

DOI: 10.5846/stxb201708111441

林亚军, 吴楠, 张元明. 火烧对古尔班通古特沙漠土壤养分和土壤酶活性的影响. 生态学报, 2018, 38(17): - .

Lin Y J, Wu N, Zhang Y M. Effect of fire on soil nutrient content and enzyme activity in Gurbantunggut desert. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(17): - .

火烧对古尔班通古特沙漠土壤养分和土壤酶活性的影响

林亚军^{1,2}, 吴楠¹, 张元明^{1,*}

1 中国科学院新疆生态与地理研究所干旱区生物地理与生物资源重点实验室, 乌鲁木齐 830000

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:以古尔班通古特沙漠 2016 年 6 月意外火烧事件为背景, 对比分析火烧和未火烧样地区不同土壤深度化学性质、土壤酶活性的变化特征, 为全面评估火烧对温带荒漠生态系统的影响提供土壤学依据。结果表明, 火烧样地和对照样地土壤养分含量和酶活性总体上均表现为上层土壤(0—5 cm)大于下层土壤(5—10 cm), 仅土壤氧化酶(过氧化氢酶)活性表现为下层土壤大于上层土壤。同时, 火烧和土壤深度存在交互效应, 火烧对土壤特性的影响受土壤深度的限制。土壤化学性质受火烧的影响主要表现在 0—5 cm 土壤层, 尤其是速效养分在火烧之后有显著增加趋势。火烧对 5—10 cm 土壤层土壤化学性质无显著影响。火烧后, 硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)含量显著下降, 铵态氮($\text{NH}_4\text{-N}$)含量上升。土壤水解酶、氧化酶活性在火烧之后降低, 具体表现为, 蔗糖酶、脲酶、 β -葡萄糖苷酶活性在 0—5 cm 和 5—10 cm 土壤层均极显著下降, 而碱性磷酸酶活性仅在 0—5 cm 土壤层显著下降。过氧化氢酶活性则在 5—10 cm 土壤层活性显著下降。表明上层土壤水解酶活性对火烧干扰较为敏感, 氧化酶活性在火烧干扰下相对稳定。从各土层土壤酶活性的变化特征来看, 火烧对水解酶活性的影响随土壤深度增加而降低, 而氧化酶则呈现相反的趋势。总体而言, 火烧显著提高了古尔班通古特沙漠土壤速效养分的含量, 降低了土壤酶活性, 不同土壤酶对火烧响应的敏感程度不同。为深入评估火烧干扰对温带荒漠生态系统的影响提供一定理论依据。

关键词:火烧干扰; 土壤养分; 土壤酶; 古尔班通古特沙漠

Effect of fire on soil nutrient content and enzyme activity in Gurbantunggut desert

LIN Yajun^{1,2}, WU Nan¹, ZHANG Yuanming^{1,*}

1 Key Laboratory of Biogeography and Bioresource in Arid Land, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830000, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Fire disturbance influences both above-ground and below-ground nutrient cycles by burning some of the vegetation, litter, and duff, which leads to nutrient losses. It can also cause important changes in soil chemical properties and enzyme activity. In desert ecosystems, large-scale fires, previously considered as rare events, are now a major threat to these areas. The present study was undertaken in Gurbantunggut desert, where wildfire incident occurred in July 2016, to examine the short-term effects of fire on soil nutrient content and enzyme activity in different soil layers (0—5 cm and 5—10 cm). The original vertical distribution patterns of soil nutrients and enzyme activity were not changed by fire disturbance. Soil nutrient content and soil enzyme activity, except for that of catalase, were higher in the 0—5 cm soil layer than in the 5—10 cm soil layer. An interaction was present between fire and soil depth, and the effect of fire on soil properties was

基金项目:新疆维吾尔自治区青年科技创新人才培养项目(2014731022);国家自然科学基金-新疆联合基金(U 1503101)

收稿日期:2017-08-11; **网络出版日期:**2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangym@ms.xjb.ac.cn

limited by soil depth. Soil chemical properties were mainly affected by fire in the 0—5 cm soil layer. Soil hydrolase and oxidase activity decreased after the fire, and the activity of sucrase, urease and beta glucosidase decreased in the 0—5 and 5—10 cm layers. Alkaline phosphatase activity decreased only in the 0—5 cm soil layer, and catalase activity decreased only in the 5—10 cm layer. The activity of hydrolase in the upper soil layer was sensitive to fire disturbance, and that of oxidase was relatively stable under the interference of fire. Analysis of the characteristics of soil enzyme activity in the different soil layers indicated that effect of fire on hydrolytic enzyme activity decreased with increase in soil depth, while that of oxidase showed the opposite trend. Overall, fire disturbance increased the content of soil available nutrients and significantly decreased soil enzyme activity in Gurbantunggut desert.

Key Words: fire disturbance; soil enzyme; soil nutrient; Gurbantunggut desert

火是陆地生态系统的常见干扰类型,它不仅改变局部生境的植被结构与动态,而且改变景观格局与生态过程^[1]。在过去几十年里,由于气候变化和人类活动对生态系统干扰加剧,全球范围内火灾发生的频率及火烧面积都有显著增加^[2]。火烧通过影响植物群落结构、功能性状及土壤养分等间接改变生态系统服务功能。火烧的高温加热和氧化过程导致土壤理化性质发生直接变化,而火烧对地上植被及火烧后残留物的分解加速也将间接改变土壤性质^[3]。火烧之后,燃烧灰烬为土壤补充养分。同时,火烧加快了土壤生物和非生物物质腐蚀速度,甚至加快土壤沙化^[4]。

土壤中另一活跃有机成分-土壤酶,对外界因素引起的变化极为敏感。火烧之后,温度、pH 等的改变使土壤酶活性受到影响,进而影响物质转化循环速率^[5]。过氧化氢酶属土壤氧化酶,能促进过氧化氢对各种化合物的氧化,催化过氧化氢的分解防止其对生物体的毒害作用,其活性的改变将影响有机质的分解速率和腐殖质的形成^[6]。此外,与 C、N、P 循环相关的水解酶活性能够指示营养物质分解强度与简单物质再合成强度^[7]。如蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶、 β -葡萄糖苷酶等能够迅速对火烧干扰做出响应^[8-10],从而参与改变营养元素循环。因此,土壤酶活性可以用来评价环境变化下的营养动态。不同生态系统中,火烧对土壤酶表现出不同的生态效应^[11]。

以往研究多集中于林火的生态效应,指出植被恢复过程中土壤酶活性呈波动式变化,且影响土壤酶的原因多种多样,如水热条件、养分丰缺、植被组成以及地形地貌均与其紧密相关^[12]。火烧对荒漠土壤系统的研究多集中于长期恢复过程中土壤生物系统的响应,对火烧干扰的即时效应研究较少。古尔班通古特沙漠是中国最大的固定、半固定沙漠。2016 年 6 月,在该沙漠南缘偶发火烧事件。本文对比分析了火烧后土壤养分和土壤酶活性的变化特征,为深入认识火烧干扰对荒漠生态系统的影响提供土壤学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于准噶尔盆地中的古尔班通古特沙漠南缘。古尔班通古特沙漠属温带荒漠生态系统。沙丘形态多为线性沙垄,多呈南北走向,总体东北高,西南低。土壤为典型沙漠风沙土。据中国科学院阜康站自动气象站监测数据显示,该区域年平均气温 7.2℃,极端最高气温 41.5℃,极端最低气温 -37.0℃。多年平均降水量为 128.7 mm,蒸发量为 1764 mm 左右^[13]。自 2016 年 6 月发生火烧事件起至 2016 年 8 月采样日期,该地区降雨量累计达 83.7 mm,平均气温 26.70℃。古尔班通古特沙漠以小半乔木梭梭(*Haloxylon ammodendron*)和白梭梭(*Haloxylon persicum*)为沙漠建群种^[14]。研究区域还分布有尖喙牻牛儿苗(*Erodium oxycorymbium*)、蛇麻黄(*Ephedra distachya*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)、囊果薹草(*Carex physodes*)、对节刺(*Horaninowia ulicina*)和角果藜(*Ceratocarpus arenarius*)等。据遥感影像分析并结合实地测量,火烧面积约 54 km²,火苗高度约 20—30 cm,持续时间达 2 天 1 夜,对草本和枯落物层影响较大,灌木层如梭梭等小乔木树冠层影响较小。

1.2 试验设计与取样方法

研究区位于古尔班通古特沙漠南缘,于 2016 年 7 月(火烧后 1 个月),选择火烧干扰分界线两边的 3 个平行沙丘,在各沙丘上游(火烧区)和对照区(未火烧)分别设置样地,两个区域的地形地貌和植物群落组成无差异。样地均设置于丘间低地(排除沙丘不同坡位的干扰)。在火烧区和对照区分别设置 3 个 50 m×50 m 样地,样地间距约 100 m。每个样地分别设置 3 个 3 m×3 m 样方,样方间距约 5 m。进行土壤取样时,将表层植物残体清除,用直径为 5 cm 环刀对每个样方按 0—5 cm 和 5—10 cm 两层分别进行梅花状 5 点取样,充分混合,作为一份样品,共计 36 份样品。取部分新鲜土样测定铵态氮($\text{NH}_4\text{-N}$)和硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)含量。剩余土壤过 2 mm 孔径筛后自然风干,用于土壤酶活性和土壤化学性质测定。

风干土壤用于测定土壤中有有机质、全氮、全磷、全钾、速效磷、速效钾、pH。全氮、全磷、全钾采用元素分析仪测定,pH 值采用酸度计(土水比为 1:5)测定,有机质采用重铬酸钾容量—外加热法,其他土壤指标如速效磷、速效钾、土壤含水量等采用常规土壤农化学方法。

土壤酶活性均采用微量法在酶标仪下测定,以每克土壤每小时产生的产物在特定波长下的吸收峰计算酶活性。采用靛酚蓝比色法测定脲酶活性,其水解尿素产生的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 在 578 nm 波长下进行吸光值测定。采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定蔗糖酶活性,水解产物为棕红色氨基化合物,在 510 nm 波长下进行吸光值测定。碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定,在 660 nm 波长下测定生成物苯酚的吸光值。 β -葡萄糖苷酶活性采用双抗体夹心法测定,终产物在 450 nm 波长下进行比色。采用高锰酸钾滴定法测定过氧化氢酶的活性,在 240 nm 波长下测定生成物过氧化氢的吸光值。

1.3 统计分析

利用双因素方差分析(Two-way ANOVA)对不同土层和不同处理的土壤理化性质、土壤酶活性影响进行分析。运用 T 检验分析不同土层间火烧效应。所有的统计分析在 SPSS 19.0 (SPSS Inc., Illinois, USA.) 完成,利用 Origin 9.0 (OriginLab Corp., USA) 作图。

2 结果与分析

2.1 火烧对不同土层土壤化学性质的影响

结果表明,火烧之后,土壤全效养分含量表现出增高的趋势,但均未达到显著差异($P>0.05$)。土壤速效养分,尤其是土壤上层速效氮含量在火烧之后发生显著改变,表现为硝态氮含量增加 49.42%。0—5 cm 土壤层速效磷和速效钾在火烧之后含量分别增加 11.51%、2.66%,与非火烧地区未达到显著差异($P>0.05$)。5—10 cm 土壤层土壤养分在火烧之后与 0—5 cm 土壤层表现出相同的变化趋势,即土壤全效养分未出现显著性改变($P>0.05$),硝态氮含量增加 28.36%,速效磷和速效钾含量与非火烧地区未达到显著性差异($P>0.05$)。从火烧对不同土层土壤养分的改变程度可知,火烧对 0—5 cm 土壤层土壤养分的影响大于对 5—10 cm 土壤层的影响(表 1)。

火烧之后仅 0—5 cm 土层硝态氮表现出显著差异($P<0.05$),土壤有机质、全效养分(全氮、全磷、全钾)、其他速效养分(铵态氮、速效磷、速效钾)、土壤 pH 在火烧与非火烧地区无显著差异($P>0.05$)(表 1)。

不同土层之间,土壤养分含量存在极显著差异($P<0.01$)。火烧和土壤深度二者交互作用对硝态氮、pH 产生显著影响($P<0.05$),对其他指标无显著影响($P>0.05$)(表 2)。

2.2 火烧对不同土层土壤酶活性的影响

火烧之后,0—5 cm 土壤层的水解酶活性均降低,蔗糖酶活性降低 35.04%, β -葡萄糖苷酶活性降低 48.83%,碱性磷酸酶活性降低 13.42%,脲酶活性降低 46.52%,过氧化氢酶活性降低 4.03%。0—5 cm 土壤层过氧化氢酶活性在火烧前后未产生显著差异($P>0.05$),其余土壤酶活性均达到显著差异($P<0.01$)。5—10 cm 土壤层的水解酶在火烧之后也呈现降低趋势,蔗糖酶活性降低 31.75%, β -葡萄糖苷酶活性降低 45.53%,碱性磷酸酶活性降低 1.67%,脲酶活性降低 28.19%,过氧化氢酶活性降低 9.7%。火烧对 5—10 cm 土壤层蔗

糖酶、 β -葡萄糖苷酶、脲酶活性具有显著影响 ($P < 0.01$), 对碱性磷酸酶、过氧化氢酶活性影响不显著 ($P > 0.05$) (图 1)。

表 1 火烧对不同土层土壤养分的影响 (平均值 \pm 标准差)

Table 1 Changes in chemical properties in different soil depths under wildfire (mean \pm SD)

土壤化学性质 soil chemical properties	土层 Soil layers/cm	火烧 Burn	非火烧 Unburn	土壤化学性质 soil chemical properties	土层 Soil layers/cm	火烧 Burn	非火烧 Unburn
pH	0—5	8.55 \pm 0.12	8.35 \pm 0.08	硝态氮 NO ₃ -N/(mg/kg)	0—5	15.54 \pm 0.70 *	10.40 \pm 1.77
	5—10	8.40 \pm 0.04	8.52 \pm 0.07		5—10	5.16 \pm 0.35	4.02 \pm 0.44
有机质 SOM/(g/kg)	0—5	4.80 \pm 0.60	4.46 \pm 0.34	铵态氮 NH ₄ -N/(mg/kg)	0—5	6.98 \pm 0.23	7.14 \pm 0.36
	5—10	2.27 \pm 0.08	2.13 \pm 0.17		5—10	7.84 \pm 0.26	8.07 \pm 0.40
全磷 TP/(g/kg)	0—5	0.42 \pm 0.01	0.41 \pm 0.02	速效磷 AP/(mg/kg)	0—5	8.14 \pm 1.20	7.30 \pm 0.39
	5—10	0.39 \pm 0.01	0.36 \pm 0.01		5—10	4.59 \pm 0.30	4.57 \pm 0.28
全钾 TK/(g/kg)	0—5	16.07 \pm 0.12	16.26 \pm 0.21	速效钾 AK/(mg/kg)	0—5	177.71 \pm 10.57	173.10 \pm 9.16
	5—10	15.34 \pm 0.26	15.76 \pm 0.21		5—10	150.92 \pm 5.60	147.97 \pm 11.89
全氮 TN/(g/kg)	0—5	0.28 \pm 0.01	0.28 \pm 0.02				
	5—10	0.15 \pm 0.02	0.15 \pm 0.01				

* 表示差异显著 SOM; Soil Organic Matter; TP; Total P; TK; Total K; TN; Total N; AP; Available P; AK; Available K

表 2 火烧和土壤深度对土壤理化性质的双因素方差分析结果

Table 2 Two-way ANOVA on the effects of fire and soil layers on soil physicochemical properties

因子 Factors	pH	有机质 SOM	全氮 TN	全磷 TP	全钾 TK	速效磷 AP	速效钾 AK	硝态氮 NO ₃ -N	铵态氮 NH ₄ -N
火烧 Fire	0.49	0.39	0.01	1.52	2.04	0.36	0.02	11.20 **	0.53
土层 Soil layers	0.12	49.66 **	149.92 **	10.44 *	9.60 **	23.46 **	8.62 **	87.83 **	7.95 **
火烧 \times 土层 Fire \times Soil layers	4.80 *	0.13	0.01	0.29	0.48	0.5	0.02	4.39 *	0

* 表示差异显著, ** 表示差异极显著

从各土层土壤酶活性在火烧之后改变程度发现,两土层水解酶活性火烧前后差异显著,氧化酶活性变化相对较小,表明水解酶对火烧干扰较为敏感,氧化酶在火烧干扰下表现相对稳定。且火烧对水解酶活性的影响随土壤深度增加而降低,火烧对氧化酶的活性未表现出此现象。

火烧之后,土壤水解酶(蔗糖酶、脲酶、 β -葡萄糖苷酶、碱性磷酸酶)活性与对照相比差异极显著 ($P < 0.01$),氧化酶(过氧化氢酶)未发生显著改变 ($P > 0.05$) (表 3)。土壤深度对蔗糖酶、 β -葡萄糖苷酶、碱性磷酸酶影响显著 ($P < 0.05$),随着土壤深度加深酶活性下降。脲酶、过氧化氢酶活性受土壤深度影响不显著 ($P < 0.05$)。火烧和土壤深度的交互作用对过氧化氢酶、蔗糖酶活性无显著影响 ($P > 0.05$),对脲酶、碱性磷酸酶活性有显著影响 ($P < 0.05$),对 β -葡萄糖苷酶有极显著影响 ($P < 0.01$)。

表 3 火烧和土壤深度对土壤酶活性的双因素方差分析结果

Table 3 Two-way ANOVA on the effects of fire and soil layers on soil enzymes activity

因子 Factors	蔗糖酶 S-SC	碱性磷酸酶 S-ALP	脲酶 S-UE	β -葡萄糖苷酶 S- β G	过氧化氢酶 S-CAT
火烧 Fire	20.81 **	5.62 *	56.97 **	292.84 **	0.53
土层 Soil layers	8.47 **	618.27 **	2.90	25.57 **	0.80
火烧 \times 土层 Fire \times soil layers	1.45	5.06 *	6.80 *	32.09 **	0.01

* 表示差异显著, ** 表示差异极显著; S-SC; soil sucrase; S-ALP; soil alkaline phosphatase; S-UE; soil urease; S- β G; soil beta glucosidase; S-CAT; soil catalase

3 讨论

以往在森林生态系统的研究中,火烧造成冠层被烧毁,使土壤光照充足,地面的黑色木炭进一步增加了土

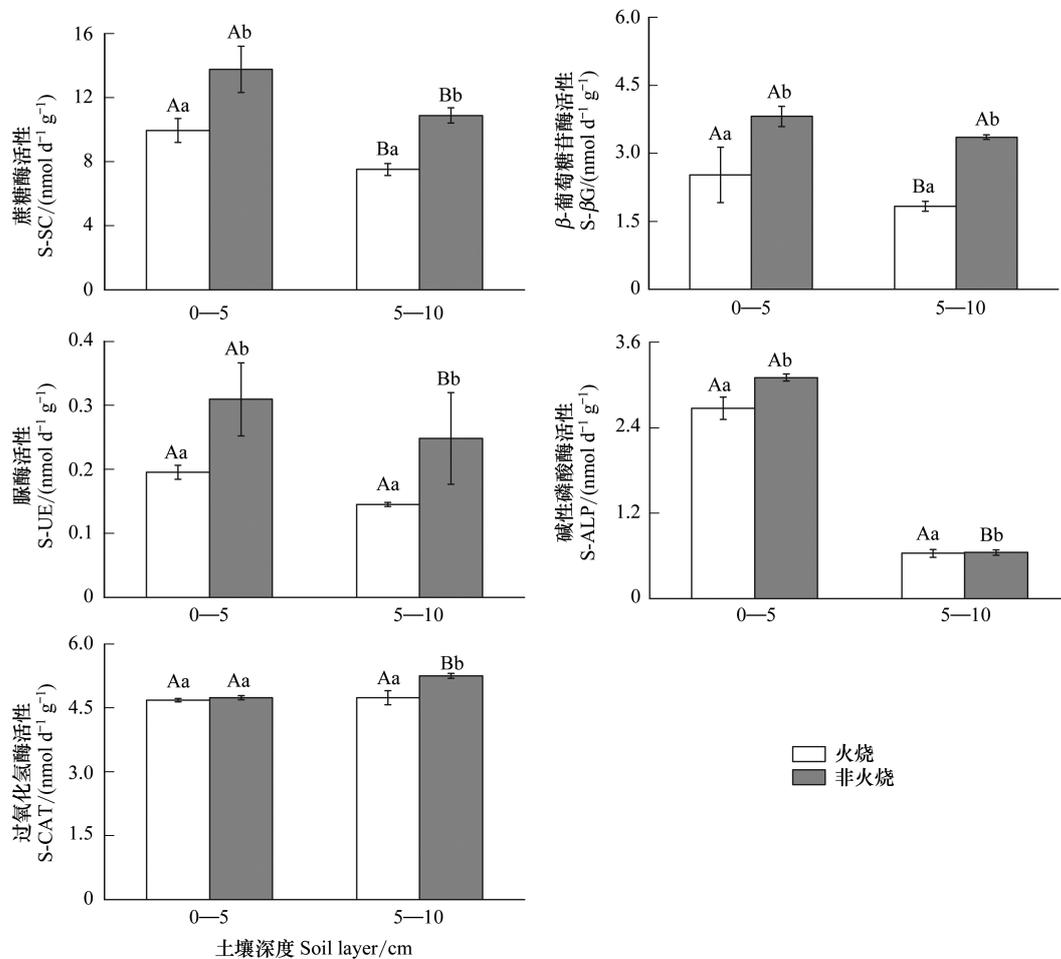


图1 火烧对不同土层土壤酶活性的影响(平均值±标准差)

Fig.1 The effect of fire on soil enzyme activities in different soil layers (mean±SD)

大写字母表示不同土层土壤酶活性在同一处理下的显著性差异,小写字母表示不同处理间土壤酶活性在同一土层的显著性差异,均在 0.05 显著性水平下,S-SC:soil sucrose;S-ALP:soil alkaline phosphatase;S-UE:soil urease;S-βG:soil beta glucosidase;S-CAT:soil catalase

壤对热辐射的吸收,提高了土壤温度,促进近地表凋落枝条分解,从而对土壤养分进行了补充^[15]。温带荒漠生态系统植被覆盖率较低,地表无腐殖质累积。同一种类的酶在不同植被以及不同质地土壤中,所起的作用不同,因此不同生态系统火烧干扰对土壤酶及土壤养分的影响不同^[16]。

3.1 不同土层土壤理化性质和酶活性差异

土壤深度对古尔班通古特沙漠不同土壤深度土壤理化性质、土壤酶活性有显著影响。Hedo 等人认为干旱半干旱区土壤水解酶活性主要受土壤 pH 及 C/N 值影响^[15],本研究样地中,土壤上下层 pH 未出现差异,推测该研究地区不同土层土壤水解酶活性差异主要受土壤 C/N 值影响。这与周晓兵等人研究结果一致^[14]。0—5 cm 土壤层聚集更多释放酶的植物、动物、微生物等及其残体,其数量增多、活性增强导致释放更多的酶^[16]。此外,该研究区广泛分布的土壤结皮对土壤养分的富集作用随土壤深度增加而降低^[17],使得 0—5 cm 积累较高有机质及其他营养物质,导致土壤理化性质、土壤酶活性呈现显著垂直分层差异。

3.2 火烧对土壤理化性质的影响

古尔班通古特沙漠属典型干旱半干旱荒漠生态系统,夏季火烧,造成局部高温。干燥环境下,植物、微生物活性降低,对营养元素的摄取量减少^[18]。速效养分是动植物可直接利用的营养元素形态,火烧后,速效养分含量有增加趋势。大量研究表明,火烧促进矿化作用,使铵态氮(NH₄-N)、硝态氮(NO₃-N)在短时期内迅速增加^[19]。然而,本研究发现铵态氮(NH₄-N)在火烧之后含量下降,可能与火烧后硝化细菌增加^[20]有关,未被

动植物摄取的 NH_4^+ 在硝化细菌作用下被氧化为 NO_3^- , 使得 NH_4^+ 含量显著下降, NO_3^- 含量显著增加。此外, NH_4^+ 也可因其他负电荷离子的吸附作用而降低^[21]。矿化作用促进速效磷含量增加, 本研究中, 速效钾、速效磷含量变化未达到显著, 可能由于古尔班通古特沙漠干燥条件对完全矿化作用的部分抑制作用^[22-23]。

对森林生态系统林火生态效应相关研究表明, 火烧使植物、枯落物以及土壤生物体以灰分的形式迅速归还于土壤, 使得土壤养分含量增加^[24], 本研究中除速效养分受火烧影响显著以外, 土壤有机质、全 N、全 P、全 K、pH 在火烧之后均未出现显著变化。一方面, 吉雪花等认为, 生物结皮具肥岛效应, 结皮下土壤具较高含量营养成分^[25]。火烧迹地广泛分布的生物结皮在火烧后失去活性, 致使生物土壤结皮营养维持功能丧失, 导致火烧层面土壤养分吸收相对下降, 而燃烧灰分归还于土壤导致的养分增加可能与生物结皮活性丧失所导致的养分下降相抵消, 使得火烧对古尔班通古特沙漠有机质、全 N、全 P、全 K、pH 未产生显著影响。另一方面, 区别于森林生态系统中凋落物累积形成的地表腐殖质层, 荒漠生态系统植被覆盖率较低, 高大树木丰富度极低, 草本凋落物由于风沙作用, 扩散范围较大, 在该研究区地表无腐殖质层, 通过火烧向土壤输入养分有限。

3.3 火烧对土壤酶活性的影响

土壤酶活性反映了土壤中各种生物化学过程的强度和方向^[26], 是土壤肥力的指标之一。本研究与王丽红等人研究结果一致, 土壤酶活性在火烧之后显著下降^[16]。这可能与火烧烧毁地表覆盖物导致达到地表的总辐射强度增强、地表温度升高有关, 过高温度导致部分酶活性降低甚至失活。火烧高温也可能导致土壤表层土壤微生物的数量和结构发生变化, 致使微生物活性较低, 导致微生物分泌的酶减少^[27]。土壤酶活性的降低, 可能导致土壤营养转化速率的变化和可利用态营养的生成, 使植物的营养吸收和生长发生改变, 甚至影响植物的构成。蔗糖酶、 β -葡萄糖苷酶、碱性磷酸酶、脲酶活性可促进有机态营养元素转化为植物可利用的无机态形式, 水解酶活性的降低可能导致对应底物的积累。相对于水解酶, 过氧化氢酶对火烧响应不敏感, 造成这一现象的可能原因: 首先是干旱区有机质含量较低, 导致氧化酶对火烧的不敏感^[28], 其次干旱区氧化酶本身较稳定, Stursova 等通过对比干旱区新鲜土壤与经高压蒸汽处理下土壤氧化酶活性, 发现高温灭菌对氧化酶活性未产生影响^[29], 本研究与该结论一致。此外, 火烧之后, 生物结皮活性的丧失是否与酶活性的改变有直接关系还有待进一步探究。此次实验是在火烧后不久开展, 火烧影响的时间效应还有待分析和检验。

4 结论

火烧并未改变古尔班通古特沙漠土壤理化性质及土壤酶活性的垂直变化特征, 火烧过后, 土壤养分及土壤酶活性仍表现为上层土壤含量大于下层土壤。火烧之后短期内, 土壤全效养分未产生显著差异, 有机质、全氮、全磷、全钾均无显著改变, 说明火烧干扰对温带荒漠生态系统土壤养分的影响可能存在滞后性。硝态氮、铵态氮的显著变化表明火烧促进了硝化作用。土壤酶活性在过火之后, 均显著降低, 且水解酶活性对火烧干扰更为敏感。酶活性的显著降低推测, 此次火烧对该生态系统营养元素循环具有长期效应。

致谢:感谢李永刚师兄在采样过程的帮助, 感谢周晓兵博士在论文写作过程给予的指导。

参考文献 (References):

- [1] Bond W J, Keeley J E. Fire as a global 'herbivore': the ecology and evolution of flammable ecosystems. *Trends in Ecology & Evolution*, 2005, 20 (7): 387-394.
- [2] Marlon J R, Kelly R, Daniau A L, Vanni re B, Power, Mitchell J, Bartlein P, Higuera P, Blarquez O, Brewer S, Br ucher T, Feurdean A, Gil Romera G, Iglesias V, Yoshi Maezumi S, Magi B, Mustaphi C J C, Zhihai T. Reconstructions of biomass burning from sediment-charcoal records to improve data-model comparisons. *Biogeosciences*, 2016, 13 (11): 3225-3244.
- [3] MacDougall A S, McCann K S, Gellner G, Turkington R. Diversity loss with persistent human disturbance increases vulnerability to ecosystem collapse. *Nature*, 2013, 494 (7435): 86-89.
- [4] Santin C, Doerr S H. Fire effects on soils: the human dimension. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, 2016, 371

- (1696): 20150171.
- [5] 万忠梅, 宋长春. 土壤酶活性对生态环境的响应研究进展. 土壤通报, 2009, 40(4): 951-956.
- [6] 薛立, 陈红跃, 杨振意, 吴杨熙, 刘斌, 许鹏波, 潘澜. 火灾对马尾松林地土壤特性的影响. 生态学报, 2011, 31(22): 6824-6831.
- [7] Smith P, Cotrufo M F, Rumpel C, Paustian K, Kuikman P J, Elliott J A, McDowell R, Griffiths R I, Asakawa S, Bustamante M, House J I, Sobocká J, Harper R, Pan G, West P C, Gerber J S, Clark J M, Adhya T, Scholes R J, Scholes M C. Biogeochemical cycles and biodiversity as key drivers of ecosystem services provided by soils. *Soil*, 2015, 1(2): 665-685.
- [8] 宝日玛, 崢嵘, 周梅, 郜图雅. 大兴安岭火烧迹地土壤微生物生物量及酶活性研究. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2016, 37(4): 77-83.
- [9] 王荣, 胡海清, 支博. 火烧处理对幼树叶片质膜透性和保护酶活性的影响. 西北林学院学报, 2016, 31(4): 176-181.
- [10] 周瑞莲, 张普金, 徐长林. 高寒山区火烧土壤对其养分含量和酶活性的影响及灰色关联分析. 土壤学报, 1997, 34(1): 89-96.
- [11] 许鹏波, 屈明, 薛立. 火对森林土壤的影响. 生态学杂志, 2013, 32(6): 1596-1606.
- [12] 王丽红, 辛颖, 赵雨森, 侯殿忠, 孙涛, 关彦军. 大兴安岭火烧迹地植被恢复中土壤微生物量及酶活性. 水土保持学报, 2015, 29(3): 184-189.
- [13] 朱海, 胡顺军, 陈永宝. 古尔班通古特沙漠南缘固定沙丘土壤水分时空变化特征. 土壤学报, 2016, 53(1): 117-126.
- [14] 周晓兵, 张元明, 陶冶, 张丙昌. 古尔班通古特沙漠土壤酶活性和微生物量氮对模拟氮沉降的响应. 生态学报, 2011, 31(12): 3340-3349.
- [15] 姜勇, 诸葛玉平, 梁超, 张旭东. 火烧对土壤性质的影响. 土壤通报, 2003, 34(1): 65-69.
- [16] Hedo J, Lucas-Borja M E, Wic C, Andrés Abellán M, De Las Heras J. Soil microbiological properties and enzymatic activities of long-term post-fire recovery in dry and semiarid Aleppo pine (*Pinus halepensis* M.) forest stands. *Solid Earth*, 2015, 6(1): 243-252.
- [17] 张元明, 杨维康, 王雪芹, 张道远. 生物结皮影响下的土壤有机质分异特征. 生态学报, 2005, 25(12): 3420-3425.
- [18] Manzoni S, Schimel J P, Porporato A. Responses of soil microbial communities to water stress: results from a meta-analysis. *Ecology*, 2012, 93(4): 930-938.
- [19] Ball P N, MacKenzie M D, DeLuca T H, Holben Montana W E. Wildfire and charcoal enhance nitrification and ammonium-oxidizing bacterial abundance in dry montane forest soils. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(4): 1243-1253.
- [20] Klopatek J M, Klopatek C C, Debano L F. Potential variation of nitrogen transformations in Pinyon-Juniper ecosystems resulting from burning. *Biology and Fertility of Soils*, 1990, 10(1): 35-44.
- [21] Roaldson L M, Johnson D W, Miller W W, Murphy J D, Walker R F, Stein C M, Glass D W, Blank R R. Prescribed fire and timber harvesting effects on soil carbon and nitrogen in a pine forest. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78(S1): S48-S57.
- [22] Belén Hinojosa M, Parra A, Laudicina V A, Moreno J M. Post-fire soil functionality and microbial community structure in a Mediterranean shrubland subjected to experimental drought. *Science of the Total Environment*, 2016, 573: 1178-1189.
- [23] Belén Hinojosa M, Parra A, Ramírez D A, Carreira J A, García-Ruiz R, Moreno J M. Effects of drought on soil phosphorus availability and fluxes in a burned Mediterranean shrubland. *Geoderma*, 2012, 191: 61-69.
- [24] Gagnon P R, Passmore H A, Slocum M, Myers J A, Harms K E, Platt W J, Paine C E T. Fuels and fires influence vegetation via above- and belowground pathways in a high-diversity plant community. *Journal of Ecology*, 2015, 103(4): 1009-1019.
- [25] 吉雪花, 张元明, 周小兵, 吴林, 张静. 不同尺度苔藓结皮土壤性状的空间分布特征. 生态学报, 2014, 34(14): 4006-4016.
- [26] 王楠, 王帅, 高强, 赵兰坡, 田特, 张晋京. 施氮水平对不同肥力土壤微生物学特性的影响. 水土保持学报, 2014, 28(4): 148-152, 167-167.
- [27] Guénon R, Gros R. Soil microbial functions after forest fires affected by the compost quality. *Land Degradation & Development*, 2016, 27(5): 1391-1402.
- [28] Tas N, Prestat E, McFarland J W, Wickland K P, Knight R, Berhe A A, Jorgenson T, Waldrop M P, Jansson J K. Impact of fire on active layer and permafrost microbial communities and metagenomes in an upland Alaskan boreal forest. *The ISME Journal*, 2014, 8(9): 1904-1919.
- [29] Stursova M, Sinsabaugh R L. Stabilization of oxidative enzymes in desert soil may limit organic matter accumulation. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(2): 550-553.