、孜然(*Cuminum cyminum*, CC)和茴香(*Foeniculum vulgare*, FV),并选择一个荒地作为对照样地(CK),具体样点描

述如表 1。

表 1 样地基本特征

编号 No.	植被类型 Vegetation type	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔 Altitude/m
NS	白刺 <i>Nitraria sibirica</i>	40°29'00"	97°01'30"	1394
TA	小麦 <i>Triticum aestivum</i>	40°27'32"	97°00'09"	1394
CC	孜然 <i>Cuminum cyminum</i>	40°28'07"	97°00'44"	1396
FV	茴香 <i>Foeniculum vulgare</i>	40°27'18"	96°59'58"	1400
MS	苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	40°26'54"	96°59'36"	1402
CK	荒地 Wasteland	40°27'45"	97°00'20"	1396

### 1.2 样品采集及分析

2012 年 5 月 15 日、7 月 15 日、10 月 15 日,分别在试验地各处理小区按 S 形选取 5 种植被类型土壤,用土钻法取 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 土样,重复 4 次。采用靛酚蓝比色法测定土壤脲酶活性,以 37℃ 下培养 24 h 后 1 g 土壤中 NH<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 质量(mg·g<sup>-1</sup>)表示;磷酸苯二钠(用硼酸缓冲液)比色法测定碱性磷酸酶活性,以 24 h 后 1 g 土壤中苯酚的质量(mg·g<sup>-1</sup>)表示<sup>[13]</sup>;紫外分光光度法测定过氧化氢酶活性,以 20 min 内 1 g 土壤中分解的过氧化氢的质量(mg·g<sup>-1</sup>)表示<sup>[14]</sup>;三苯基四氮唑氯化物(TTC)比色法测定脱氢酶活性,以 24 h 后 1 g 土壤生成 TTC 的质量分数表示(mg·g<sup>-1</sup>);酚二磺酸比色法测定硝酸还原酶活性,以 24 h 后 1 g 土壤中嫌气条件下被还原的硝酸根的质量分数表示(mg·g<sup>-1</sup>)。样地土壤化学性状见表 2。

表 2 样地土壤化学性状

Table 2 Chemical properties of the experimental fields

指标 Index	土层深度/cm Soil depth	NS	TA	CC	FV	MS	CK
速效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Available P	0 ~ 20	8.81	13.45	9.24	10.76	9.77	8.25
	20 ~ 40	6.54	5.34	4.20	5.32	8.70	1.24
速效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Available K	0 ~ 20	122.04	46.27	28.39	26.03	36.16	31.90
	20 ~ 40	83.46	35.45	26.61	20.77	24.75	28.17
pH 值 pH value	0 ~ 20	8.59	8.53	8.42	7.96	8.12	8.59
	20 ~ 40	8.65	8.58	8.55	8.02	8.16	8.65
全盐/(g·kg <sup>-1</sup> ) Total salt	0 ~ 20	20.99	10.89	2.00	3.41	3.30	6.08
	20 ~ 40	22.35	5.22	1.33	9.14	2.30	2.08

### 1.3 数据统计分析

数据采用 SPSS16.0 和 Microsoft Excel 2003 软件进行处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同植被类型对土壤脲酶活性的影响

脲酶能促进尿素水解,水解产生的氨是植物氮素营养的直接来源<sup>[15]</sup>。图 1 显示,不同植被类型显著影响土壤脲酶活性。5 种植被类型 0~20 cm 和 20~40 cm 土层脲酶活性均显著高于对照 ( $P < 0.05$ ),且 0~20 cm > 20~40 cm 土层,表明脲酶在表层

通过酶促反应形成无机氮的能力较强。0~20 cm 土层,白刺、小麦、孜然、茴香和苜蓿平均比荒地(对照)分别提高了 5.09%、53.64%、22.52%、75.89% 和 78.94%;20~40 cm,白刺、小麦、孜然、茴香和苜蓿平均比荒地(对照)依次增加了 5.13%、41.72%、15.81%、48.44% 和 76.82%,表明 5 种植被类型均能不同程度提高脲酶活性和供氮水平,其中,苜蓿供氮效果更有效。在整个生长季,土壤脲酶活性 5 月最高,10 月居中,7 月最低。

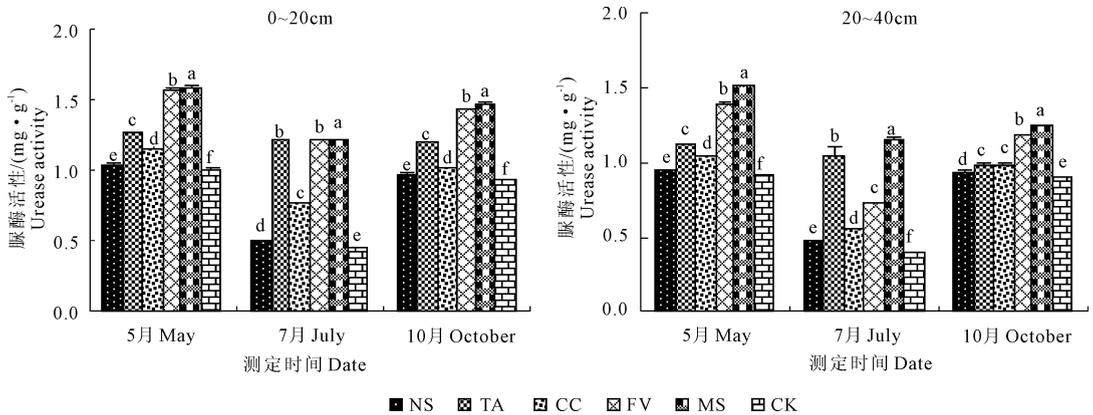


图 1 不同土层土壤脲酶活性变化

Fig. 1 Variety of urease activities in different soil layers

注:同月数据间不同字母表示差异显著 ( $P = 0.05$ ),下同。

Note: Bars with different letters are significantly different at  $P < 0.05$  level. The same below.

### 2.2 不同植被类型对土壤碱性磷酸酶活性的影响

磷酸酶是评价土壤磷素生物转化方向与强度的指标,其活性的高低直接影响着土壤中有机磷的分解转化及其生物有效性<sup>[16]</sup>。由表 3 可知,不同植被类型土壤碱性磷酸酶活性随着土层深度增加呈现出递减的规律,并都显著高于对照 ( $P < 0.05$ )。在 0~

20 cm 土层,除 7 月小麦与孜然地块碱性磷酸酶活性无显著差异外,其余月份均是孜然显著高于白刺、小麦、茴香和苜蓿 ( $P < 0.05$ )。在 20~40 cm 土层,除 5 月小麦与孜然地块碱性磷酸酶活性差异不显著外,5 月和 10 月孜然显著高于白刺、茴香和苜蓿 ( $P < 0.05$ );7 月小麦显著高于其他植被类型 ( $P < 0.05$ )。

表 3 不同土层土壤碱性磷酸酶活性变化/( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )

Table 3 Alkaline phosphatase activities in different soil layers

采样时间 Sampling date	土层深度/cm Soil depth	NS	TA	CC	FV	MS	CK
5 月 May	0~20	0.021b	0.023b	0.029a	0.021b	0.022b	0.014c
	20~40	0.018b	0.021ab	0.023a	0.014c	0.018b	0.008d
7 月 July	0~20	0.050d	0.078a	0.078a	0.058c	0.067b	0.022e
	20~40	0.047d	0.071a	0.055c	0.052c	0.063b	0.018e
10 月 October	0~20	0.032e	0.140b	0.161a	0.067d	0.093c	0.019f
	20~40	0.025d	0.095b	0.102a	0.053c	0.091b	0.017e

### 2.3 不同植被类型对土壤硝酸还原酶活性的影响

土壤硝酸还原酶在嫌气条件下催化硝酸盐为亚硝酸盐,测定其活性可了解土壤氮素转化中脱氮作

用的强度及土壤氮素的损失状况<sup>[17]</sup>。由表 4 可知,不同植被类型土壤硝酸还原酶活性随季节变化呈先降低后升高的变化趋势。5 月到 7 月,各土层土壤

硝酸还原酶活性显著降低 ( $P < 0.05$ ); 7 月到 10 月, 各土层土壤硝酸还原酶活性显著增加 ( $P < 0.05$ ), 且 0~20 cm 大于 20~40 cm 土层。在 0~20 cm 土层, 白刺、小麦、孜然、茴香和苜蓿平均比荒地(对照)分别增加了 43.40%、36.76%、39.55%、35.36% 和

140.56%; 20~40 cm, 白刺、小麦、孜然、茴香和苜蓿平均比荒地(对照)依次增加了 72.60%、58.47%、46.53%、71.10% 和 173.32%, 苜蓿的硝酸还原酶活性最高, 这是由于苜蓿具有一定的固氮作用, 其促进氮素分解的硝酸还原酶活性也高。

表 4 不同土层土壤硝酸还原酶活性变化/( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )

Table 4 Nitrate reductase activities in different soil layers

采样时间 Sampling date	土层深度/cm Soil depth	NS	TA	CC	FV	MS	CK
5 月 May	0~20	0.038b	0.035b	0.039b	0.035b	0.071a	0.027c
	20~40	0.032b	0.027bc	0.026c	0.028bc	0.052a	0.017d
7 月 July	0~20	0.027b	0.023c	0.026bc	0.028b	0.040a	0.017d
	20~40	0.017c	0.015c	0.018bc	0.022b	0.034a	0.010d
10 月 October	0~20	0.039c	0.041b	0.037c	0.035c	0.064a	0.029d
	20~40	0.032b	0.031b	0.024c	0.030b	0.042a	0.020d

## 2.4 不同植被类型对土壤脱氢酶活性的影响

脱氢酶能催化有机物质脱氢, 起着氢的中间转化传递作用, 其活性高低直接反映了土壤微生物的活动强度<sup>[18]</sup>。由表 5 可知, 5 种植被类型上下层土壤脱氢酶活性均显著高于荒地(对照) ( $P < 0.05$ ), 其原因可能是植物的活根提供分泌物, 形成根—土界面特定的微生态环境, 死根提供有机质, 为微生物的生长和繁殖提供了碳源, 增加了脱氢酶的来源。

各植被类型土壤脱氢酶活性随季节变化呈降低趋势, 5 月份最高, 10 月份最低。在 0~20 cm 土层, 5 月小麦显著高于茴香、孜然和白刺, 苜蓿显著高于孜然和白刺 ( $P < 0.05$ ); 7 月小麦显著高于其他植被类型 ( $P < 0.05$ ); 10 月小麦最高, 白刺最低。在 20~40 cm 土层, 5 月孜然显著高于小麦、茴香、苜蓿和白刺 ( $P < 0.05$ ), 7 和 10 月小麦显著高于其他植被类型 ( $P < 0.05$ )。各土层间土壤脱氢酶活性规律不明显。

表 5 不同土层土壤脱氢酶活性变化/( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )

Table 5 Dehydrogenase activities in different soil layers

采样时间 Sampling date	土层深度/cm Soil depth	NS	TA	CC	FV	MS	CK
5 月 May	0~20	2.197d	2.627a	2.402c	2.451bc	2.571ab	1.244e
	20~40	2.096d	3.030b	3.188a	2.383c	2.453c	1.644e
7 月 July	0~20	1.106d	2.096a	1.258cd	1.420c	1.856b	0.924e
	20~40	1.153c	1.970a	1.154c	1.192c	1.427b	0.980d
10 月 October	0~20	0.744b	0.958a	0.867ab	0.953a	0.849ab	0.417c
	20~40	0.697c	1.095a	0.599d	0.650cd	0.828b	0.338e

## 2.5 不同植被类型对土壤过氧化氢酶活性的影响

过氧化氢酶能分解生物呼吸和有机物生化反应产生的  $\text{H}_2\text{O}_2$ , 解除其对活细胞的毒害。土壤中过氧化氢酶活性可以用来表征土壤氧化强度, 其在有机质氧化和腐殖质形成过程中起重要作用<sup>[19]</sup>。图 2 所示, 不同植被类型均表现为下层土壤过氧化氢酶活性低于上层, 且不同植被类型均显著增加了土壤过氧化氢酶活性, 说明不同植被类型下土壤过氧化氢酶的解毒能力增强, 有利于解除过氧化氢对土壤

和生物毒害作用。在 0~20 cm 土层, 白刺、小麦、孜然、茴香和苜蓿平均分别为荒地(对照)的 1.27 倍、1.56 倍、1.27 倍、1.31 倍和 1.45 倍; 20~40 cm 土层, 白刺、小麦、孜然、茴香和苜蓿平均分别是荒地(对照)的 1.30 倍、1.46 倍、1.23 倍、1.24 倍和 1.39 倍, 即不同土层过氧化氢酶活性大小顺序基本一致, 均以小麦、苜蓿土壤过氧化氢酶活性较高, 孜然较低, 白刺、茴香居于中间。过氧化氢酶活性在不同生长季节其动态变化不明显。

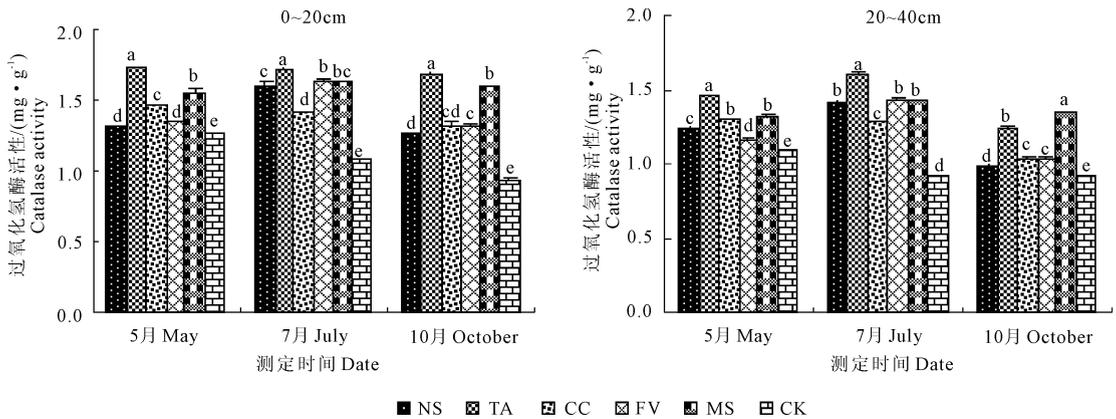


图 2 不同土层土壤过氧化氢酶活性变化

Fig.2 Catalase activities in different soil layers

为探讨不同植被类型下土壤酶活性之间的关系,对 5 种土壤酶活性进行了相关分析。结果表明,脱氢酶与磷酸酶、过氧化物酶之间呈显著、极显著正相关,相关系数分别为 0.869、0.936。

### 3 结论与讨论

土壤酶活性的高低可以直接或间接反映土壤肥力和土壤健康程度<sup>[20]</sup>,可作为土壤质量的生物指标<sup>[21]</sup>。本试验结果表明,疏勒河流域不同植被类型显著增加了土壤酶活性,由于荒地植被生物量与凋落物量少,很难有枯落物等物质归还到土壤中,造成土壤养分低下,加之水分亏缺,严重地制约了微生物的生长与繁殖,因此土壤酶活性相对较低,种植植被后,归还到土壤中的枯落物显著增加,促进了微生物的生长与繁殖,酶活性增加。因此,在合理的利用和管理下,通过种植人工植被可以降低土壤风蚀,改善水分条件,植物的根系活动增加和枯枝落叶还田作用导致土壤有机物质的积累和生物学性状的提高。

不同植被类型由于其枯落物种类、数量和根系分泌物等多种因素的差异,其土壤酶活性产生分化。不同植被类型土壤酶活性在垂直分布上表现出随土层深度的增加酶活性呈减弱的趋势,表明同一种酶活性在垂直空间上存在变化,且土壤上层酶活性普遍高于土壤下层,这与有关文献<sup>[20,22]</sup>报道一致。这主要是由于不同植被类型的枯枝落叶在土壤表层的积累与分解,利于各种微生物的活动,土壤酶活性也较高;也可能与该区域土层薄,下层土壤发育不良有关。

影响土壤酶活性的因素很多,不同植被或作物类型、土壤类型、气候变化、耕作措施、作物生长阶段等<sup>[23-25]</sup>均影响土壤酶活性。土壤水热条件的改变影响植被生长及其微生物的生存和繁衍,从而对土

壤酶产生间接作用。本试验中,不同季节所表现出的酶活性差异也说明了这一点。比如 5 月份,土壤脲酶、脱氢酶活性较高,这是由于小麦、孜然、茴香 3 月下旬播种时地块均施了氮肥,改善了土壤理化性状,为微生物的生长提供了良好的环境条件和能源,增加了土壤脲酶和脱氢酶的来源;而白刺和苜蓿均为多年生植物,5 月份正处于返青期,根系活力强,微生物代谢旺盛,促进根系分泌大量有机物质,土壤脲酶、脱氢酶活性也相应增高。碱性磷酸酶活性 10 月份表现出峰值,这是由于小麦、孜然、茴香均已收割,苜蓿和白刺的地上部逐渐枯黄,其地上部的枯枝落叶及地下部的残留根系经微生物分解,增加了土壤有机物质,使土壤碱性磷酸酶活性升高。因不同植物对外界环境条件的响应是不同的,也就是它们的旺盛生长时间可能有差异,所以采样季节的不同将直接影响评价结果。因此,从本试验中很难比较出哪种植被类型对土壤酶活性的影响最大。今后生产中,在比较不同植被类型对土壤的改良效果时,作季节性的土壤酶活性分析的同时,必须结合其他土壤肥力指标进行综合分析,可能会更科学。

#### 参考文献:

- [1] 余娜,刘济明,张超,等.不同沙生植被土壤酶活性分异特征研究[J].水土保持研究,2010,17(1):77-87.
- [2] 赫晓慧,常庆瑞,温仲明,等.农牧交错带不同人工植被下荒漠化土壤肥力的变化[J].中国沙漠,2006,26(6):915-919.
- [3] 王光华,金剑,韩晓增.不同土地管理方式对黑土土壤微生物量碳和酶活性的影响[J].应用生态学报,2007,18(6):1275-1280.
- [4] 雍太文,杨文钰,向达兵,等.不同种植模式对土壤氮素转化及酶活性的影响[J].应用生态学报,2011,22(12):3227-3235.
- [5] 马冬云,郭天财,宋晓,等.尿素施用量对小麦根际土壤微生物数量及土壤酶活性的影响[J].生态学报,2007,27(12):5222-

- 5228.
- [6] 陈强龙,谷洁,高华,等. 秸秆还田对土壤脱氢酶和多酚氧化酶活性动态变化的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(4): 146-151.
- [7] 杨志新,刘树庆. 重金属 Cd、Zn、Pb 复合污染对土壤酶活性的影响[J]. 环境科学学报, 2001, 21(1): 60-63.
- [8] Peters D P, Gosz J R, Pockman W T, et al. Integrating patch and boundary dynamics to understand and predict biotic transitions at multiple scales[J]. *Landscape Ecology*, 2006, 21: 19-33.
- [9] Bowersox M A, Brown D G. Measuring the abruptness of patchy ecotones[J]. *Landscape Ecology*, 2001, 156: 89-103.
- [10] 周洪华,陈亚宁,李卫红. 塔里木河下游绿洲-荒漠过渡带植物多样性特征及优势种群分布格局[J]. 中国沙漠, 2009, 29(4): 688-696.
- [11] 郭明,李新. 基于遥感和 GIS 绿洲发育适度规模分析—以酒泉绿洲为例[J]. 遥感技术与应用, 2006, 21(4): 312-316.
- [12] 罗格平,周成虎,陈曦,等. 区域尺度绿洲稳定性评价[J]. 自然资源学报, 2004, 19(4): 519-524.
- [13] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [14] 杨兰芳,曾巧,李海波,等. 紫外分光光度法测定土壤过氧化氢酶活性[J]. 土壤通报, 2011, 42(1): 207-210.
- [15] 漆良华,张旭东,彭镇华. 湘西北小流域植被恢复区土壤酶活性及养分相关性[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(3): 83-88.
- [16] 耿玉清,白翠霞,赵广亮,等. 土壤磷酸酶活性及其与有机磷组分的相关性[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(2): 139-143.
- [17] 王荫槐. 土壤肥科学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1992: 183-184.
- [18] 薛立,邝立刚,陈红跃,等. 不同林分土壤养分、微生物与酶活性的研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(2): 280-285.
- [19] 苗琳,王立,黄高宝,等. 保护性耕作对旱地麦田土壤酶活性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(1): 6-11.
- [20] 张刘东,李传荣,孙明高,等. 沿海破坏山体周边不同植被恢复模式的土壤酶活性[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 112-116.
- [21] Badiane N N Y, Chotte J L, Patea 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: 229-238.
- [22] 徐凌飞,韩清芳,吴中营,等. 清耕和生草梨园土壤酶活性的空间变化[J]. 中国农业科学, 2010, 43(23): 4977-4982.
- [23] 董莉丽,郑粉莉. 黄土丘陵沟壑区植被类型对土壤质量的影响[J]. 干旱区研究, 2011, 28(4): 616-621.
- [24] 李慧杰,徐福利,林云,等. 施用氮磷钾对黄土丘陵区山地红枣林土壤酶与土壤肥力的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(4): 53-59.
- [25] 曹伟鹏,吴发启,雷金银,等. 毛乌素沙地南缘不同耕作措施土壤酶和微生物区系的特征[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(1): 88-95.

(上接第 114 页)

- [10] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems: A review[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11: 403-427.
- [11] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoals: A review[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(4): 219-230.
- [12] 沈仁芳,赵其国. 红壤土柱中营养元素的淋失. II.  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的淋失[J]. 土壤, 1995, (4): 178-181.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2001.
- [14] 中国科学院土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 上海: 中国科学出版社, 1978: 108-119.
- [15] 刘玮晶,刘焯,高晓荔,等. 外源生物炭对土壤中铵态氮素滞留效应的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(5): 962-968.
- [16] Asai H, Samson B K, Stephan H M, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: soil physical properties, leaf SPAD and grain yield[J]. *Field Crop Research*, 2009, 111: 81-84.
- [17] 高海英,何绪生,耿增超,等. 生物炭及炭基氮肥对土壤持水性能影响的研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(24): 207-213.
- [18] 黄超,刘丽君,章明奎. 生物炭对红壤性质和燕麦草生长的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2011, 37(4): 439-445.
- [19] 蒋朝晖,曾清如,方至,等. 不同温度下施入尿素后土壤短期内 pH 的变化和氨气释放特性[J]. 土壤通报, 2004, 35(3): 299-302.
- [20] 何绪生,张树清,余雕,等. 生物炭对土壤肥料的作用及未来研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(15): 16-25.
- [21] Lehmann J, Da Silva J P, Steiner C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: Fertilizer, manure and charcoal amendments[J]. *Plant and Soil*, 2003, 249(2): 343-357.
- [22] Mizuta K, Matsumoto T, Hatate K, et al. Removal of nitrate nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal[J]. *Bioresource Technology*, 2004, 95(3): 255-257.
- [23] Smernik R J, Kookana R S, Skjemstad J O. NMR characterization of  $^{13}\text{C}$ -benzene sorbed to natural and prepared charcoals[J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, 40(6): 1764-1769.
- [24] Kwon S, Pignatello J J. Effect of natural organics substances on the surface and adsorptive properties of environmental black carbon (char): Pseudo pore block age by model lipid components and its implications for  $\text{N}_2$ -probed surface properties of natural sorbents[J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, 39(20): 7932-7939.
- [25] Ding Ying, Liu Yu-xue, Wu Wei-xiang, et al. Evaluation of biochar effects on nitrogen retention and leaching in multi-layered soil columns[J]. *Water Air Soil Pollut*, 2010, 213: 47-55.
- [26] 邢英,李心清,王兵,等. 生物炭对黄壤中氮淋溶影响: 室内土柱模拟[J]. 生态学杂志, 2011, 30(11): 2483-2488.
- [27] Kameyama K, Miyamoto T, Shiono T, et al. Influence of sugarcane bagasse-derived biochar application on nitrate leaching in calcareous dark red soil[J]. *Journal of Environment Quality*, 2012, 41(4): 1131-1137.
- [28] 周志红,李心清,邢英,等. 生物炭对土壤氮素淋失的抑制作用[J]. 地球与环境, 2011, 39(2): 278-284.