

祁连山青海云杉林土壤理化性质和酶活性海拔分布特征

马剑^{1,2}, 刘贤德^{1,2}, 金铭², 赵维俊², 成彩霞², 孟好军², 武秀荣²

(1. 甘肃农业大学林学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省祁连山水源涵养林研究院,

甘肃省森林生态与冻土水文水资源重点实验室, 甘肃 张掖 734000)

摘要: 选取祁连山排露沟流域海拔 2 900~3 300 m 的青海云杉林为研究对象, 通过野外采样和室内分析, 研究了不同海拔梯度青海云杉林土壤理化性质和酶活性的分布特征, 并探讨二者之间的关系。结果表明: (1) 随着海拔的升高, 土壤含水量、有机质、全氮、速效钾含量逐渐增大; 而土壤容重、pH、全钾含量逐渐减小; 土壤全磷含量先减小后增大, 速效磷含量没有明显的变化规律。(2) 随着海拔的升高, 土壤蔗糖酶活性和碱性磷酸酶活性总体上呈增强趋势; 脲酶活性总体上呈先减弱后增强趋势, 蛋白酶活性变化幅度较小且差异不显著 ($P>0.05$)。(3) 土壤酶活性和土壤有机质、氮、磷、钾等密切相关, 其中蔗糖酶、脲酶、蛋白酶与土壤全氮、全钾、速效钾具有显著相关性 ($P<0.05$)。(4) 4 种土壤酶活性间呈显著或极显著相关, 酶促反应具专一性和共同性特点。

关键词: 祁连山; 青海云杉林; 海拔梯度; 土壤酶; 土壤理化性质

中图分类号: S714.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)02-0207-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.02.033

Soil Physicochemical Properties and Enzyme Activities Along the Altitudinal Gradients in *Picea Crassifolia* of Qilian Mountains

MA Jian^{1,2}, LIU Xiande^{1,2}, JIN Ming², ZHAO Weijun²,

CHEN Caixia², MENG Haojun², WU Xiurong²

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070; 2. Academy of Water Resources Conservation Forests in Qilian Mountains of Gansu Province, Key Laboratory of Hydrology and Water Resources of Forest Ecology and Frozen Soil of Gansu Province, Zhangye, Gansu 734000)

Abstract: This study selected *Picea crassifolia* forest which lived at altitudes of 2 900~3 000 m in pailugou catchment of Qilian Mountains as objects. By field investigation and laboratory analysis, the distribution characteristics of soil physicochemical properties and enzyme activities along the altitudinal gradients were studied. The relationships between soil physicochemical properties and soil enzyme activities were also analyzed. The results showed that: (1) With the increased altitudes, soil water contents, as well organic matter, total nitrogen and available potassium contents increased gradually; but soil bulk densities, pH values and total potassium contents decreased gradually; total phosphorus contents decreased at first and then increased, available phosphorus contents had not significant variation. (2) With the increased altitudes, the activities of invertase and alkaline phosphatase showed an increasing trend generally, the activities of urease decreased at first and then increased generally, and the activities of protease changed a little and had no significant difference ($P>0.05$). (3) Soil enzyme activities were closely related to soil organic matter, nitrogen, phosphorus and potassium contents, among which sucrase, urease and protease activities were significantly correlated with soil total nitrogen, total potassium and available potassium contents ($P<0.05$). (4) There existed significantly correlations among four enzyme activities, indicating that enzymatic reaction had specificity and commonality.

Keywords: Qilian mountains; *Picea crassifolia*; altitudinal gradients; soil enzyme; soil physicochemical properties

收稿日期: 2018-10-29

资助项目: 甘肃省林业科技计划项目“祁连山典型森林土壤特性及质量评价研究”(2018kj014); 科技基础性工作专项“西北祁连山地区森林土壤典型调查”(2014FY120700); 甘肃省自然科学基金项目“祁连山排露沟流域不同植被类型地表径流规律研究”(17JR5RG351); 甘肃祁连山森林生态监测与评估国际科技合作基地建设项目

第一作者: 马剑(1986—), 男, 工程师, 博士研究生, 主要从事森林土壤生态研究。E-mail: 405153416@qq.com

通信作者: 刘贤德(1963—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事森林生态研究。E-mail: shyliuxiande@163.com

在森林生态系统中,海拔是影响植被类型、土壤温湿度、养分及微生物活性的重要因素之一^[1]。海拔梯度的变化会导致温度、光照、水分等多种环境因子的变化,从而引起山地区域小气候、土壤理化特征等环境系统的梯度效应,进而深刻影响土壤微生物、群落结构以及土壤酶活性^[2]。土壤酶作为土壤一切生物化学过程的积极参与者,是物质循环和能量流动等生态系统过程中最为活跃的生物活性物质^[3],常与土壤微生物的代谢速率、养分的生物化学循环紧密联系在一起^[4],因而在森林生态系统中营养物质循环和能量代谢等过程中扮演着重要角色,被认为是土壤生态系统的核心,同时也被称为土壤生物和非生物环境变化的“感应器”。其活性在反映土壤质量变化的同时,也受土壤理化性质、植被多样性和水热条件等多重因素的调控^[5-6]。因此,研究土壤酶活性变化的海拔效应,不仅对探索环境因子对森林土壤生态过程的影响具有重要意义,而且对全球变化具有积极的指示作用。

近年来,针对土壤酶活性已开展了许多研究,但由于研究区域气候、植被类型、土壤类型等不同,研究结果不尽相同。曹瑞等^[3]研究发现,随着海拔的增加,土壤蔗糖酶、脲酶及酸性磷酸酶活性先增加后减少再增加;陈双林等^[7]研究表明,不同海拔毛竹林土壤酶活性随海拔升高呈上升趋势;斯贵才等^[8]研究表明,土壤酶活性随海拔增加明显减小;袁启凤等^[9]研究发现,海拔高度与土壤酶活性、土壤养分含量之间均呈极显著相关,土壤酶活性之间、土壤养分含量之间也有一定的相关性;金裕华等^[10]研究发现,土壤酶活性没有明显的季节差异,土壤酶活性随海拔上升总体呈上升趋势;陈志芳等^[11]研究发现,土壤酶活性随着海拔的上升呈下降趋势。

祁连山地处青藏高原、内蒙古高原和黄土高原过渡区中,区内自然条件复杂、水热条件差异大,形成了多种具有明显垂直梯度的植被类型和土壤类型,是研究过渡带森林生态系统结构与功能的理想场所,吸引了众多学者的关注。近年来,关于祁连山青海云杉林土壤的研究^[12-16]主要集中在土壤理化特性、土壤氮矿化和土壤养分特征等方面,而对青海云杉林土壤酶活性的研究鲜见报道。鉴于此,本研究选择分布在祁连山中段排露沟流域海拔 2 900~3 300 m 青海云杉林为研究对象,研究不同海拔梯度土壤理化性质和酶活性的分布特征及其差异性,揭示土壤酶活性与土壤理化性质的关系,为祁连山林区维持和提高物种多样性、林区地下土壤生态系统养分和酶活性循环与维持机制提供理论基础和科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

祁连山地处青藏、蒙新、黄土三大高原的交汇地

带,由多条西北—东南走向的平行山岭和宽谷组成,是我国著名的高大山系之一。祁连山区是河西内陆河流域石羊河、黑河和疏勒河的发源地及径流形成区,是河西绿洲非常重要的水源地,对中下游生态系统及水资源利用具有极其重要影响^[17]。是我国西北地区主要的国土安全、战略通道和生态安全屏障。其地理位置和生态区位极为重要,在国家生态建设中具有非常重要的战略地位。

排露沟流域(38°32′—38°33′N,100°17′—100°18′E)位于祁连山中段西水林区,流域总面积 2.85 km²,长 4.25 km,纵坡比降 1:4.2,海拔 2 600~3 800 m。年平均气温-0.6~2.0℃,年均日照时间 1 893 h,日辐射总量均值为 110.28 kW/m²,年均降水量 433.6 mm,年均蒸发量 1 081.7 mm,年平均相对湿度为 60%,属高寒半干旱山地森林草原气候^[18-20]。流域内自然条件复杂,水热条件差异较大,形成了具有明显垂直梯度的植被类型和土壤类型,海拔由低到高,植被类型依次为山地草原植被、山地森林草原植被、亚高山灌丛草甸植被、高山冰雪植被(图 1);与之对应的土壤类型依次为山地栗钙土、山地灰褐土、亚高山灌丛草甸土、高山寒漠土。其中山地灰褐土和亚高山灌丛草甸土是生长森林的土壤,山地灰褐土分布在海拔 2 600~3 300 m 地带,是乔木林的主要分布带;亚高山灌丛草甸土分布在海拔 3 300~3 800 m 亚高山地带,是湿性灌木林的主要分布带(图 2)。青海云杉作为祁连山的建群树种,呈斑块状或条状分布在海拔 2 600~3 300 m 阴坡和半阴坡地带,与阳坡草地交错分布;灌木优势种有金露梅(*Potentilla fruticosa*)、鬼箭锦鸡儿(*Caragana jubata*)和吉拉柳(*Salix gilashanica*)等,草本主要有珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)、黑穗苔(*Carex atrata*)和针茅(*Stipa* sp)等。

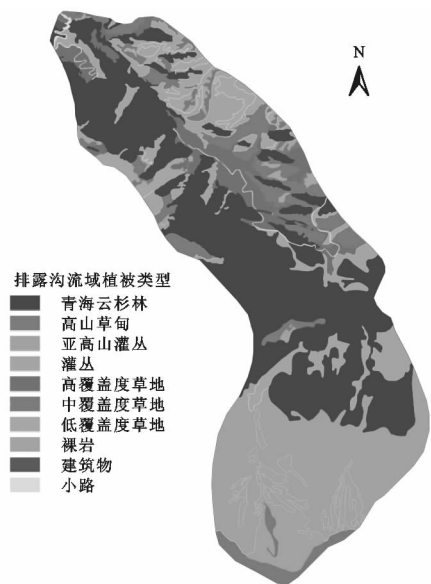


图 1 祁连山排露沟流域植被类型分布

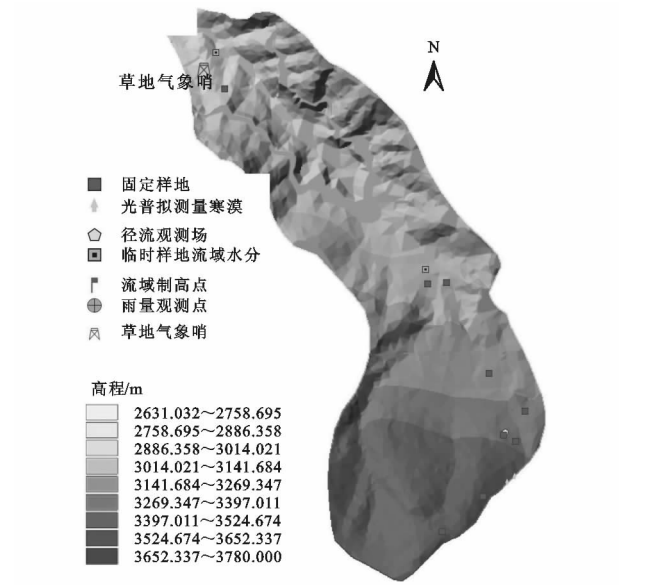


图 2 祁连山排露沟流域数字高程

1.2 研究方法

1.2.1 样地布设 基于典型性和代表性考虑,选择排露沟流域典型青海云杉林群落作为研究对象,以海拔 2 900 m为基点,采用梯度格局法,自下而上沿海拔 2 900,3 000,3 100,3 200,3 300 m 与等高线平行各设置 1 条平行样带,共 5 条平行样带,样带宽 20 m,同时垂直 3 300 m 高山林线沿坡面垂直向下设置 3 条样带,样带宽同为 20 m,在纵横设置的样带交汇处设置 15 个样地,样地面积大小为 20 m×20 m。利用手持 GPS 和数字坡度仪测定每一个样地的海拔、经纬度、坡度和坡向等基本信息;同时,在每个样方的 4 个角和对角线交点设置 5 个 2 m×2 m 灌木样方,记录灌木种类、数量、盖度、高度等。在每个灌木样方内设置 1 m×1 m 的草本样方,调查草本种类、数量、高度、盖度等(表 1)。

表 1 不同海拔样地概况

样地号	土壤类型	海拔/ m	地理位置	坡度/ (°)	坡向/ (°)	灌层 覆盖度/%	活地被层(草、苔藓、 地衣)覆盖度/%
A1,B1,C1	森林灰褐土	3292	100°18'15"E,38°32'08"N	34	20,15,23	60,70,85	70,80,98
A2,B2,C2	森林灰褐土	3200	100°18'15"E,38°32'13"N	33	10,11,15	40,2,15	60,75,60
A3,B3,C3	森林灰褐土	3100	100°17'49"E,38°32'41"N	18	20,20,20	15,7,18	50,85,95
A4,B4,C4	森林灰褐土	3000	100°17'49"E,38°32'41"N	18	20,23,23	15,1,18	20,95,95
A5,B5,C5	森林灰褐土	2900	100°18'06"E,38°32'42"N	25	330,330,330	10,10,10	30,30,30

1.2.2 样品采集与处理 依据试验地祁连山青海云杉根系分布较浅,根系分布深度平均在 60 cm^[20]的特点,将采样深度设置为 60 cm。2015 年 10 月在每块样地内,以“之”字形路线,选取 4 个点采集土壤样品,在每个采样点用 200 cm³ 环刀取 60 cm 土层的样品,每个采样点 3 个重复,用密封袋带回,测定土壤容重和土壤含水量。同时,在各采样点取 60 cm 土层混合样品,放置于塑料布上,剔除植被残根、石砾等杂物,混合均匀,四分法取约 1 kg 土样,3 次重复。部分土样风干后过 1.0,149 mm 的土壤筛,用于土壤化学性质测定,鲜土于 4 ℃储藏保存,用于土壤酶活性测定。

1.2.3 土壤理化性质测定 土壤含水量采用烘干法测定;容重采用环刀法测定;有机质含量采用重铬酸钾氧化外加热法测定;全氮含量采用半微量凯氏定氮法测定;全磷含量采用 NaOH 熔融钼锑抗比色法测定;全钾含量采用 NaOH 熔融火焰光度法测定;速效磷含量采用 NaHCO₃ 浸提钼锑抗比色法测定;速效钾含量采用乙酸铵浸提火焰光度法^[21-22]测定。

1.2.4 土壤酶特征值测定 蔗糖酶采用 3,5—二硝基水杨酸比色法测定;脲酶采用靛酚蓝比色法测定;蛋白酶采用茚三酮比色法测定;碱性磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法^[23]测定。

1.3 数据处理

采用 Excel 2010 对数据进行录入、整理和初步

分析;采用 SPSS 20.0 软件进行分析,选择单因素方差分析(one-way ANOVA)对不同海拔梯度青海云杉林土壤理化性质、土壤酶活性进行差异显著性检验(Duncan 检验, $P<0.05$),并采用 Pearson 相关系数分析土壤理化性质和土壤酶活性以及土壤酶活性之间的相关性,使用 Origin 9.0 软件绘制图表。

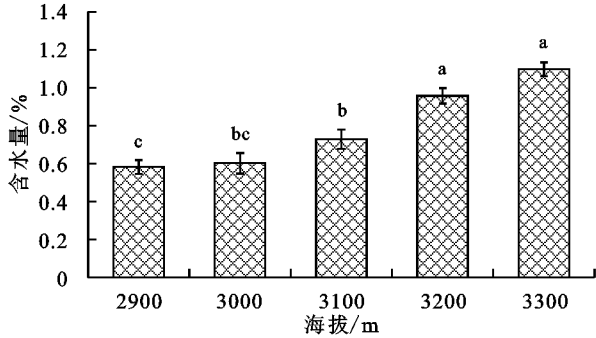
2 结果与分析

2.1 不同海拔梯度青海云杉林土壤理化性质变化

2.1.1 不同海拔梯度土壤含水量、容重的变化 由图 3 可知,随着海拔升高,土壤含水量显著增高,且各海拔段含水量均在 50%以上,高海拔地区(3 200,3 300 m)土壤含水量显著高于其他海拔段,达到过饱和状态。有研究^[24]表明,土壤水分的变异是由多重尺度上的土地利用(植被)、气象(降雨)、地形、土壤、人为活动等多因子综合作用的结果。在本研究区域,土壤含水量的变化主要受大气降水的影响,随着海拔升高,降水量不断增加,青海云杉林土壤水分也逐渐增加。

从图 3 可以看出,随着海拔升高,土壤容重呈减小趋势,海拔 2 900 m 处土壤容重显著高于其他高海拔区域($P<0.05$),这主要是因为该海拔段植被盖度较低,人为活动频繁,地表裸露度较高,所以容重较高。海拔 3 100,3 200,3 300 m 处土壤容重相对较

小,且海拔段之间差异不显著($P>0.05$),这是因为高海拔段活地被层盖度较高,土壤腐殖质含量也



注:图中不同小写字母表示不同海拔梯度上差异显著($P<0.05$)。下同。

图 3 不同海拔梯度土壤含水量和容重变化特征

2.1.2 不同海拔梯度土壤 pH、有机质的变化 从图 4 可以看出,青海云杉林土壤 pH 呈弱碱性,且随海拔升高,土壤 pH 总体上呈减小趋势,相邻海拔间土壤 pH 差异性均不显著($P>0.05$)。这主要是因为随海拔升高,大气降水量不断增加,土壤及母质得到淋溶作用加强,土壤复合体吸附 H^+ 数量增加, OH^- 数量减小,使得土壤碱性降低^[12]。该研究结果与李晓佳^[25]在大青山的研究结果一致,但与许文强等^[26]在天山北坡的研究结果存在差异,这可能与研

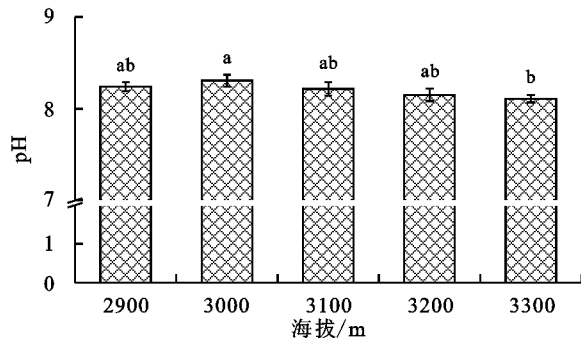
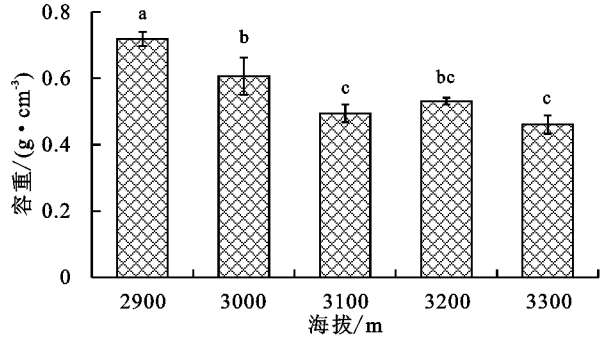


图 4 不同海拔梯度土壤 pH 和有机质含量变化特征

2.1.3 不同海拔梯度土壤氮、磷、钾含量的变化 从图 5 可以看出,随海拔升高,土壤全氮含量整体上呈增加趋势。这是因为随着海拔升高,气温逐渐降低,动、植物残体的分解速度减慢,土壤有机碳、氮矿化速率降低,土壤中全氮积累量增加^[28]。海拔 3 300 m 是青海云杉林线上限,该海拔段草地、灌丛、苔藓混生,地上生物量较大,土壤含水量较高,光照充足,凋落物吸水后很快被霉变、氧化、分解,形成未分解或者半分解层,在微生物、细菌及降雨的共同作用下,转化为分解层—腐殖质层,因此该海拔段全氮含量最高。

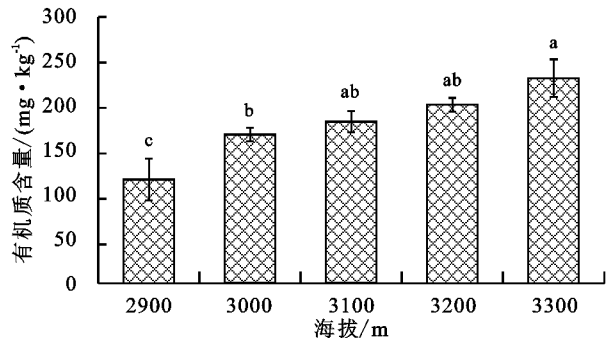
由图 6 可知,随海拔升高,土壤全磷含量呈先减小后增大的趋势,海拔 3 000 m 处全磷含量最小,为 0.57 g/kg;海拔 3 300 m 处全磷含量最大,为 0.70 g/kg。土壤速效磷含量随海拔升高没有明显的规律,各海拔段间差异不显著($P>0.05$),其含量变化范围为 11.08~17.62 mg/kg。这可能是由于磷素在土壤中迁移速度较

高,土质疏松,加之高海拔段人为活动较少,所以容重相对较低。



究区土壤母质与环境差异有关。

从图 4 还可以看出,随海拔升高,土壤有机质含量不断增加,海拔 3 000~3 200 m 土壤有机质含量差异不显著($P>0.05$)。海拔 3 300 m 处有机质含量显著高于海拔 2 900,3 000 m 处有机质含量,这与青海云杉林地处亚高寒山地有直接的关系,随海拔升高,虽然降水不断增加^[27],但是林地土壤温度逐渐下降,土壤有机质分解受到抑制,输入量大于损失量,土壤有机质得到不断积累。



慢,降水对磷素在土壤剖面及表面的迁移影响较弱,且研究区气温较低,也严重影响磷素的迁移转化能力。

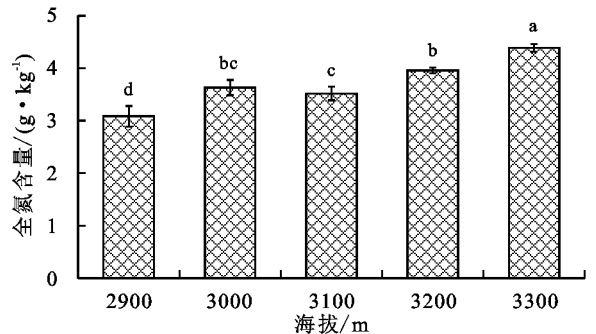


图 5 不同海拔梯度全氮含量特征

从图 6 还可以看出,随海拔升高,土壤全钾含量不断减小。海拔 2 900 m 全钾含量显著高于其他海拔段($P<0.05$),而海拔 3 000 m 与 3 100,3 200,3 300 m 全钾含量差异不显著($P>0.05$),这与随着海拔梯度的增加降水量不断增加所导致的雨水淋溶

增强有关。此外,可能与土壤有机质积累量的增加,导致土壤全钾含量减少,土壤有机质对矿物钾的“稀释效应”^[29]有关。海拔 3 300 m 处土壤速效钾含量

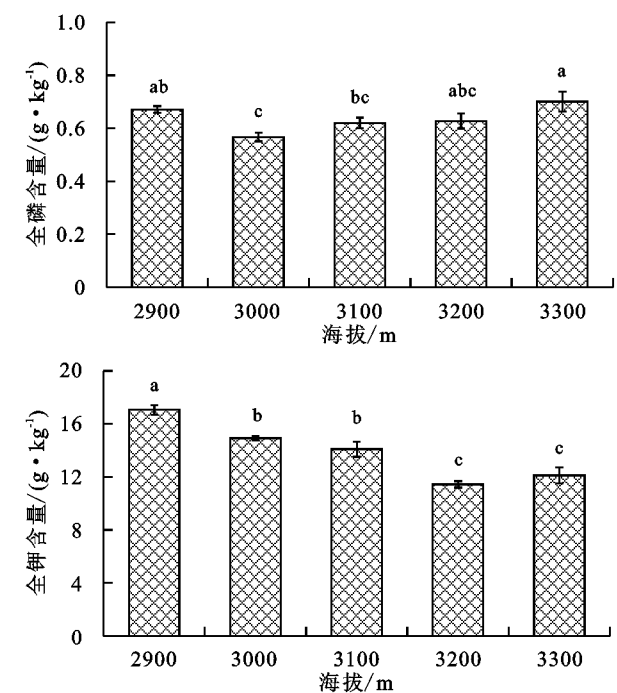


图 6 不同海拔梯度土壤磷和钾含量特征

2.2 不同海拔梯度青海云杉林土壤酶活性变化

2.2.1 不同海拔梯度土壤蔗糖酶和脲酶活性变化

从图 7 可以看出,土壤蔗糖酶活性在各海拔间的含量差异较大,且随海拔升高总体上呈增强趋势。其中海拔 3 300 m 处,蔗糖酶活性最强,经方差分析,海拔 3 300 m 蔗糖酶活性显著高于海拔 2 900~3 200 m ($P<0.05$)。有研究^[30]表明,土壤蔗糖酶直接参与土壤有机质的代谢过程,一般情况下,土壤有机质含量越高,蔗糖酶活性越强。本研究中海拔 3 300 m 处蔗糖酶活性最大,这是因为此海拔段土壤有机质、全氮

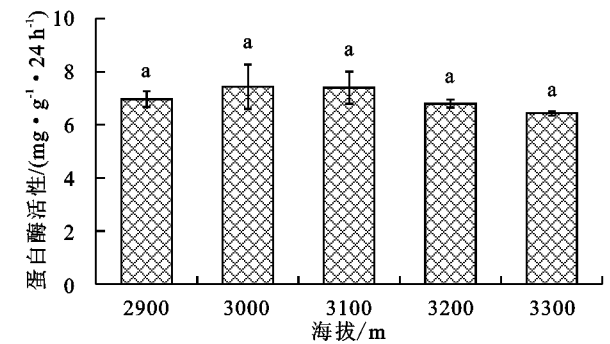
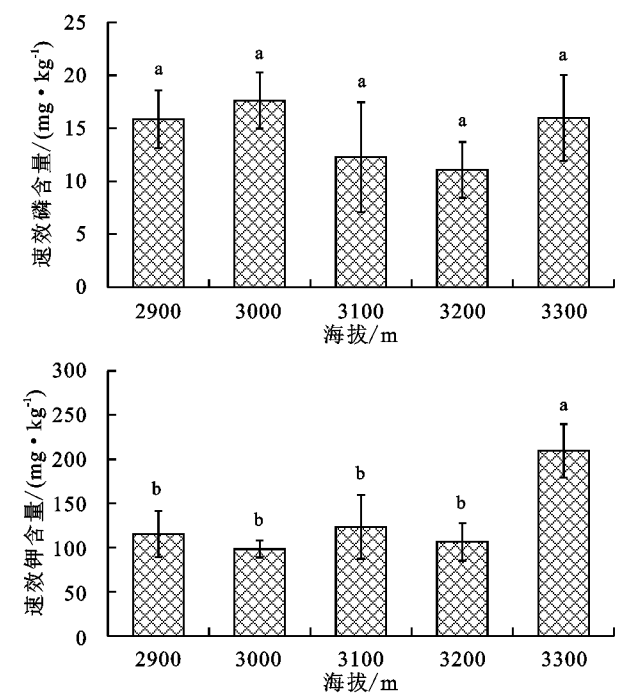


图 7 不同海拔梯度土壤蔗糖酶和脲酶活性特征

等含量较高,促进了土壤微生物的新陈代谢,从而提高了土壤蔗糖酶活性。

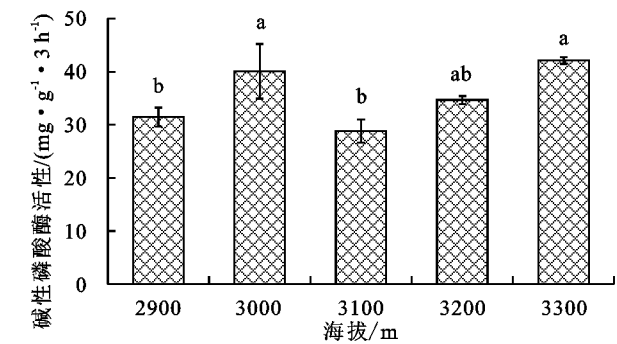
2.2.2 不同海拔梯度土壤蛋白酶和碱性磷酸酶活性变化 由图 8 可知,随海拔升高,蛋白酶活性变化幅度较小,且差异不显著($P>0.05$)。海拔 2 900~3 000 m 蛋白酶活性总体上表现为随海拔升高逐渐增强,且在 3 000 m 处活性值最大,之后随着海拔升高蛋白酶活性逐渐减弱,海拔 3 300 m 处活性值最小。

显著高于其他海拔段,而海拔 2 900~3 200 m 处土壤速效钾含量差异不显著($P>0.05$)。这可能与土壤有机质对土壤速效钾的保持作用有关。



等含量较高,促进了土壤微生物的新陈代谢,从而提高了土壤蔗糖酶活性。

由图 7 可知,随着海拔升高脲酶活性整体上呈减弱趋势,海拔 3 300 m 脲酶活性最弱。经方差分析,海拔 3 300 m 处脲酶活性与海拔 3 100 m 处差异显著($P<0.05$),而其余各海拔段之间差异不显著($P>0.05$),这一研究结果与宋贤冲等^[31]的研究结果相一致。该结果表明,低海拔地区的碳氮转化速率高,而高海拔地区的碳氮转化速率低,更利于有机碳和有机氮的积累。



由此可知,在该研究区域海拔升高对蛋白酶活性的影响较小,这与陈双林等^[7]的研究结论相一致。

由图 8 可知,随海拔升高,土壤碱性磷酸酶活性整体上呈增强趋势,在海拔 3 300 m 处碱性磷酸酶活性值最大,且与海拔 2 900,3 100 m 处差异显著($P<0.05$),但与海拔 3 000,3 200 m 处差异不显著($P>0.05$)。主要是

因为祁连山高海拔地区,常年气温较低,一定程度上影响了土壤中磷元素的利用效率,当土壤中磷元素的有效性较低时,微生物将会释放大量的土壤碱性磷酸酶,以

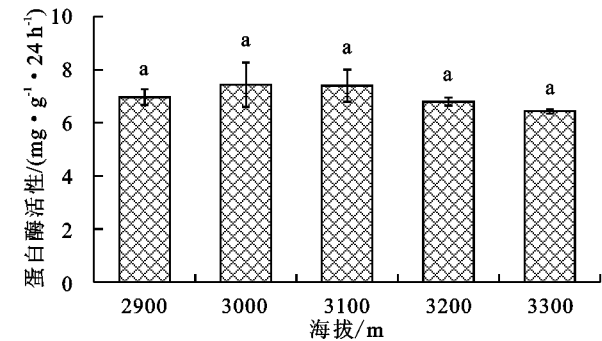


图 8 不同海拔梯度土壤蛋白酶和碱性磷酸酶活性特征

2.3 土壤酶活性与土壤理化性质的关系

试验流域青海云杉林 4 种土壤酶活性与土壤理化性质的相关性分析(表 2)表明,4 种土壤酶活性与土壤理化性质间呈显著或极显著的关系,其中土壤蔗糖酶与土壤含水量、有机质、全磷、全氮呈显著的正相关($P<0.05$),与速效钾呈极显著的正相关($P<0.01$);脲酶与全氮呈显著负相关($P<0.05$),蛋白酶与全钾呈显著正相关($P<0.05$);4 种土壤酶活性与容重、pH 和速效磷的相关性较弱,均不显著($P>0.05$)。

总体上来看,土壤酶活性与土壤理化性质之间的相关性不明显(表 2),这可能与研究区域复杂的地理条件、气候、植被、土壤等综合作用有关。这与李彦娇等^[33]对内乡宝天曼自然保护区不同海拔梯度土壤理化性质和酶活性研究结果较一致,土壤理化性质对土壤酶活性的影响不显著。

表 2 土壤酶活性与土壤理化性质的相关关系

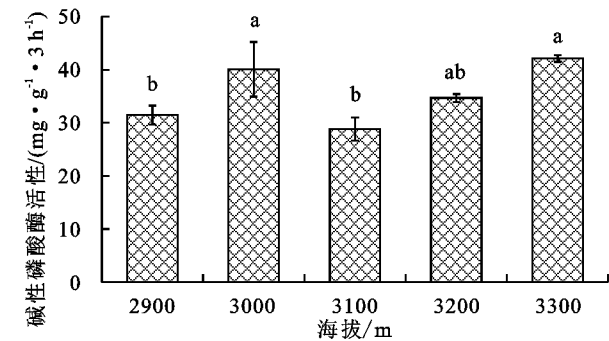
理化性质	蔗糖酶	脲酶	蛋白酶	碱性磷酸酶
含水量	0.448*	-0.302	-0.136	0.111
容重	-0.331	0.426	0.349	0.046
pH	-0.438	0.366	-0.085	0.034
有机质	0.459*	-0.352	-0.263	0.171
全氮	0.553*	-0.479*	-0.276	0.107
全磷	0.472*	-0.210	0.235	0.177
全钾	-0.183	0.085	0.491*	-0.266
速效磷	0.244	-0.036	-0.068	0.233
速效钾	0.587**	-0.289	0.107	0.237

注: * 表示各指标间相关性显著($P<0.05$); ** 表示各指标间相关性极显著($P<0.01$)。下同。

2.4 土壤酶活性间相关关系

土壤是一个多酶体系,各种酶在进行酶促反应时不仅是专一的,又是相互联系的,不同的酶在同一土壤环境中,必然存在着一定的联系。青海云杉林土壤酶活性间相关性分析(表 3)表明,蔗糖酶与脲酶之间呈极显著负相关($P<0.01$),与蛋白酶呈显著正相关

促进土壤磷循环,从而满足植物生长的需要。该研究结果与金裕华等^[10]的研究结果相类似,但与 Lipson^[32]的研究结果不同,这可能与祁连山特殊的气候条件有关。



($P<0.05$);脲酶与碱性磷酸酶呈显著正相关($P<0.05$)。由此可见,4 种土壤酶在进行酶促反应的时候,不仅具有专一性,还存在一些共性。

表 3 土壤酶活性间相关性

土壤酶	蔗糖酶	脲酶	蛋白酶
脲酶	-0.563**		
蛋白酶	0.503*	-0.238	
磷酸酶	-0.001	0.561*	-0.290

3 结论

(1)受海拔变化的影响,青海云杉林土壤理化性质变化存在差异。随着海拔升高,土壤含水量、有机质、全氮、速效钾含量逐渐增大,而土壤容重、pH、全钾含量逐渐减小;土壤全磷含量呈先减小后增大的趋势,速效磷含量没有明显的变化规律,且各海拔段间差异不显著($P>0.05$)。

(2)随着海拔梯度的变化,各土壤酶活性的变化存在差异。随着海拔升高,土壤蔗糖酶活性总体上呈增强趋势,且各海拔段间差异较大;脲酶活性总体上呈先减弱后增强趋势,海拔 3 100 m 处脲酶活性值最小,且与其余海拔段差异显著;蛋白酶活性变化幅度较小,且差异不显著;碱性磷酸酶活性整体上呈增强趋势,海拔 3 300 m 处活性值最大。

(3)总体来讲,土壤酶活性与土壤理化性质以及土壤酶之间存在着一定的相关性,其中土壤蔗糖酶与土壤含水量、有机质、全磷、全氮呈显著正相关,与速效钾呈极显著正相关;脲酶与全氮呈显著负相关,蛋白酶与全钾呈显著正相关;4 种土壤酶活性与容重、pH 和速效磷的相关性较弱,均不显著($P>0.05$)。蔗糖酶与脲酶呈极显著负相关,与蛋白酶呈显著正相关;脲酶与碱性磷酸酶呈显著正相关。

本研究只分析了海拔梯度上土壤酶活性和土壤理化性质的分布特征及相关关系。众所周知,土壤酶是一个复合体,植被群落类型、土壤理化性质、水热条

件等的差异都将会引起土壤酶活性发生变化,因此在未来的研究中,应综合考虑环境因子对土壤酶活性的影响,从而提高结论的可信度;同时应该结合研究区域特色,加强土壤酶与土壤质地、土壤有机质、土壤碳氮循环等关系的研究,全面、深入考察其对环境因子变化的响应。

参考文献:

- [1] 何容,汪家社,施政,等. 武夷山植被带土壤微生物量沿海拔梯度的变化[J]. 生态学报,2009,29(9):5138-5144.
- [2] Fierer N, McCain C M, Meir P, et al. Microbes do not follow the elevational diversity patterns of plants and animals[J]. Ecology,2011,92(4):797-804.
- [3] 曹瑞,吴福忠,杨万勤,等. 海拔对高山峡谷区土壤微生物生物量和酶活性的影响[J]. 应用生态学报,2016,27(4):1257-1264.
- [4] 王冰冰,曲来叶,马克明,等. 岷江上游干旱河谷优势灌丛群落土壤生态酶化学计量特征[J]. 生态学报,2015,35(18):6078-6088.
- [5] 杨瑞,刘帅,王紫泉,等. 秦岭山脉典型林分土壤酶活性与土壤养分关系的探讨[J]. 土壤学报,2016,53(4):1037-1046.
- [6] 熊莉,徐振锋,吴福忠,等. 雪被斑块对川西亚高山冷杉林土壤氮转化酶活性的影响[J]. 应用生态学报,2014,25(5):1293-1299.
- [7] 陈双林,郭子武,杨清平. 毛竹林土壤酶活性变化的海拔效应[J]. 生态学杂志,2010,29(3):529-533.
- [8] 斯贵才,王建,夏燕青,等. 念青唐古拉山沼泽土壤微生物群落和酶活性随海拔变化特征[J]. 湿地科学,2014,12(3):340-348.
- [9] 袁启凤,解璞,黄静,等. 云南不同海拔高度对杜鹃土壤酶活性与土壤养分的影响[J]. 热带作物学报,2013,34(12):2363-2367.
- [10] 金裕华,汪家社,李黎光,等. 武夷山不同海拔典型植被带土壤酶活性特征[J]. 生态学杂志,2011,30(9):1955-1961.
- [11] 陈志芳,刘金福,吴则焰. 戴云山不同海拔森林类型土壤理化性质与酶活性研究[J]. 河南科技学院学报,2014,42(2):10-14.
- [12] 刘贤德,赵维俊,张学龙,等. 祁连山排露沟流域青海云杉林土壤养分和 PH 变化特征[J]. 干旱区研究,2013,30(6):1013-1020.
- [13] 车宗玺,刘贤德,车宗奇,等. 祁连山青海云杉林土壤有机质及氮素的空间分布特征[J]. 水土保持学报,2014,28(5):164-169.
- [14] 赵维俊,刘贤德,徐丽恒,等. 祁连山青海云杉林动态监测样地土壤 pH 和养分的空间异质性[J]. 干旱区地理,2015,38(6):1179-1189.
- [15] 牛赞,刘贤德,苗毓鑫,等. 祁连山大野口流域土壤水热空间变化特征研究[J]. 冰川冻土,2015,37(5):1353-1360.
- [16] 张平,刘贤德,车宗玺,等. 祁连山青海云杉林土壤养分异质性分析[J]. 干旱区地理,2012,35(4):594-598.
- [17] 王涛,高峰,王宝,等. 祁连山生态保护与修复的现状问题与建议[J]. 冰川冻土,2017,39(2):229-234.
- [18] 张立杰,赵文智,何志斌,等. 祁连山典型小流域降水特征及其对径流的影响[J]. 冰川冻土,2008,30(5):776-777.
- [19] 刘鹤,赵文智,何志斌,等. 祁连山浅山区不同植被类型土壤水分时间异质性[J]. 生态学报,2008,28(5):2390-2391.
- [20] 李莎. 祁连山青海云杉林土壤温湿度变化特征分析[J]. 防护林科技,2016(1):10-12.
- [21] 张万儒,许本彤. 森林土壤分析方法[M]. 北京:中国标准出版社,1999.
- [22] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业出版社,1999.
- [23] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社,1987.
- [24] 邱扬,傅伯杰,王军等. 土壤水分时空变异及其与环境因子的关系[J]. 生态学杂志,2007,26(1):100-107.
- [25] 李晓佳. 大青山南北坡不同海拔高度表土理化性质研究[D]. 呼和浩特:内蒙古师范大学,2008.
- [26] 许文强,张豫芳,陈曦,等. 天山北坡山地针叶林土壤性质随海拔梯度的变化特征[C]. 中国山区土地资源开发利用与人地协调发展研究,北京:中国自然资源学会,2010:397-401.
- [27] 张涛,车克钧,王辉. 祁连山青海云杉林不同海拔梯度上土壤水分动态变化[J]. 湖北农业科学,2009,48(5):1107-1111.
- [28] 胡宗达,刘世荣,史作民,等. 川滇高山栎林土壤氮素和微生物量碳氮随海拔变化的特征[J]. 林业科学研究,2012,25(3):261-268.
- [29] 李建平,姚机芳,刘世全,等. 西藏自治区土壤资源[M]. 北京:科学出版社,1994.
- [30] 李海云,张建贵,姚拓,等. 退化高寒草地土壤养分、酶活性及生态化学计量特征[J]. 水土保持学报,2018,32(5):287-295.
- [31] 宋贤冲,陈晓鸣,郭丽梅,等. 猫儿山不同海拔典型植被带土壤酶活性变化特征[J]. 基因组学与应用生物学,2016,35(12):3545-3551.
- [32] Lipson D A. Relationships between temperature responses and bacterial community structure along seasonal and altitudinal gradients[J]. Fems Microbiology Ecology,2007,59(2):418-427.
- [33] 李彦娇,赵燕,王立民,等. 内乡宝天曼自然保护区土壤理化性质和酶活性的海拔特征研究[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版),2016,29(4):560-566.