

高原湿地纳帕海 4 种湿地利用类型 土壤养分和微生物特征研究

陆梅¹, 田昆^{1,2}, 莫剑锋³

(1. 西南林业大学 环境科学与工程系, 昆明 650224; 2. 国家高原湿地研究中心, 昆明 650224;
3. 广西壮族自治区林业勘测设计院, 南宁 530011)

摘 要:采用实地调查与 In-situ 取样技术及室内实验分析,对滇西北高原湿地纳帕海现存 4 种湿地利用类型土壤养分和微生物数量特征进行研究。结果表明:(1)在人为活动干扰下,湿地类型从原生沼泽向沼泽草甸、草甸和垦后湿地演替,土壤有机质和全氮含量呈现明显的衰减下降,其中有机质下降 54.06 g/kg,全氮下降 1.96 g/kg。(2)经 F 检验结果表明:4 种湿地利用类型中土壤微生物总数存在显著差异,表现为沼泽草甸>草甸>垦后湿地>原生沼泽;土壤真菌和放线菌呈相同的变化趋势,为沼泽草甸>垦后湿地>草甸>原生沼泽;土壤养分和微生物数量变化均具有明显的空间层次现象,即随土层加深而降低,表聚性明显。(3)除原生沼泽之外的 3 种湿地利用类型中土壤微生物数量与有机质和全氮含量呈极显著正相关。(4)人为干扰加速纳帕海湿地的逆向演替进程,土壤养分与微生物特征的变化是对人为不同干扰类型与强度的响应。

关键词:高原湿地; 纳帕海; 利用类型; 土壤养分; 土壤微生物特征

中图分类号:S153.6; S154.3 文献标识码:A 文章编号:1005-3409(2011)02-0241-05

Study on the Soil Nutrients and Microbiological Characteristics of Four Utilization Types of Plateau Wetlands Napahai

LU Mei¹, TIAN Kun^{1,2}, MO Jian-feng³

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;
2. National Plateau Wetlands Research Center, Kunming 650224, China;
3. Guangxi Forestry Inventory and Planning Institute, Nanning 530011, China)

Abstract:Through field investigation and In-situ technique of locating experiment and experiment analysis, the soil nutrients and microbiological properties of four utilization types of Napahai plateau wetlands in north-western Yunan were studied. The results showed: (1) The wetland types with the disturbances of human beings, has gradually retrogressive succession from a primary swamp into the swampy meadow, meadow and reclaimed wetland, the soil organic matter and total nitrogen were obviously declining. The soil organic matter has descended by 54.96 g/kg and the total nitrogen has descended 1.96 g/kg. (2) With the decrease of soil nutrients, the total amount soil microbes are different. The quantities of soil microbes of four types are swamp meadow>meadow>reclaimed wetland>swamp. The number of soil fungi and actinomycetes in different wetland types are swamp meadow>reclaimed wetland>meadow>swamp. Meanwhile, both the soil nutrients and the number of microbes were decreasing with the increase of soil depth; (3) There is close correlation between soil microorganism and soil organic matter and total nitrogen in three utilizations wetland types except swamp; (4) The human disturbance accelerated the process of reverse succession, the change in soil nutrient and microbial characteristics is the response to a type and intensity of different disturbances.

Key words:plateau wetland; napahai; utilization type; soil nutrient; soil microbiological characteristic

云南西北高原湿地纳帕海位于长江、湄公河等国内和国际重要河流的中上游,对下游水位和水量均有着重要的调节作用,其形成与发育与平原湿地不同^[1],其面积较小,四周被高山包围,处于封闭状态,与其它湿地间没有水道相通,复杂的生境,虽孕育了丰富的生物多样性,也决定了生态系统的脆弱和不稳定性,因此具有特殊的科研价值。由于纳帕海距香格里拉县城仅 8 km,地处农牧交错区和旅游热点地带,湿地资源的开发利用与保护矛盾比较突出。近年来,在过度放牧、无序旅游、砍伐森林、疏干开垦沼泽等不断加剧的人为活动的影响和其自然形成条件的共同作用下,致使纳帕海原生沼泽、沼泽草甸面积不断减少,草甸和垦后湿地面积不断增加,湿地呈现出原生沼泽—沼泽草甸—草甸—垦后湿地的逆向演替格局,土壤养分衰减退化,成为了退化非常严重的沼泽湿地。目前对这一湿地的研究多集中于植物多样性、鸟类、社区共管和土壤养分方面^[1-3],鲜见对土壤微生物的研究。本文通过研究人为活动干扰下高原湿地土壤养分和微生物数量变化,以揭示人为活动对土壤肥力和微生物数量的影响及其相互关系,旨在为高原退化湿地的恢复、湿地资源的合理利用和保护与管理提供理论依据。

1 研究区概况

研究区纳帕海湿地位于云南省西北部香格里拉县境内,地理坐标 27°49′—27°55′N,99°37′—99°43′E,海拔 3 260 m,湖面面积 2 400 hm²,沼泽面积 3 760.4 hm²^[2],为石灰岩上发育而成的喀斯特型季节性高原沼泽湿地,由于地处属长江上游,对长江中下游水量均衡有重要作用,也是沼泽化较为严重和退化较为典型的湿地。该区温度低、湿度大、霜期长,长冬无

夏,春秋季短,冬季严寒,极端最低气温—27℃,极端最高气温 25.3℃,≥10℃活动积温 1 539.2℃,年降雨量 606.6 mm,蒸发量 1 670.6 mm,相对湿度 70%,年平均日照时数 2 186.6 h,日照率 49%,无霜期 123.8 d。试验地纳帕海自然保护区,四周中山环绕,从湖盆中心至湖岸边生长着大量的水生和陆生植被,湖滨分布有较大面积的沼泽草甸,周围面山上生长着硬叶常绿阔叶林、云冷杉针叶林和灌丛。主要植被有黄背栎(*Quercus pannosa*)、云杉(*Picea likiangensis*)、冷杉(*Abies georgei*)等乔木树种;杉叶藻(*Hippuris vulgaris*)、茭草(*Zizania caduciflora*)、水葱(*Scirpus palustris*)、狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)等水生植物。土壤类型有棕壤、草甸土、沼泽土和泥炭土。

2 研究方法

2.1 样地选择与样品采集

以几乎无人作为活动干扰常年积水的原生沼泽作为研究参照,同时选取沼泽草甸、草甸和垦后湿地 3 种现存湿地利用类型作为研究对象(详见表 1),在各类型中分别设 8~15 个定位点以原状土柱取样器采集土样^[4-5]。采回的土管原状土样在实验室内按 0—20 cm,20—40 cm 分层(除原生沼泽外,因原生沼泽常年淹水,无明显分层)、风干、剔除草根和石块,研磨,分别过 1.0 mm 和 0.25 mm 筛,进行相关项目分析。土壤微生物样品采集与养分同步,采样时,首先除去地面植被和枯枝落叶,铲除 1 cm 左右的表土,用土样擦拭采样工具和装土器皿,然后多次在取土管周围采取重量大体相当的土样于牛皮纸上,剔除石砾和植物残根等杂物后,混匀装袋,而 20—40 cm 层土样从取土管中取出,均放入小型冰箱中保存(大约 4℃),带回实验室尽快分离培养。

表 1 样地概况

利用方式	海拔/m	主要植被	利用现状	采样数
原生沼泽	3260	杉叶藻、狐尾藻、紫萍、黑藻等	常年淹水	9
沼泽草甸	3260	矮地榆、发草、苔草、斑唇马先蒿等	雨季淹没而旱季过湿浅水沼泽	11
草甸	3260	大狼毒、剪股颖、杂草等	人为排干放牧、旅游	15
垦后湿地	3270	青稞	排干后开垦为耕地	8

2.2 分析方法

参照中国分析标准方法^[6]、中国科学院南京土壤研究所《土壤理化分析》^[7]、《土壤微生物研究法》^[8]和许光辉等编著的《土壤微生物分析方法手册》^[9],分别测定土壤有机质、全氮、pH、细菌、真菌和放线菌。有机质采用重铬酸钾容量法;全氮采用高氯酸—硫酸消化凯氏定氮法;细菌、真菌和放线菌的培养分别采用

牛肉膏蛋白胨培养基、PDA 培养基加抗生素和天门冬酰胺—甘油培养基加入抗生素。细菌接种后于 30~32℃下培养 4~7 d 记数;真菌于 27~28℃下培养 8~9 d 记数;放线菌于 28~29℃下培养 10~15 d 记数。每克鲜土(干土)中菌数=(菌落平均数×稀释倍数)/鲜土(干土)重(g)。数据应用 Excel 2003、SPASS13.0 等分析软件进行统计分析和处理。

3 结果与分析

3.1 4 种湿地利用类型土壤有机质和全氮变化

土壤有机质是湿地土壤的重要组成成分,其数量与质量变化是土壤环境质量状况的最重要表征^[10-11],土壤全氮与有机质存在着显著的相关性^[12-13],因此两者可作为土壤退化的重要指标。 F 检验结果显示,4 种湿地利用类型 0—20 cm 土层有机质和全氮含量均存在显著差异($F_{\text{有机质}}=38.828>F_{0.01},P<0.01$; $F_{\text{全氮}}=30.532>F_{0.01},P<0.01$)。在人为活动的干扰下,湿地利用类型从原生沼泽向沼泽草甸、草甸过渡,土壤有机质和全氮从 89.57 g/kg 和 2.9 g/kg 降至 35.51 g/kg 和 0.94 g/kg(表 2)。这是由于疏干原生沼泽后形成的草甸土壤地下水位较低,当地居民对其利用强度较大,过度放牧造成植物残体量相对减少,同时排干沼泽加速土壤有机质的矿质化分解,致使草甸的有机质和全氮含量最低。随着地表农作物的收获,带走垦后湿地土壤中大量的营养物质,没有植物残体归还,但其土壤有机质和全氮的含量却较草甸高,分别为 46.49 g/kg 和 1.27 g/kg,原因之一是当地居民施用有机肥,增加了土壤有机质和全氮,二是其承接了随地表径流汇集的部分养分。尽管如此,垦后湿地土壤有机质和全氮含量与原生沼泽相比仍然较低,表明人为活动干扰引起湿地土壤泥炭化、潜育化过程减弱或终止,并随通气性改善,加速有机质分解,增加温室气体排放,加重环境问题,导致湿地的“汇”与“源”颠倒。

研究结果表明 4 种湿地利用类型土壤全氮和有机质空间垂直分异明显(表 2),表层(0—20 cm)土壤有机质和全氮含量均大于下层(20—40 cm),这与多数陆地土壤养分在剖面中的垂直分布相一致^[20]。其中沼泽草

甸表层土壤有机质和全氮含量分别为 55.59 g/kg 和 1.38 g/kg,下层为 14.36 g/kg 和 0.45 g/kg,为上层的 25.83%和 32.6%;草甸表层土壤有机质和全氮含量分别为 35.51 g/kg 和 0.94 g/kg,下层则分别为 9.09 g/kg 和 0.24 g/kg,是上层的 25.59%和 25.53%。这可能与沼泽化草甸和草甸表层土壤有较强的生物学活性和丰富的植物根系分布有着密切关系。垦后湿地表层土壤有机质和全氮的含量分别为 46.69 g/kg 和 1.26 g/kg,下层分别为 15.18 g/kg 和 0.51 g/kg,是上层的 32.51%和 40.47%,上下层之间的差异较沼泽化草甸和草甸的低,这与人为耕作活动,翻动上下层土壤有关,也反映出耕地土壤所受到的人为干扰活动更加剧烈的事实。

表 2 纳帕海 4 种湿地利用类型土壤主要养分特征

利用方式	土层/ cm	pH (1:2.5)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)
原生沼泽	0—40	8.02±0.14	89.57±5.58	2.9±0.31
沼泽草甸	0—20	6.29±0.09	55.59±3.36	1.38±0.14
	20—40	6.18±0.11	14.36±1.47	0.45±0.05
草甸	0—20	6.77±0.08	35.51±2.49	0.94±0.06
	20—40	6.56±0.15	9.09±0.56	0.24±0.04
垦后湿地	0—20	7.04±0.18	46.49±4.01	1.26±0.09
	20—40	7.07±0.09	15.18±1.92	0.51±0.07

3.2 4 种湿地利用类型土壤微生物

3.2.1 土壤微生物总数变化 土壤微生物数量反映了土壤中能量循环和养分的转移与运输,在区别土壤性状方面较养分因子敏感^[14]。 F 检验结果显示,4 种湿地利用类型湿地土壤微生物总数差异性显著($F_{\text{总}}=11.090>F_{0.01},P<0.01$),沼泽草甸土壤微生物数量最多(52.88×10^5 个/g 鲜土),原生沼泽最低(14.71×10^5 个/g 鲜土),二者相差 38.17×10^5 个/g 鲜土。

表 3 纳帕海 4 种湿地利用类型土壤微生物总数

利用方式	土层/cm	微生物总数(×10 ⁵)	细菌(×10 ⁵)	真菌(×10 ³)	放线菌(×10 ³)
原生沼泽	0—20	14.71±2.04	14.67±2.14	2.56±0.44	1.42±0.25
沼泽草甸	0—20	52.88±5.92	52.18±5.93	25.36±2.84	43.18±4.83
	20—40	17.79±0.06	17.78±0.02	0.54±0.05	0.97±0.06
草甸	0—20	49.88±6.43	49.47±6.43	14.93±1.08	26.87±3.22
	20—40	14.34±0.02	14.33±0.04	0.64±0.07	0.59±0.08
垦后湿地	0—20	23.58±1.67	23.00±1.67	15.5±3.57	42.25±5.85
	20—40	18.59±1.74	18.58±0.56	0.92±0.11	0.64±0.02

在不同类型湿地土壤中,真菌和放线菌所占比例非常低,仅分别为微生物总数的 0.043%~0.55%和 0.061%~1.39%,而细菌占土壤微生物总数的 98.10%~99.47%,可见细菌在纳帕海湿地生态系统中有着极为重要的作用,在分解各种有机物质方面占绝对优势,是土壤中最活跃的因素;真菌由于繁殖的

最适温度是 24~25℃,而纳帕海高原湿地的平均温度低,且一年中温度不是偏低就是偏高,因而影响了真菌的繁殖,数量较少。

在土壤的不同层次中,由于水分、养分、通气性、温度、pH 值等因子的差异及不同微生物的特异性,导致微生物在土壤中的垂直分布也不均匀^[18]。研究结

果表明:除原生沼泽无分层外,其余 3 种湿地类型表土层微生物数量最多,随着层次的加深,微生物数量减少(表 3),其数量分布的表聚性非常明显。下层土壤紧实,通气性差,不能提供给微生物良好的生存和繁殖空间,许多好气性的微生物不能生存和繁殖,因此其微生物的数量大大减少。这种土壤微生物随深度增加而减少的特征,表明纳帕海湿地生态系统中表层土壤是湿地物质转化和能量流动最为活跃的层位,土壤微生物在其物质能量交换中起着重要作用。

3.2.2 土壤微生物数量变化 生活在土壤中的微生物主要为细菌、放线菌和真菌,它们影响土壤的生物化学活性和土壤养分的组成与转化,是土壤肥力的重要指标之一^[15]。 F 检验结果显示,0—20 cm 层土壤细菌在不同湿地利用类型间数量差异显著($F_{\text{细菌}} = 10.883 > F_{0.01}, P < 0.01$),整体呈现出沼泽草甸 > 草甸 > 垦后湿地 > 原生沼泽的变化规律(表 3)。其中沼泽草甸细菌数量最多(52.18×10^5 个/g 鲜土),原生沼泽最少(14.67×10^5 个/g 鲜土),减少了大约 4 倍,其余依次为草甸(49.47×10^5 个/g 鲜土)和垦后湿地(23.00×10^5 个/g 鲜土)。出现这种变化趋势主要是由土壤养分和环境状况差异所决定。一方面,原生沼泽常年淹水,土壤通气性最差,土壤空气中氧气的浓度也最低,整个土体处于还原状态,它虽然能够为细菌的生长提供较草甸土壤多的有机碳源和氮源,但是却不能够提供充足的氧气,因此许多好气性的细菌不能生长,而沼泽草甸在一年中除了雨季会暂时处于淹水状态外,其它的大部分时间都是同草甸一样排干,土壤通气性好,且沼泽草甸土壤较高的养分含量为细菌准备了丰富的营养底物,好气细菌大量生长。另一方面,草甸和沼泽草甸的 pH 值为 6.2~6.7,是最适合细菌生长的 pH 条件,因此它们的细菌数量较原生沼泽高。薛立等^[16]研究了不同林分土壤养分、微生物与酶活性的关系,结果表明:大多数细菌对酸性敏感,在中性和微碱性条件下生长最好。垦后湿地细菌数量与养分变化规律不同,小于沼泽草甸和草甸,这可能与人为耕作活动的频繁干扰和施用某些化肥和农药对微生物产生了毒害作用有关。杨惠芳等^[17]研究了单甲脒农药对土壤微生物种群和土壤酶活性的影响,结果表明农药对土壤微生物种群和数量有直接影响。

F 检验结果显示:0—20 cm 层土壤真菌在不同湿地利用类型间数量差异显著($F_{\text{真菌}} = 18.032 > F_{0.01}, P < 0.01$),由原生沼泽到垦后湿地表现出不同于细菌的变化规律,整体呈现出沼泽草甸 > 垦后湿地 > 草甸 > 原生沼泽的变化规律(表 3)。沼泽草甸土壤真菌数量最多(25.36×10^3 个/g 鲜土),原生沼泽

最少(2.56×10^3 个/g 鲜土)。导致这种结果的原因有以下两个方面,一是因为氢离子浓度是一个支配土壤真菌数量和区系组成的重要因素。有研究表明,很多种真菌只能在酸性 pH 范围内生长发育^[18]。沼泽草甸和草甸类型的 pH 值分别为 6.3 和 6.7,小于 7 而大于 5,为适宜真菌生长繁衍的 pH 环境,而原生沼泽的 pH 值为 8.02,是不适合真菌生长的碱性环境,所以其真菌数量远远小于沼泽草甸;二是适宜的水分状况也是促使真菌良好地生长发育必不可少的条件,史铭偏^[19]等通过对不同肥力下黑土土壤真菌数量年变化的研究,结果表明真菌数量与其最适水分含量成正相关,在最适水分以下,菌丝体减少,孢子增多,在最适水分以上,随着水分的增多,氧气量减少,生长受到限制,数量减少。原生沼泽常年处于淹水状态,水分含量饱和,土壤的通气性在这些类型湿地中最差,氧气的含量也最少,因此真菌的生长受到限制,数量大大减少,充分反映出土壤真菌对土壤水分和氧气含量较敏感的特性。值得注意的是与不同类型湿地土壤细菌的变化规律相比较,垦后湿地类型土壤真菌的数量高于草甸类型,这是由于人为的耕作措施,翻动土壤,使土壤的通气性得到了极大改善,从而使土壤中氧气的含量增多,真菌数量增加,表现了真菌较细菌更依赖于土壤氧气多少的特性。总之,适宜的水分含量、pH 值条件和充足的氧气是限制高原湿地土壤真菌生长和繁殖的重要生态因子,同时较好地指示了原生沼泽在人为疏干影响下的退化过程与规律。

不同类型湿地土壤放线菌数量与真菌数量呈现出相同的变化趋势(表 3),数量最多的沼泽草甸(43.18×10^3 个/g 干土),垦后湿地为 42.25×10^3 个/g 干土,草甸为 26.87×10^3 个/g 干土,最少的是原生沼泽,仅为 1.42×10^3 个/g 干土。导致这种变化趋势的原因与制约真菌数量多少的因子有关。

3.3 土壤微生物数量与主要养分关系

土壤微生物在湿地生态系统的物质和能量代谢过程中,有着十分重要的作用,土壤微生物的数量分布是不同类型湿地土壤有机养分和无机养分含量多少的反映。在纳帕海湿地生态系统中,除原生沼泽之外的 3 种湿地类型中土壤微生物总数与有机质和全氮含量呈极显著正相关,相关系数分别高达 $r = 0.99^{**}$ 和 $r = 0.96^{**}$ 。原生沼泽由于处于厌氧还原条件下,有机养分进行的是积累过程,虽为微生物准备了丰富的营养底物,但这种生态条件却不利于好气性微生物的繁衍生长,因此微生物数量反而下降,呈极显著负相关,呈现出与农业土壤和森林土壤完全不同的相关关系,体现了湿地特征。

表 4 土壤微生物间以及与主要养分间的相关性

项目	有机质	全氮	真菌	细菌	放线菌	微生物总数
有机质	1	0.96**	0.995**	0.985**	0.945**	0.991**
全氮		1	0.685	0.988**	0.546	0.962**
真菌			1	0.114	0.984**	0.157
细菌				1	0.288	0.999**
放线菌					1	0.329
微生物总数						1

注: ** $p<0.01$, $r=0.77$ 。

4 结 论

(1)在人为活动干扰下,纳帕海湿地生态系统中,湿地类型从干扰较小的原生沼泽,逐渐向沼泽草甸、草甸和垦后湿地演变,土壤有机质和全氮呈现明显的衰减下降,其中有机质下降 54.06 g/kg,全氮下降 1.96 g/kg。

(2)经 F 检验结果表明:4 种湿地利用类型中土壤微生物总数存在显著差异,沼泽草甸是湿地演变进程中人为活动影响的重要转折点,原来积累养分和疏干后通气性的改善适合微生物的生存和繁殖,微生物数量最多。随着人为干扰的加剧,沼泽草甸进一步演变为草甸,土壤养分衰减,微生物数量也相应减少。人为活动干扰最大的垦后湿地,土壤养分含量较草甸土壤高,微生物数量却少于草甸,反映了土壤微生物对人为活动干扰的敏感性。原生沼泽处于长年淹水和不利于好气微生物生存的厌氧条件,有机质和全氮含量最大,微生物数量却最少,两者呈极显著负相关,体现了土壤微生物对湿地特殊生态环境的响应。

(3)除原生沼泽之外的 3 种湿地类型中土壤微生物数量与有机质和全氮含量呈极显著正相关,相关系数分别为 $r=0.99^{**}$ 和 $r=0.96^{**}$ 。

(4)人为干扰加速了纳帕海湿地退化演替进程,湿地土壤养分与微生物特征的变化是对人为不同干扰类型与强度的响应。

参考文献:

[1] 肖德荣,田昆,张利权. 滇西北高原纳帕海湿地植物多样性与土壤肥力的关系[J]. 生态学报,2008,28(7):3116-3123.

[2] 王凯,杨晓君,赵健林,等. 云南纳帕海越冬黑颈鹤日间行为模式与年龄集群和时间的关系[J]. 动物学研究,2008,30(1):195-208.

[3] 田昆,陆梅,常凤来,等. 纳帕海岩溶湿地生态环境变化及驱动机制研究[J]. 湖泊科学,2004,16(1):35-42.

[4] 田昆,陈宝昆,贝荣塔,等. In-situ 方法在研究退化土壤氮库时空变化中的应用[J]. 生态学报,2003,23(9):1937-

1943.

[5] Raison R J, Connell M J, Khanna P K. Methodogy for studying fluxes of soil mineral-N in situ[J]. Soil Bio. Biochem.,1987,19(5):521-530.

[6] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京:中国标准出版社,1996.

[7] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析手册[M]. 上海:上海科学技术出版社,1978:62-140.

[8] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤微生物研究法[M]. 北京:科学出版社,1985:40-50.

[9] 许光辉,郑洪元. 土壤微生物分析方法手册[M]. 北京:中国农业出版社,1986:1-70.

[10] 白军红,邓伟,朱颜明,等. 湿地土壤有机质和全氮含量分布特征对比研究:以向海与科尔沁自然保护区为例[J]. 地理科学,2002,22(2):232-237.

[11] 李映强,曾尧廷. 不同耕作制下水稻土有机质变化及其团聚作用[J]. 土壤学报,1991,28(4):404-409.

[12] 王维敏,张镜清. 黄淮海地区农田土壤有机质的研究[J]. 中国农业科学,1988,21(1):19-26.

[13] 杨东方,李学垣. 双季稻复种轮作对土壤有机质性状影响的研究[J]. 中国农业科学,1990,23(2):51-56.

[14] Droan J W, Parkin P B. Defining soil quality for a sustainable environment[J]. Soil Society of America Publication,1994,35:32-34.

[15] 薛立,陈红跃,邱立刚. 湿地松混交林地土壤养分、微生物和酶活性的研究[J]. 应用生态学报,2003,14(1):157-159.

[16] 薛立,邱立刚,陈红跃,等. 不同林分土壤养分、微生物与酶活性研究[J]. 土壤学报,2003,40(2):280-285.

[17] 杨惠芳,王保军. 单甲脒农药对土壤微生物种群和土壤酶活性的影响[J]. 应用与环境生物学报,1996,2(1):58-56.

[18] 陈文新. 土壤和环境微生物学[M]. 北京:农业大学出版社,1989:10-43.

[19] 史铭儡,刘淑霞,李玉,等. 不同肥力下黑土土壤真菌数量年变化的研究[J]. 菌物研究,2004,2(4):16-21.

[20] 任建宏,燕辉,朱铭强,等. 秦岭北坡 4 种植被类型的土壤养分状况和微生物特征比较研究[J]. 水土保持研究,2010,17(4)228-232.