

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 22 期 Vol.33 No.22 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 22 期 2013 年 11 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 利用分布有/无数据预测物种空间分布的研究方法综述 刘芳,李晟,李迪强 (7047)
- 景观服务研究进展 刘文平,宇振荣 (7058)
- 土壤呼吸组分分离技术研究进展 陈敏鹏,夏旭,李银坤,等 (7067)

个体与基础生态

- 平茬高度对四合木生长及生理特性的影响 王震,张利文,虞毅,等 (7078)
- 不同水分梯度下珍稀植物四数木的光合特性及对变化光强的响应 邓云,陈辉,杨小飞,等 (7088)
- 水稻主茎节位分蘖及生产力补偿能力 隗溟,李冬霞 (7098)
- 基于辐热积法模拟烤烟叶面积与烟叶干物质产量 张明达,李蒙,胡雪琼,等 (7108)
- 耕作方式和秸秆还田对华北地区农田土壤水稳性团聚体分布及稳定性的影响 田慎重,王瑜,李娜,等 (7116)
- 不同光照强度下兴安落叶松对舞毒蛾幼虫生长发育及防御酶的影响 鲁艺芳,严俊鑫,李霜雯,等 (7125)
- 南方小花蝽在不同空间及笼罩条件下对西花蓟马的控制作用 莫利锋,鄧军锐,田甜 (7132)
- 浮游植物对溶解态 AI 的清除作用实验研究 王召伟,任景玲,闫丽,等 (7140)
- 卧龙巴郎山川滇高山栎群落植物叶特性海拔梯度特征 刘兴良,何飞,樊华,等 (7148)
- 春夏季闽江口和兴化湾虾类数量特征 徐兆礼,孙岳 (7157)
- 啃食性端足类强壮藻钩虾对贫营养湖三种大型海藻的摄食选择性 郑新庆,黄凌风,李元超,等 (7166)

种群、群落和生态系统

- 4 种农业措施对三化螟种群动态的控制作用 张振飞,黄炳超,肖汉祥,等 (7173)
- 黄土高原沟壑区森林带不同植物群落土壤氮素含量及其转化 邢肖毅,黄懿梅,安韶山,等 (7181)
- 基于诊断学的生态系统健康评价 蔡霞,徐颂军,陈善浩,等 (7190)
- 稻田生态系统中植硅体的产生与积累——以嘉兴稻田为例 李自民,宋照亮,姜培坤 (7197)
- 自由搜索算法的投影寻踪模型在湿地芦苇调查中的应用 李新虎,赵成义 (7204)
- 贺兰山不同海拔典型植被带土壤微生物多样性 刘秉儒,张秀珍,胡天华,等 (7211)
- 内蒙古典型草原灌丛化对生物量和生物多样性的影响 彭海英,李小雁,童绍玉 (7221)
- 黄土丘陵沟壑区 80 种植物繁殖体形态特征及其物种分布 王东丽,张小彦,焦菊英,等 (7230)
- 基于 MAXENT 模型的贺兰山岩羊生境适宜性评价 刘振生,高惠,滕丽微,等 (7243)
- 太湖湖岸带浮游植物初级生产力特征及影响因素 蔡琳琳,朱广伟,李向阳 (7250)

景观、区域和全球生态

- 艾比湖地区土壤呼吸对季节性冻土厚度变化的响应…………… 秦 璐,吕光辉,何学敏,等 (7259)
- 田间条件下黑垆土基础呼吸的季节和年际变化特征…………… 张彦军,郭胜利,刘庆芳,等 (7270)

资源与产业生态

- 光核桃遗传资源的经济价值评估与保护 …………… 张丽荣,孟 锐,路国彬 (7277)
- 棉花节水灌溉气象等级指标…………… 肖晶晶,霍治国,姚益平,等 (7288)

研究简报

- 云南红豆杉人工林萌枝特性…………… 苏 磊,苏建荣,刘万德,等 (7300)
- 赣中亚热带森林转换对土壤氮素矿化及有效性的影响…………… 宋庆妮,杨清培,余定坤,等 (7309)

学术信息与动态

- 2013 年 European Geosciences Union 国际会议述评 …………… 钟莉娜,赵文武 (7319)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 276 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 30 * 2013-11



封面图说: 山坡岩羊图——岩羊属国家二级保护动物,因喜攀登岩峰而得名,又名石羊。贺兰山岩羊主要分布于海拔 1500—2300m 的山势陡峭地带,羊群多以 2—10 只小群为主。生境适宜区主要为贺兰山东坡(宁夏贺兰山国家级自然保护区)的西南部,而贺兰山西坡(内蒙古贺兰山国家级自然保护区)也有少量分布。贺兰山建立国家级自然保护区以来,随着保护区环境的不断改善,这里岩羊的数量也开始急剧增长,每平方公里的分布数量现居世界之首,岩羊的活动范围也相应扩大到低山 900 米处的河谷。贺兰山岩羊生境选择的主要影响因子为海拔、坡度及植被。

彩图及图说提供:陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201208061110

刘秉儒, 张秀珍, 胡天华, 李文金. 贺兰山不同海拔典型植被带土壤微生物多样性. 生态学报, 2013, 33(22): 7211-7220.

Liu B R, Zhang X Z, Hu T H, Li W J. Soil microbial diversity under typical vegetation zones along an elevation gradient in Helan Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(22): 7211-7220.

贺兰山不同海拔典型植被带土壤微生物多样性

刘秉儒^{1,3,*}, 张秀珍¹, 胡天华^{2,3}, 李文金⁴

(1. 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021;

2. 宁夏贺兰山国家级自然保护区管理局, 银川 750021; 3. 国家林业局贺兰山森林生态定位研究站, 银川 750021;

4. 兰州大学草地农业生态系统国家重点实验室, 兰州 730000)

摘要:土壤微生物多样性在海拔梯度的分布格局研究近年来受到和植物动物一样的重视程度,但是干旱风沙区微生物多样性在海拔梯度上的多样性分布规律尚未揭示。以处于干旱风沙区的贺兰山不同海拔的 6 个典型植被带土壤为研究对象,利用 Biolog 微平板法和磷脂脂肪酸甲酯法(FAMES)系统研究微生物多样性群落特征以及在不同植被带分布规律。结果表明:土壤微生物功能多样性随海拔增加发生变化,且微生物群落结构存在显著差异。Biolog 分析显示土壤微生物群落代谢活性依次是:亚高山草甸>寒温性针叶林>针阔混交林>温性针叶林>山地旱生灌丛>荒漠草原,随海拔的升高土壤微生物群落物种丰富度指数(H')和均匀度指数(E')总体上均表现出增大的趋势,差异显著($P<0.05$);FAMES 分析表明不同海拔的微生物区系发生了一定程度的变化,寒温性针叶林土壤微生物磷脂脂肪酸生物标记的数量和种类均最高,且细菌、真菌特征脂肪酸相对含量也最高;土壤微生物群落结构多样性次序是:寒温性针叶林带>针阔混交林带>温性针叶林带>亚高山草甸>山地旱生灌丛>荒漠草原。研究结果表明贺兰山海拔梯度的微生物多样性分布规律不同于已有的植物多样性“中部膨胀”研究结果,这说明在高海拔地区有更多的适合该生境的微生物存在,这对维持干旱风沙区的生态系统功能稳定性具有重要意义。

关键词:贺兰山; 海拔梯度; 植被带; 土壤微生物多样性; Biolog; 磷脂脂肪酸甲酯法

Soil microbial diversity under typical vegetation zones along an elevation gradient in Helan Mountains

LIU Bingru^{1,3,*}, ZHANG Xiuzhen¹, HU Tianhua^{2,3}, LI Wenjin⁴

1 Key Laboratory of Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwestern China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2 Administration of Helan Mountain National Natural Nature Reserve in Ningxia; Yinchuan 750021, China

3 Research Station of Helan Mountain Forest Ecosystems, Yinchuan, Ningxia 750021, China

4 State Key Laboratory of Grassland and Agro-Ecosystems, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China

Abstract: The study of elevational diversity gradients dates back to the foundation of biogeography. Elevational diversity patterns on plant and animal taxa have been studied exclusively over the past century, however, pattern of soil microbial diversity along an elevation gradient remain poorly understood, especially in the arid sand areas. Helan Mountain is one of few well conserved natural ecosystems in North-West of China, which have the characteristic of the significant vertical distribution of vegetation and the vegetation horizontal zonation from desert to frigid zones. Therefore, it will provide us an idea study model to assess the generality of elevational diversity patterns for soil bacterial diversity along an elevation gradient. Here, we present a comprehensive analysis of soil bacterial community composition and diversity along six

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41061003);兰州大学中央高校基本科研业务费专项资助项目(Lzujbky-2012-107)

收稿日期:2012-07-06; **修订日期:**2013-03-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bingru.liu@163.com

elevations representing six typical vegetation types from desert steppe to subalpine meadow. The structure and function of soil microbial community were studied by using Biolog plate and phospholipid fatty acid methyl ester (FAMES), respectively. The results showed that soil microbial functional diversity and community structure differed significantly along the elevation gradient (vegetation types). Shannon-Weiner index (H) of soil microbe and species evenness index (E) showed an increasing trend ($P < 0.05$). The order of microbial metabolic activity was subalpine meadow > cold temperate coniferous forest > coniferous mixed forest > temperate coniferous forest > arid dwarf-scrub > desert steppe, thus the maximal microbial metabolic activity would alter soil C and N cycling to meet available nutrients for plants in the high altitude sites, because soil N and P increased with the elevation. The FAMES analysis showed that micro flora shifted along the elevational gradient and soil bacteria dominated microbial community, however, differed significantly along the elevation gradient (vegetation types). Soil microbial diversity and number and type of phospholipid fatty acid biomarkers were the highest in the cold temperate coniferous forest. The relative contents of phospholipid fatty acid in bacteria, fungi were also the highest in the cold temperate coniferous forest. The order of microbial community diversity was cold temperate coniferous forest > coniferous mixed forest > temperate coniferous forest > subalpine meadow > mountain xerophytic shrub > desert steppe, which indicated that more litter or organic resource in forest ecosystems than grasslands would favor soil microbial diversity. These results supported that microbes do not follow the elevational diversity patterns of plants and the difference could be caused by ecological and evolutionary processes across the gradient. The finding suggests that there were more suitable microorganisms, which played more important in maintaining ecosystem stability in the arid sand areas.

Key Words: Helan Mountains; elevation gradient; vegetation zone; soil microbial diversity; biolog; FAMES

土壤微生物是整个生态系统的重要部分,它积极参与生态系统物质循环和能量流动,在生物地化循环过程调控和生态系统功能维持方面起着关键作用^[1-3]。深入探讨土壤微生物多样性的变化规律,揭示微生物群落与生境的关系,有助进一步揭示生态系统退化/恢复的机理^[4],从而为土壤质量监测、植被恢复和可持续生态系统的建设提供科学依据。

贺兰山是我国三大沙漠(毛乌素沙地、乌兰布和沙漠、腾格里沙漠)与银川平原的分界线,是我国西北地区最后一道生态屏障,也是连接青藏高原、蒙古高原及华北植物区系的枢纽,生物类型具有典型的多样性和交叉性^[4-5]。作为干旱区具有完整垂直带谱的山地生物多样性宝库,贺兰山的植物多样性受到重视^[6-7],但是对土壤微生物多样性的研究明显不足,不同海拔梯度土壤的微生物群落结构和分布特性尚不明确。

贺兰山植被有明显的垂直分布规律,随海拔的升高,植被类型分别为荒漠化草原、山地疏林草原、山地针叶林和亚高山灌丛草甸或高山草甸^[4,6-7],是研究干旱风沙区不同类型生态系统地上地下关系演变问题的理想场所。贺兰山较低海拔处的荒漠地带和地处较高海拔的高山草甸地带,条件都较为严酷,而海拔在 1700—2200 m 之间的植物物种丰富度最高、林型变化最大,植物物种多样性分布规律符合山地生态学“中间膨胀”理论^[7],但是贺兰山微生物多样性变化规律尚不明确,为此,本文通过沿海拔梯度的 6 个典型植被带土壤开展微生物多样性实验研究,为贺兰山荒漠-森林生态系统养分循环调控、退化生态系统的恢复和重建、保护区的管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区自然概况

贺兰山位于银川平原和阿拉善高原之间(地处 38°27′—39°30′N, 105°41′—106°41′E 之间),山体孤立,主峰海拔 3556 m。贺兰山西和北侧为阿拉善戈壁荒漠,东侧为银川平原。贺兰山处在典型大陆性气候区域范围内,具有山地气候特征。气候变化大,年均气温 -0.8 °C,年均降水量 420 mm,年均蒸发量 2000 mm,贺兰山的降水量具有明显的垂直分异现象,平均每上升 100 m,降水量增加 13.2 mm。年均降水量自山麓至高山带为 200—600 mm,6—8 月份最为集中,占全年降水量的 60%—80%^[8]。贺兰山植被垂直带变化明显,其中分布于

海拔 2400—3100 m 的阴坡的寒温性针叶林带的青海云杉纯林郁闭度大,更新良好,是贺兰山区最重要的林带^[4,8]。

1.2 研究方法

在贺兰山 1300—3200 m 海拔范围内,横跨东坡和西坡沿海拔高度依次确定了以短花针茅为建群种的荒漠化草原(DS)、蒙古扁桃为建群种的山地旱生灌丛(MXS)、油松为建群种的温性针叶林(TCF)、油松、杜松和山杨为优势种的针阔叶混交林(MF)、青海云杉为建群种的寒温性针叶林(CTCF)和嵩草、矮嵩草为优势种的亚高山草甸(SAM)等 6 种代表性的典型植被带,在每个植被带按等高线设置 5 个样地,于 2011 年 8 月上旬进行样地调查(样地基本情况见表 1),每个样方内去除地表枯落物或者剥离表土后用直径为 4 cm 的土壤取样器随机钻取 0—10 cm 的土样 5 个,混合后剔除植物根系和石块,过 2 mm 筛后转入消毒的塑料袋并保存到 4 ℃ 的冰盒,带回实验室后立即用新鲜土样分别测定土壤微生物的代谢活性,用脂肪酸甲酯提取微生物脂肪酸。

表 1 样地基本情况
Table 1 Basic condition of plots

植被带 Vegetation zones	海拔/m Elevation	地理坐标 Geographic coordinate	坡度(°) Slope	坡向/坡位 Exposure/ Slope position	枯落物 厚度/cm Depth of litter	植被状况 Conditions of vegetation
荒漠草原(DS)	1345	38°41'12"N 105°58'15"E	12	东坡半阳坡/上	1	草本:短花针茅+戈壁针茅群丛;灌木:红砂+猫头刺群丛
山地旱生灌丛 (MXS)	1740	38°44'14"N 105°56'12"E	10	东坡半阳坡/中	—	灌木:蒙古扁桃+狭叶锦鸡儿灌丛;草本:短花针茅+冰草群丛
温性针叶林(TCF)	2030	38°44'15"N 105°54'11"E	25	东坡半阳坡/下	3—4	乔木:油松+杜松群丛;灌木:小叶忍冬+栒子+虎榛子群丛;草本:苔草+早熟禾群丛
针阔混交林(MF)	2200	38°44'10"N 105°54'16"E	20	东坡阳坡/中上	2—3	乔木:油松+杜松+山杨群丛;灌木:茶藨子+小檗+虎榛子群丛;草本:短花针茅+苔草+早熟禾群丛
寒温性针叶林 (CTCF)	2780	38°53'22"N 105°56'01"E	27	西坡阴坡/下	5	乔木:青海云杉+杜松群丛;灌木:毛山楂+铁线莲群丛;草本:苔草+早熟禾+唐松草群丛
亚高山草甸 (SAM)	3020	38°54'07"N 105°59'13"E	23	西坡阳坡/下	—	灌木:金露梅+鬼箭锦鸡儿群丛;草本:嵩草+矮嵩草+堇色早熟禾群丛,阿拉善风毛菊+多裂委陵菜群丛

1.2.1 土壤理化性质的测定

土样基本理化性质的测定用常规分析方法^[12],其中土壤含水量采用烘干法,土壤容重采用环刀法,pH 值的测定采用酸度计法。土壤全盐测定采用电导法(水:土=5:1)。土壤全氮采用凯氏定氮法。全磷采用 HClO₄-浓 H₂SO₄外加热消煮法、分光光度法。

1.2.2 土壤微生物功能群落多样性的测定

称 10 g 的新鲜土,在超净工作台中将土壤加入带有玻璃珠的存有 90 mL 无菌 0.145 mol/L NaCl 溶液的三角瓶中,加盖振荡 15 min(转速为 150 r/min),使土壤颗粒均匀分散,静置 1 min 后,用移液枪吸取 5 mL 溶液,加入装有 45 mL 无菌水的三角瓶中,将土样稀释 100 倍,静置 10—15 min,将抽取 150 μL 的悬浮液接种至 Biolog 生态盘中,放入 25 ℃ 培养箱中培养 7 d,每隔 12 h 在 595 nm 处用 VAMAX 自动读盘机进行自动读数(Mierolog ReL 3.5 软件),并延续至 168 h^[9]。

微平板孔中溶液吸光值平均颜色变化率 AWCD、Shannon-Wiener 物种丰富度指数 H、碳源利用丰富度指数 S、Shannon-Wiener 均匀度指数 E、Simpson 优势度指数 Ds 的计算^[9]:

$$AWCD = \sum (C_i - R_i) / n$$

式中,C_i为每个有培养基孔的吸光值,R_i为对照孔的吸光值,n 为培养基孔数,Biolog 生态板 n 值为 31。

$$H = - \sum P_i (\ln P_i)$$

式中,P_i为第 i 孔的相对吸光值与所有整个微平板的相对吸光值总和的比值,计算公式:

$$P_i = (C_i - R_i) / \sum (C_i - R_i)$$

式中, S 为被利用碳源的总数(吸光值 ≥ 0.25 所有微孔的总和); $D_s = 1 - \sum P_i$

1.2.3 土壤微生物群落结构多样性测定

(1)脂肪酸甲酯提取 将 15 mL 的 0.2 mol/L 的 KOH 甲醇溶液和 3g 的新鲜土壤加到 35 mL 的离心管中,同时加入 100 μ L 的标样(C19:0),然后混合均匀,在 37 $^{\circ}$ C 下温育 1 h(脂肪酸释放,样品 10 min 涡旋 1 次)。

(2)加 3 mL 1.0 mol/L 的醋酸溶液中和 pH 值。加 10 mL 的正己烷,使 FAMES 转到有机相中,480 $\times$ g 离心 10 min,将正己烷相转到干净试管中,在 N_2 气流下挥发掉溶剂,将 FAMES 溶解在 0.5 mL 的 1:1 的(正己烷:甲基基醚)。

(3)作气相色谱(GC-MS)分析,得到土壤微生物的磷脂脂肪酸组成图谱,进而得到不同脂肪酸的含量和种类^[10],即 FAME 指纹构型。

2 结果与分析

2.1 不同海拔植被带土壤特征

不同海拔 6 种植被带土壤理化性质表现出不同的变化趋势(表 2)。土壤含水量随着海拔的增加表现出逐渐增加的趋势,但是处于迎风坡的亚高山草甸土壤水分明显低于温性针叶林、针阔混交林和寒温性针叶林。土壤容重表现为山地旱生灌丛土壤容重最大为 1.733 g/cm³,荒漠草原的粗骨土和亚高山草甸土次之,有森林分布的山地灰褐土较小,寒温性针叶林最小为 0.508 g/cm³。说明土壤容重与海拔梯度的变化不相关,与土壤类型关系密切,土壤 pH 值随着海拔高度的增加逐渐减小。土壤全盐在 0.342—0.549 g/kg 范围内依大小顺序交替变化。

土壤全氮和土壤全磷随着海拔高度的变化,增加的次序依次是亚高山草甸>针阔混交林>温性针叶林>寒温性针叶林>山地旱生灌丛>荒漠草原。

表 2 贺兰山不同海拔植被带的土壤理化性质(0—10 cm)

Table 2 Chemical and physical properties of soils in different vegetation zones of Helan Mountains(0—10 cm)

植被带 Vegetation zones	含水量/% Moisture content	容重/(g/cm ³) Bulk density	全盐/(g/kg) Total salt	pH	全氮/(g/kg) Total nitrogen	全磷/(g/kg) Total phosphorus
DS	6.083 $\pm$ 1.176	1.420 $\pm$ 0.386	0.353 $\pm$ 0.004	8.66 $\pm$ 0.04	1.702 $\pm$ 0.053	0.263 $\pm$ 0.007
MXS	8.544 $\pm$ 1.054	1.733 $\pm$ 0.051	0.342 $\pm$ 0.009	8.64 $\pm$ 0.03	2.210 $\pm$ 0.129	0.511 $\pm$ 0.059
TCF	36.680 $\pm$ 1.045	0.599 $\pm$ 0.018	0.520 $\pm$ 0.020	8.15 $\pm$ 0.03	4.447 $\pm$ 0.348	0.517 $\pm$ 0.096
MF	40.566 $\pm$ 1.343	0.671 $\pm$ 0.054	0.441 $\pm$ 0.007	8.12 $\pm$ 0.02	7.173 $\pm$ 0.462	0.717 $\pm$ 0.024
CTCF	44.658 $\pm$ 4.636	0.508 $\pm$ 0.076	0.549 $\pm$ 0.060	8.08 $\pm$ 0.06	5.700 $\pm$ 0.131	0.485 $\pm$ 0.061
SAM	26.702 $\pm$ 6.065	0.731 $\pm$ 0.023	0.408 $\pm$ 0.024	8.06 $\pm$ 0.04	8.701 $\pm$ 0.311	0.720 $\pm$ 0.023

表中数值为 3 个数的平均值(误差),同一列的小写字母表示同一海拔不同土壤主要理化性质的方差分析在 $P < 0.05$ 水平差异显著

2.2 土壤微生物多样性分析

2.2.1 土壤微生物功能多样性分析

平均颜色变化率(AWCD)表征了微生物群落碳源利用率,反映了土壤微生物活性、微生物群落生理功能多样性。图 1 结果显示,在 168 h 的培养期内,总体上 AWCD 随着培养时间的延长而增大,即微生物活性随培养时间的延长而提高,在培养起始的 24 h 内 AWCD 值变化不明显,而且都很低,说明刚开始一段时间内微生物对碳源的利用很低。而培养 24 h 后 AWCD 值快速增加,并且随着培养时间的延长,AWCD 的值逐渐升高,在 144 h 时 AWCD 值增加速度有所减缓,AWCD 值趋于稳定,其平均值分别为 0.149、0.333、0.714、0.759、0.940、0.998,不同植被带的土壤微生物利用单一碳源

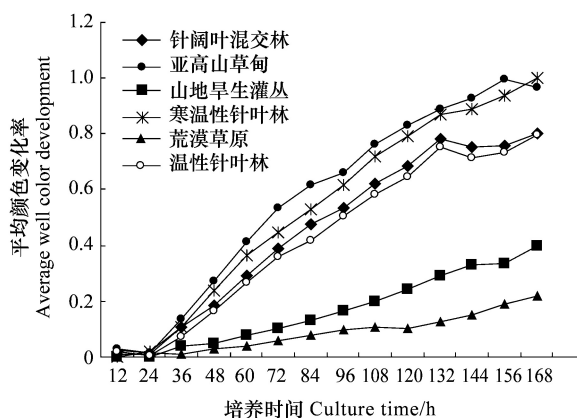


图 1 不同植被带土壤平均颜色变化率

Fig. 1 Average rate of change color development of soil in different vegetation zones of Helan Mountains

能力(AWCD)的顺序为:亚高山草甸>寒温性针叶林>针叶混交林>温性针叶林>山地旱生灌丛>荒漠草原。

Shannon 指数、Shannon 均匀度指数、Simpson 指数和碳源利用丰富度指数是表征群落多样性的常用指数,是研究群落物种数及其个体数和分布均匀程度的综合指标^[11]。本文以上述 4 个指数来研究不同植被类型土壤微生物群落对 31 种碳源利用的多样性,结果表明(表 3)随海拔的升高,土壤微生物群落物种丰富度指数(*H*)和均匀度指数(*E*)总体上均表现出增大的趋势,荒漠草原土壤微生物群落物种丰富度指数和均匀度指数最低,分别为 0.697 和 0.397,亚高山草甸土壤微生物群落物种丰富度指数和均匀度指数最高,分别为 2.919 和 0.921。沿着海拔递增碳源利用丰富度指数(*S*)也表现出递增的规律,优势度指数依次为:荒漠草原>山地旱生灌丛>温性针叶林>针阔混交林>寒温性针叶林>亚高山草甸,荒漠草原优势度指数最高为 0.992,海拔最高的亚高山草甸均匀度最低为 0.915。但是土壤微生物群落优势度指数(*Ds*)随着海拔的升高则表现出逐渐降低的趋势。表明优势度指数(*Ds*)越大,群落结构受优势种的影响越大,海拔越高土壤微生物群落受优势种植被的影响越小。

表 3 不同植被带土壤微生物多样性指数分析

Table 3 Diversity indices for soil microbial communities in different vegetation zone

植被带 Vegetation zones	物种丰富度指数(<i>H</i>) Shannon index	均匀度指数(<i>E</i>) Substrate evenness	优势度指数(<i>Ds</i>) Simpson's Dominance	碳源利用丰富度指数(<i>S</i>) Substrate richness
DS	0.697±0.11a	0.397±0.025a	0.992±0.0032a	7±1.2a
MXS	1.087±0.19b	0.446±0.042b	0.989±0.0029b	12±2.7b
TCF	2.470±0.05c	0.831±0.028c	0.950±0.0048c	20±0.97c
MF	2.709±0.09d	0.902±0.018d	0.948±0.0018c	20±0.97c
CTCF	2.665±0.25d	0.864±0.079d	0.930±0.010d	22±1.1d
SAM	2.919±0.19d	0.921±0.048d	0.915±0.012d	24±1.8e
<i>F</i>	34.114	30.192	19.384	16.792

不同海拔梯度植被带土壤微生物群落碳源利用类型的主成分分析,将多个变量通过线性变换以选出较少个数重要变量。主成分个数的提取原则是相对应特征值大于 1 的前 *m* 个主成分,且一般要求累计方差贡献率要达到 85%。对 FAMEs 指纹图谱进行主成分分析,通过方差分解主成分提取分析(表 4),总共提取出 4 个主成分因子,前 3 个主成分累积贡献率达到 85.484%,大于 85%。第一主成分可以解释 35.79%的变异,第二主成分能够解释 31.91%的变异,第三主成分能够解释 17.79%的变异,因此,第一主成分、第二主成分和第三主成分为主要解释的主成分。

表 4 方差分解与主成分提取分析

Table 4 Total variance explained variance component and Principal component analysis

主成分 Principal component	初始特征值提取 Start eigenvalue extraction			载荷值平方和 Sum of squares of load value		
	特征值 Eigenvalue	方差贡献率 Contributing rate of variance/%	累积贡献率 Contributing rate of accumulation/%	特征值 Eigenvalue	方差贡献率 Contributing rate of variance/%	累积贡献率 Contributing rate of accumulation/%
1	10.020	35.785	35.785	10.020	35.785	35.785
2	8.934	31.906	67.691	8.934	31.906	67.691
3	4.982	17.793	85.484	4.982	17.793	85.484
4	2.558	9.134	94.618	2.558	9.134	94.618

将 Biolog 微平板中 31 种碳源分为 6 类,分别为羧酸类化合物、多聚化合物、碳水化合物、芳香化合物、氨基酸、胺类化合物,不同海拔梯度的 6 种典型植被带土壤微生物群落对 6 类碳源的利用有一定的差异性,碳水化合物、羧酸类化合物和氨基酸是其主要利用的碳源,分别为 12、6、6 种(表 5)。说明微生物利用最主要的碳源类别是碳水化合物。

表 5 31 种碳源的主成分载荷因子

Table 5 Loading factors of principle components of 31 sole-carbon sources

碳源对应微孔 Microporous correspond carbon source	碳源类型 Type of carbon source	PC1	PC2	PC3
A ₁	空白	—	—	—
B ₁	丙酮酸甲酯(羧酸类化合物)	0.929	0.245	0.219
C ₁	吐温-40(多聚化合物)	0.999	-0.051	-0.010
D ₁	吐温-80(多聚化合物)	0.855	-0.245	-0.371
E ₁	α-环糊精(多聚化合物)	0.529	0.044	-0.259
F ₁	糖原(碳水化合物)	0.863	-0.267	-0.198
G ₁	D-纤维二糖(碳水化合物)	0.412	0.909	-0.019
H ₁	α-D-乳糖(碳水化合物)	0.525	0.395	-0.545
A ₂	β-甲基-D-葡萄糖苷(碳水化合物)	0.414	0.888	-0.114
B ₂	D-木糖(碳水化合物)	0.700	0.691	0.134
C ₂	i-赤藓糖醇(碳水化合物)	0.541	-0.202	0.804
D ₂	D-甘露醇(碳水化合物)	0.937	0.339	0.049
E ₂	N-乙酰基-D-葡萄糖胺(碳水化合物)	0.768	0.614	0.121
F ₂	D-葡萄糖胺(羧酸类化合物)	0.878	-0.301	0.367
G ₂	葡萄糖-1-磷酸(碳水化合物)	0.353	0.928	0.002
H ₂	D,L-α-磷酸甘油(碳水化合物)	0.817	-0.244	-0.053
A ₃	D-半乳糖-γ-内酯(碳水化合物)	0.966	-0.118	-0.148
B ₃	D-半乳糖醛酸(羧酸类化合物)	0.980	0.129	-0.101
C ₃	2-羟基苯甲酸(芳香化合物)	0.489	-0.397	-0.728
D ₃	4-羟基苯甲酸(芳香化合物)	0.978	-0.044	0.134
E ₃	γ-羟基丁酸(羧酸类化合物)	0.987	-0.126	0.083
F ₃	衣康酸(羧酸类化合物)	0.760	-0.514	0.355
G ₃	α-丁酮酸(羧酸类化合物)	0.510	-0.478	0.703
H ₃	D-苹果酸(羧酸类化合物)	0.795	-0.018	-0.582
A ₄	L-精氨酸(氨基酸)	0.979	-0.172	0.039
B ₄	L-天门冬酰胺酸(氨基酸)	0.994	0.102	-0.036
C ₄	L-苯基丙氨酸(氨基酸)	0.351	0.275	0.885
D ₄	L-丝氨酸(氨基酸)	0.998	0.028	-0.056
E ₄	L-苏氨酸(氨基酸)	-0.587	0.675	0.244
F ₄	葡萄糖-L-谷氨酸(氨基酸)	0.906	-0.183	-0.064
G ₄	苯基乙胺(胺类化合物)	0.757	0.003	0.201
H ₄	腐胺(胺类化合物)	0.931	-0.254	-0.174

计算 31 个碳源在 3 个主成分上的载荷值。初始载荷因子反应主成分与碳源利用的相关系数,载荷因子越高表示碳源对主成分的影响越大。表 5 说明与第一主成分具有较高相关性的碳源有 24 种。与第一主成分显著正相关的 PLFAs 类型有 11 个,分别为 15:0、16:0、16:1、18:1 ω 9c、18:1 ω 9t、18:2 ω 6c、18:3 ω 3、20:3 ω 3、20:5 ω 3、21:0、24:0,并且相关性系数较高,最大可达到 0.997。与第二主成分显著正相关的 PLFAs 类型有 8 个,分别为 14:1、15:1、16:0、17:0、18:0、18:2 ω 6t、20:0、20:3 ω 6。与第三主成分有较高相关性的 PLFAs 类型有 7 个,分别为 17:1、18:3 ω 6、20:5 ω 1、22:0、22:6 ω 3、24:0、24:1。第一主成分所包含的脂肪酸类型是土壤的主要 PLFAs 类型。

2.2.2 土壤微生物群落结构多样性分析

从土壤中提取出从 C14—C24 磷酸脂肪酸生物标记共 28 个(表 6),不同的生物标记代表着不同类型的微生物,包括细菌、真菌、放线菌、原生动物等,不同的 FAMES 生物标记在土壤中的分布可分为两种:一是完全分

布,即在各个植被带中均有分布,如 16:0。另一种是不完全分布,如 20:5 ω 1 只在山地旱生灌丛土壤中分布,而在其余海拔植被带中没有分布;同样 20:4 ω 6 只在温性针叶林土壤中分布,在其他海拔高度植被带中没有分布。

表 6 PLFAs 生物标记在不同植被带土壤中的分布情况

Table 6 The distribution of PLFAs biomarkers in different vegetation zone

序号 No.	磷脂脂肪酸类型 Type of phospholipid fatty acid	分类 Class	DS	MXS	TCF	MF	CTCF	SAM
1	14:1	细菌	—	—	0.250	0.220	0.253	0.1800
2	15:10	细菌	0.182	0.182	0.340	0.559	0.824	0.428
3	15:11	细菌	—	—	0.258	0.24	0.308	0.215
4	16:10	细菌	0.570	0.570	2.284	4.111	4.387	3.113
5	16:11	细菌	0.693	0.439	1.772	3.028	5.800	4.116
6	17:10	细菌	0.117	0.186	0.310	0.284	0.266	0.226
7	17:11	细菌	0.255	1.891	0.422	1.071	1.485	1.244
8	18:10	细菌	0.901	0.939	1.630	2.368	1.323	0.648
9	18:11 ω 9c	真菌	1.271	2.864	4.24	5.427	9.260	4.483
10	18:11 ω 9t	真菌	0.783	0.733	3.165	4.9801	5.171	3.588
11	18:12 ω 6c		0.360	0.465	2.650	4.4567	5.701	4.246
12	18:12 ω 6t		—	0.122	0.554	0.832	0.487	0.581
13	18:13 ω 3	真菌	—	2.058	2.002	3.596	9.856	2.697
14	18:13 ω 6	真菌	0.716	1.700	1.720	1.915	1.994	1.309
15	20:10	细菌	0.586	0.821	1.700	1.585	1.111	2.202
16	20:11	细菌	—	1.957	1.575	2.187	3.1101	2.463
17	20:13 ω 3		—	15.157	10.875	14.763	25.628	8.154
18	20:13 ω 6	原生动物	0.613	1.923	1.391	0.859	1.262	1.171
19	20:14 ω 6	原生动物	—	—	4.203	—	—	7.586
20	20:15 ω 1		—	8.191	—	—	—	—
21	20:15 ω 3		—	—	7.181	11.476	14.577	9.513
22	21:10	真菌	—	—	1.349	1.470	2.346	1.054
23	22:10	细菌	—	3.640	—	—	3.553	—
24	22:12	细菌	1.123	1.321	5.149	2.135	2.675	1.613
25	22:11 ω 9		—	—	—	2.926	—	—
26	22:16 ω 3		—	0.732	—	—	—	—
27	24:10	细菌	—	1.041	—	15.523	17.616	—
28	24:11	细菌	—	1.957	—	—	—	—

由于磷脂脂肪酸生物标记的总含量能够基本反映出微生物总的含量^[12],将各海拔高度土壤磷脂脂肪酸生物标记总量作图,结果如图 2 所示。寒温性针叶林土壤微生物磷脂脂肪酸生物标记的数量和种类均最高,意味着寒温性针叶林土壤微生物量比其他几个海拔高度土壤微生物量明显要高。通过细菌、真菌的生物量以及细菌/真菌比值变化来分析贺兰山不同海拔各植被带土壤微生物群落结构的差异(图 3),可以看出土壤中主要的微生物类群是细菌,各植被带土壤中细菌生物量含量存在较大差异,同样,还可以看出各样地中真菌生物量的变化与细菌的变化相同。细菌与真菌的比值在各植被带土壤中也存在差异,山地旱生灌丛为 2.03、针阔混交林为 1.92,荒漠草原最小 1.19。总体来看,即寒温性针叶林土壤中细菌、真菌生物量及细菌与真菌的比值都较高,山地旱生灌丛土壤中细菌、真菌生物量及细菌与真菌的比值则最小。

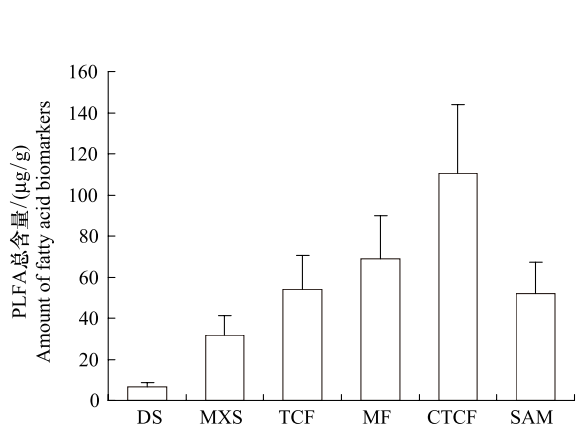


图2 不同植被带土壤微生物 PLFA 总含量的变化
Fig.2 Changes of the total PLFA in different vegetation zone

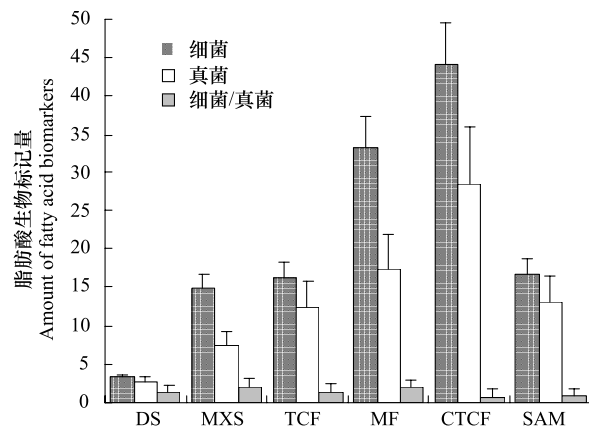


图3 不同植被带土壤细菌、真菌及细菌/真菌特征性磷酸脂脂肪酸标记含量的变化
Fig.3 The changes of PLFA marker of bacteria、fungi and bacteria / fungi in different vegetation zone

多样性指数可用于评价不同土壤的微生物群落多样性,多样性指数值高则表明土壤有高的微生物群落多样性^[13]。不同海拔高度 6 种典型植被带土壤微生物多样性指数进行分析(表 7),表明不同海拔高度土壤微生物 Shannon-Wiener 指数存在着显著差异,荒漠草原土壤微生物群落 Shannon-Wiener 指数为 0.576,明显低于其它海拔植被带土壤微生物多样性指数,寒温性针叶林土壤微生物群落的 Shannon-Wiener 指数最高(1.148)。Shannon-Wiener 指数依次为寒温性针叶林>亚高山草甸>针阔混交林>亚高山草甸>山地旱生灌丛>荒漠草原。Simpson 指数变化不明显,寒温性针叶林土壤微生物 Pielou 指数最高为 0.34,明显高于荒漠草原(0.17)和山地旱生灌丛(0.24),说明寒温性针叶林土壤微生物组成存在丰富的多样性。

表 7 6 种不同典型植被带土壤微生物多样性指数比较
Table 7 Soil microbial diversity indices in different vegetation zones

植被带 Vegetation zones	Shannon-Wiener 指数 <i>H</i> Shannon-Wiener index	Simpson 指数 <i>C</i> Simpson index	Pielou 指数 <i>E</i> Pielou index
DS	0.576	0.999	0.173
MXS	0.792	0.998	0.238
TCF	1.002	0.997	0.301
MF	1.086	0.997	0.326
CTCF	1.148	0.997	0.3444
SAM	1.077	0.997	0.323

3 讨论

研究微生物群落对不同碳源利用能力的差异,可深入了解微生物群落的功能变化。本研究 Biolog 数据表明各植被带土壤微生物群落利用单一碳源的能力不同,海拔最高的亚高山草甸土壤微生物群落利用单一碳源的能力最强,说明土壤微生物群落代谢活性最强,微生物群落功能多样性最强,而处于最低海拔处的荒漠草原的 AWCD 最小,说明土壤微生物群落碳代谢功能最弱。高海拔的亚高山草甸具有庞大、密实的根系,密集于土壤表层根系的分泌物和死亡的根是微生物丰富的能源物质,使得土壤微生物群落活性较高。

目前应用较广的丰富度、Shannon 指数和均匀度等参数,基本能代表土壤微生物群落多样性的特征^[9]。贺兰山 6 种典型植被带土壤微生物群落多样性指数沿着海拔梯度也表现出一定的差异性,随海拔增加微生物的种群多样性增加了,而且种群丰富度也增加了。这可能是由于植物群落类型初步决定了微生物群落的组成,植物物种组成及群落结构能明显地改变植物根际土壤微生物的群落结构和多样性,从而使其微生物群落

功能多样性出现相应变化^[14-15]。因此,地上植被类型对土壤微生物群落碳源利用类型多样性的影响较大,土壤微生物群落功能多样性是反映该土壤生态系统稳定性的重要指示因子。

此外,海拔高度的变化将改变植被组成、结构、土壤温度、水分、养分、有机质分解、微生物活性等一系列因子^[13],这些因子均能够显著影响土壤微生物群落的结构。本研究通过对不同海拔梯度 6 种典型植被带土壤进行磷酸脂肪酸生物标记的测定,发现不同海拔高度的 6 种典型植被带土壤所含的磷酸脂肪酸的种类和数量各不相同,海拔 2780 m 的寒温性针叶林(青海云杉为优势种)土壤微生物磷酸脂肪酸生物标记的数量和种类均最高,可能原因是:寒温性针叶林处于贺兰山西坡,湿润低温的环境,土壤枯落物层厚度为 5 cm,温性针叶林(油松林为优势种)枯落物层厚度为 3—4 cm,针阔混交林(油松、杜松、青海云杉、山杨为建群种)为 2—3 cm,其余样地则基本没有枯落物覆盖。因而青海云杉林较之其他植被带样地枯落物层较厚,枯落物可为土壤提供营养,导致植物和土壤微生物之间的协同进化,促进土壤微生物群落结构多样性。

多数研究表明,土壤微生物多样性与植物群落多样性呈正相关。Kennedy 等人^[16]利用 T-RFLP 技术对 7 种不同植被的土壤微生物研究后发现,植被差异可以显著影响土壤中微生物多样性和群落结构。对从北美到南美土壤细菌多样性的空间变异研究表明,土壤细菌群落的多样性和物种丰富度随地上生态系统类型的变化而变化^[3]。Zak 等^[17]研究结果表明微生物磷酸脂肪酸(PLFA)含量与植物种类数量相关性显著,随着植物物种数量的增加,土壤中细菌和放线菌的 PLFAs 数量下降,而真菌的 PLFAs 呈现上升趋势。但是 Johnson 等^[18]认为细菌多样性和植物多样性不相关,植物的功能型对细菌种群的影响更为强烈。Bryant 等人^[19]和 Noah 等人^[20-21]发现在海拔梯度上微生物与植物多样性的分布格局不同,Bryant 等人认为微生物多样性沿海拔梯度上升而增加,但是 Noah 等人发现细菌多样性没有显著的海拔梯度变化($r^2 < 0.17$, $P > 0.1$)。贺兰山植物多样性沿海波梯度的分布格局研究表明,在中海拔位置(海拔在 1900—2100 m 之间)生物多样性最高,物种多样性与生产力符合山地生态学中的“中部膨胀”理论^[7]。但是对贺兰山土壤微生物多样性研究表明:贺兰山土壤微生物多样性沿海拔梯度是增加的趋势,支持 Bryant 等人对微生物多样性分布格局的研究结论。这说明在高海拔地区有更多的适合该生境的微生物存在,对维持干旱风沙区的生态系统功能稳定性具有重要意义。

本研究利用 Biolog 和 FAMEs 法技术测定的多样性分布格局略有差异,一个重要原因是技术原理不同导致的,Biolog 需要在相同的环境下进行室内培养,没有环境梯度尤其是温度梯度的差异,而 FAMEs 法不需要对土壤微生物进行培养,可直接提取出原位土壤微生物群落的脂肪酸,但该方法的不足之处是其分析结果的准确性与微生物体内的磷脂脂肪酸是否提取完全、稳定以及实验过程是否造成污染等有很大关系。因此,完全揭示微生物多样性的分布格局,需结合其他技术才能更完全、更真实地反映微生物全貌。近年来分子生物学研究技术的快速发展,为揭示微生物群落结构和种群组成提供了利器,地下土壤微生物群落沿海拔梯度的变化及反馈机制,需综合运用分子生物学技术做进一步深入研究。

References:

- [1] Bell T, Newman J A, Silverman B W, Turner S L, Lilley A K. The contribution of species richness and composition to bacterial services. *Nature*, 2005, 436(7054): 1157-1160.
- [2] Liu B R, Jia G M, Chen J, Wang G. A review of methods for studying microbial diversity in soils. *Pedosphere*, 2006, 16(1): 18-24.
- [3] Fierer N, Jackson R B. The diversity and biogeography of soil bacterial communities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(3): 626-631.
- [4] Liu B R, Qu X N, Li Z G, Hu T H. The great significance and research issues on long-term located research of Helan Mountain forest ecosystem. *Ningxia Journal of Agriculture and Forest*, 2010, (1): 53-54, 28.
- [5] Liang C Z, Zhu Z Y, Wang W, Pei H, Zhang T, Wang Y L. The diversity and spatial distribution of plant communities in the Helan Mountains. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(3): 361-368.
- [6] Zhang J G, Zhang J G. Characteristics of vegetation diversity in Helan Mountain. *Arid Land Geography*, 2005, 28(4): 526-530.
- [7] Jiang Y, Kang M Y, Zhu Y, Xu G C, Liu Q R. Plant biodiversity patterns on Helan Mountain, China. *Acta Oecologica*, 2007, 32(2): 125-133.
- [8] Liu B R. Changes in soil microbial biomass carbon and nitrogen under typical plant communities along an altitudinal gradient in east side of Helan

- Mountain. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(4): 883-888.
- [9] Qin Y Y, Li J H, Wang G, Li W J. Effects of sowing legume species on functional diversity of soil microbial communities in abandoned fields. Journal of Lanzhou University: Natural Science, 2009, 45(3): 55-60.
- [10] Zhang S X, Chen F L, Zheng H. Response of soil microbial community structure to the leaf litter decomposition of three typical broadleaf species in mid-subtropical area, southern China. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(11): 3020-3026.
- [11] Chen H H, Zhang R, Zhang Y, Wang F, Gao L Y. Analysis of microbial community function diversity in gravel-mulched field. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(1): 51-55.
- [12] Guckert J B, Hood M A, White D C. Phospholipid ester-linked fatty acid profile changes during nutrient deprivation of *Vibrio cholerae*; increase in trans/cis ratio and proportions of cyclopropyl fatty acids. Applied and Environmental Microbiology, 1986, 52(4): 794-801.
- [13] Klose S, Acosta-Martínez V, Ajwa H A. Microbial community composition and enzyme activities in a sandy loam soil after fumigation with methyl bromide or alternative biocides. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(6): 1243-1254.
- [14] Zheng H, Chen F L, Ouyang Z Y, Fang Z G, Wang X K, Miao H. Utilization of different carbon sources types in biolog-GN microplates by soil microbial communities from four forest types. Environmental Science, 2007, 28(5): 1126-1130.
- [15] Kowalchuk G A, Buma D S, de Boer W, Klinkhamer P G L, van Veen J A. Effects of above-ground Plant species composition and diversity on the diversity of soil-borne microorganisms. Antonie van Leeuwenhoek, 2002, 81(1/4): 509-520.
- [16] Kennedy N, Brodie E, Connolly J, Clipson N. Impact of lime, nitrogen and plant species on bacterial community structure in grassland microcosms. Environmental Microbiology, 2004, 6(10): 1070-1080.
- [17] Zak D R, Holmes W E, White D C, Peacock A D, Tilman D. Plant diversity, soil microbial communities, and ecosystem function: are there any links? Ecology, 2003, 84(8): 2042-2050.
- [18] Johnson D, Booth R E, Whiteley A S, Bailey M J, Read D J, Grime J P, Leake J R. Plant community composition affects the biomass, activity and diversity of microorganisms in limestone grassland soil. European Journal of Soil Science, 2003, 54(4): 671-677.
- [19] Bryant J A, Lamanna C, Morlon H, Kerkhoff A J, Enquist B J, Green J L. Microbes on mountainsides: Contrasting elevational patterns of bacterial and plant diversity. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, 105(Supplement 1): 11505-11511.
- [20] Noah F, McCain C M, Meir P, Zimmermann M, Rapp J M, Silman M R, Knight R. Microbes do not follow the elevational diversity patterns of plants and animals. Ecology, 2011, 92(4): 797-804.
- [21] Collins H P, Cavigelli M A. Soil microbial community characteristics along an elevation gradient in the Laguna Mountains of Southern California. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(8): 1027-1037.

参考文献:

- [4] 刘秉儒, 璩向宁, 李志刚, 胡天华. 贺兰山森林生态系统长期定位研究的重大意义与研究内容. 宁夏农林科技, 2010, (2): 53-54, 28.
- [5] 梁存柱, 朱宗元, 王伟, 裴浩, 张韬, 王永利. 贺兰山植物群落类型多样性及其空间分异. 植物生态学报, 2004, 28(3): 361-368.
- [6] 郑敬刚, 张景光. 试论贺兰山植物多样性的若干特点. 干旱区地理, 2005, 28(4): 526-530.
- [8] 刘秉儒. 贺兰山东坡典型植物群落土壤微生物量碳、氮沿海拔梯度的变化特征. 生态环境学报, 2010, 19(4): 883-888.
- [9] 秦燕燕, 李金花, 王刚, 李文金. 添加豆科植物对弃耕地土壤微生物多样性的影响. 兰州大学学报: 自然科学版, 2009, 45(3): 55-60.
- [10] 张圣喜, 陈法霖, 郑华. 土壤微生物群落结构对中亚热带三种典型阔叶树种凋落物分解过程的响应. 生态学报, 2011, 31(11): 3020-3026.
- [11] 陈宏源, 张蓉, 张怡, 王芳, 高立原. 压砂地土壤微生物群落功能多样性分析. 土壤通报, 2011, 42(1): 51-55.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33, No.22 Nov., 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- The review of methods for mapping species spatial distribution using presence/absence data LIU Fang, LI Sheng, LI Diqiang (7047)
- A research review of landscape service LIU Wenping, YU Zhenrong (7058)
- Progress on techniques for partitioning soil respiration components and their application in cropland ecosystem CHEN Minpeng, XIA Xu, LI Yinkun, MEI Xurong (7067)

Autecology & Fundamentals

- Effect of different stubble height treatments on the annual growth index and physiological characteristics of *Tetraena mongolica* in two growing seasons WANG Zhen, ZHANG Liwen, YU Yi, et al (7078)
- Photosynthetic characteristics of an endangered species *Tetrameles nudiflora* under different light and water conditions DENG Yun, CHEN Hui, YANG Xiaofei, et al (7088)
- The compensation capacity of tillering and production of main stem nodes in rice WEI Ming, LI Dongxia (7098)
- Simulation of leaf area and dry matter production of tobacco leaves based on product of thermal effectiveness and photosynthetically active radiation ZHANG Mingda, LI Meng, HU Xueqiong, et al (7108)
- Effects of different tillage and straw systems on soil water-stable aggregate distribution and stability in the North China Plain TIAN Shenzhong, WANG Yu, LI Na, et al (7116)
- Effects of the *Larix gmelinii* grown under different light intensities on the development and defensive enzyme activities of *Lymantria dispar* larvae LU Yifang, YAN Junxin, LI Shuangwen, et al (7125)
- Biological control efficiency of *Orius similis* Zheng (Hemiptera: Anthocoridae) on *Frankliniella occidentalis* (Pergande) under different spatial and caged conditions MO Lifeng, ZHI Junrui, TIAN Tian (7132)
- Preliminary study on scavenging mechanism of dissolved aluminum by phytoplankton WANG Zhaowei, REN Jingling, YAN Li, et al (7140)
- Leaf-form characteristics of plants in *Quercus aquifolioides* community along an elevational gradient on the Balang Mountain in Wolong Nature Reserve, Sichuan, China LIU Xingliang, HE Fei, FAN Hua, et al (7148)
- Comparison of shrimp density between the Minjiang estuary and Xinhua bay during spring and summer XU Zhaoli, SUN Yue (7157)
- The feeding selectivity of an herbivorous amphipod *Ampithoe valida* on three dominant macroalgal species of Yundang Lagoon ZHENG Xinqing, HUANG Lingfeng, LI Yuanchao, et al (7166)

Population, Community and Ecosystem

- Effects of four different agricultural prevention and control measures on rice yellow stem borer *Tryporyza incertulas* (Walker) (Lepidoptera: Pyralidae) ZHANG Zhenfei, HUANG Bingchao, XIAO Hanxiang, et al (7173)
- Soil nitrogen concentrations and transformations under different vegetation types in forested zones of the Loess Gully Region XING Xiaoyi, HUANG Yimei, AN Shaoshan, et al (7181)
- Ecosystem health assessment based on diagnosis CAI Xia, XU Songjun, CHEN Shanhao, et al (7190)
- The production and accumulation of phytoliths in rice ecosystems: a case study to Jiaxing Paddy Field LI Zimin, SONG Zhaoliang, JIANG Peikun (7197)
- Application of a free search-based projection pursuit model in investigating reed in wetlands LI Xinhua, ZHAO Chengyi (7204)

- Soil microbial diversity under typical vegetation zones along an elevation gradient in Helan Mountains LIU Bingru, ZHANG Xiuzhen, HU Tianhua, et al (7211)
- Effects of shrub encroachment on biomass and biodiversity in the typical steppe of Inner Mongolia PENG Haiying, LI Xiaoyan, TONG Shaoyu (7221)
- Research on diaspore morphology and species distribution of 80 plants in the hill-gully Loess Plateau WANG Dongli, ZHANG Xiaoyan, JIAO Juying, et al (7230)
- Habitat suitability assessment of blue sheep in Helan Mountain based on MAXENT modeling LIU Zhensheng, GAO Hui, TENG Liwei, et al (7243)
- Characteristic of phytoplankton primary productivity and influencing factors in littoral zone of Lake Taihu CAI Linlin, ZHU Guangwei, LI Xiangyang (7250)
- Landscape, Regional and Global Ecology**
- Responses of soil respiration to changes in depth of seasonal frozen soil in Ebinur Lake area, arid area of Northwest China QIN Lu, LV Guanghui, HE Xuemin, et al (7259)
- Seasonal and annual variation characteristic in basal soil respiration of black loam under the condition of farmland field ZHANG Yanjun, GUO Shengli, LIU Qingfang, et al (7270)
- Resource and Industrial Ecology**
- Economic evaluation and protection of *Amygdalus mira* genetic resource ZHANG Lirong, MENG Rui, LU Guobin (7277)
- Meteorological grading indexes of water-saving irrigation for cotton XIAO Jingjing, HUO Zhiguo, YAO Yiping, et al (7288)
- Research Notes**
- Sprouts characteristic structure of *Taxus yunnanensis* plantation SU Lei, SU Jianrong, LIU Wande, et al (7300)
- The effects of forest conversion on soil N mineralization and its availability in central jiangxi subtropical region SONG Qingni, YANG Qingpei, YU Dingkun, et al (7309)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 杨志峰

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 22 期 (2013 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 22 (November, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元