

猫儿山自然保护区沿海拔分布植被带土壤硝化-反硝化和呼吸作用分析

邓小军¹,唐 健¹,王会利¹,宋贤冲¹,曹继钊¹,覃祚玉¹,宋光桃^{2*}

(1. 广西壮族自治区林业科学研究院,国家林业局中南速生材繁育实验室,广西优良用材林资源培育重点实验室,广西 南宁 530003, 2. 湖南环境生物职业技术学院,湖南 衡阳 421005)

摘要:【目的】揭示环境因子对猫儿山自然保护区不同海拔植被带土壤呼吸和硝化-反硝化作用的影响。【方法】以广西猫儿山自然保护区不同植被带为研究对象,应用气压过程分离系统 BaPS (barometric process separation system) 研究了不同海拔植被带的土壤呼吸速率 (SRR, soil respiration rate)、总硝化速率 (GNR, gross nitrification rate)、反硝化速率 (DR, denitrification rate), 及其对土壤温度等环境因子的响应规律。【结果】在自然土壤温度下,土壤呼吸速率杉木人工林 (Chinese fir plantation, CFP) > 常绿、落叶阔叶混交林 (evergreen and deciduous broad-leaved forest, EDBF) > 毛竹人工林 (bamboo plantation, BP) > 山顶灌丛 (mountaintop shrub, MS) > 南方铁杉林 (southern hemlock forest, SHF) > 水青冈天然林 (beech natural forest, BNF), CFP 最高为 361.6 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$; 总硝化速率 SHF 最高为 275.3 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$, BP 最低为 58.3 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$; 反硝化速率为 BP > CFP > EDBF > BNF > SHF > MS, BP 最高为 172.2 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$ 。土壤温度在 5~20 $^{\circ}\text{C}$ 变化时,6 种植被带的土壤呼吸速率、总硝化速率、反硝化速率均随着温度的上升而增加。相关性分析表明,海拔、土壤温度、含水量、pH、有机质、全氮、全钾、速效氮磷钾是影响土壤硝化-反硝化和呼吸作用的重要因子。【结论】低海拔人工林在自然温度下具有比高海拔天然林更高的土壤呼吸速率和反硝化速率,但是高海拔植被带土壤硝化-反硝化和呼吸作用对温度变化具有更高的敏感性,在气候变暖过程中,高海拔植被带土壤可能会释放更多的温室气体增量。

关键词:土壤呼吸速率;总硝化速率;反硝化速率;海拔垂直植被带;猫儿山

中图分类号:S714 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2006(2020)01-0081-08



Soil nitrification denitrification respiration and their influence factor analysis in different vegetation zones along elevational gradient in Mao'er Mountain of China

DENG Xiaojun¹, TANG Jian¹, WANG Huili¹, SONG Xianchong¹, CAO Jizhao, QING Zuoyu¹, SONG Guangtao^{2*}

(1. Guangxi Zhuang Autonomous Region Forestry Research Institute, Key Laboratory of Central South Fast-Growing Timber Cultivation of Forestry Ministry of China, Guangxi Key Laboratory of Superior Timber Trees Resource Cultivation, Nanning 530003, China; 2. Hunan Environment-Biologic Polytechnic, Hengyang 421005, China)

Abstract: 【Objective】To study the effects of soil respiration, nitrification, and denitrification and the influence of various environmental factors in vegetation zones at different altitudes in the Mao'er Mountain. 【Method】Different forest types at a National Nature Reserve in Mao'er Mountain were the experimental sites. Soil respiration rate (SRR), gross nitrification rate (GNR) and denitrification rate (DR) in different vegetation zones at different altitudes were investigated based on the Barometric Process Separation system, and the response of SRR, GNR or DR to soil tempera-

收稿日期:2018-08-15 修回日期:2019-10-22
基金项目:广西优良用材林资源培育重点实验室项目(2019-A-04-02, 17-A-02-01);广西创新驱动发展专项资金项目(桂科AA17204087-11);广西科技基地和人才专项项目(桂科AD17129051);广西林业科技项目(桂林科研[2015]40号);广西林科院基金项目(林科201807)。
第一作者:邓小军(dengxiaojun2008@sina.com),高级工程师,ORCID(0000-0002-6678-494X)。*通信作者:宋光桃(823769006@qq.com),教授,ORCID(0000-0002-1670-194X)。
引文格式:邓小军,唐健,王会利,等. 猫儿山自然保护区沿海拔分布植被带土壤硝化-反硝化和呼吸作用分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2020,44(1):81-88. DENG X J, TANG J, WANG H L, et al. Soil nitrification denitrification respiration and their influence factor analysis in different vegetation zones along elevational gradient in Mao'er Mountain of China[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2020, 44(1): 81-88. DOI:10.3969/j.issn.1000-2006.201808031.

ture and other environmental factors was studied. 【Result】Under normal temperature, the SRR was in the order of Chinese fir plantation (CFP) > evergreen and deciduous broad-leaved forest (EDBF) > bamboo plantation (BP) > mountaintop shrub (MS) > (Southern hemlock forest (SHF) > Beech natural forest (BNF), and the highest rate was $361.6 \mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$ at CPF. The GNR in the SHF was $275.3 \mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$, and the lowest GNR was $58.3 \mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$ in the BP. In addition, the DRs were in the order BP>CFP>EDBF>BNF>SHF>MS, and the highest was $172.2 \mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$ at BP. SRR, GNR and DR in the six vegetation zones increased with an increase of temperature when the temperature was between 5°C and 20°C . Correlation analysis results revealed that altitude, soil temperature, water content, pH, organic matter concentration, total nitrogen, total potassium, available N, available P and available K were the key factors influencing SRR, GNR and DR. 【Conclusion】Low altitude plantations had higher SRRs and DRs than high altitude natural forests. However, soil nitrification, denitrification and respiration were more sensitive to temperature changes in high altitude vegetation. In the wake of climate change and the ensuing warming, soils in high altitude vegetation zones could release higher amounts of greenhouse gases.

Keywords: soil respiration rate; gross nitrification rate; denitrification rate; vertical vegetation zone; Mao'er Mountain

森林土壤是森林生态系统中氮素、碳素的主要蓄积库^[1-2],其氮素储量超过森林生态系统氮量的85%^[3],碳素储量占全球土壤有机碳的73%^[4];森林土壤为森林的存在和发展提供养分元素^[5]的同时承担着碳氮元素转化循环的功能。随着经济飞速发展和人类活动的加剧,全球气候变化背景下的土壤生态响应已成为全世界各个领域学者所关注的焦点问题。土壤硝化-反硝化和呼吸作用是陆地生态系统碳氮循环的重要途径,它们产生的 CO_2 和 N_2O 都是主要的温室气体,且森林土壤单位面积 CO_2 排放量一般高于农田土壤和草甸土壤。因此,森林土壤呼吸、硝化作用、反硝化作用研究成为了陆地生态系统碳氮循环的研究热点^[6]。

近些年来,国内外一些学者对我国不同区域土壤碳氮转化速率做了大量的研究:施政等^[7]研究了武夷山4种不同海拔植被带土壤呼吸速率对温度的敏感性,认为高海拔植被带土壤呼吸速率相对于低海拔更加敏感;苗方琴等^[8]研究表明油松天然林土壤含水量、土壤温度是影响土壤碳氮转化速率的关键因子;高文栋等^[9]对海南岛吊罗山青皮林土壤的硝化-反硝化作用及其影响因素进行了探讨,认为季节变化是影响土壤氮素转化的重要因素;孙志高等^[10]研究了三江平原典型小叶章湿地土壤 N_2O 排放速率及反硝化速率与环境因子的关系,认为积水条件是影响土壤 N_2O 排放速率和反硝化速率的重要因素。在华南第一高峰猫儿山,目前还没有做过森林土壤碳氮转化速率及其影响因子的类似研究,尤其是沿海拔梯度不同植被带土壤的硝化-反硝化和呼吸作用及其对温度变化响应的研究。BaPS (barometric process separation system)是测定土壤总硝化速率、反硝化速率和呼吸速率的仪器,刘巧辉等^[11]验证了应用BaPS系统

和气相色谱仪的测定结果具有一致性,该系统已在农田^[12]、旱地^[13-14]、荒漠^[15]、草地^[16]、森林^[8]土壤的碳氮循环研究中得到广泛应用。本研究以猫儿山国家级自然保护区分布在不同海拔的6种主要植被带为对象,采用BaPS系统对不同植被带的土壤呼吸速率、总硝化速率、反硝化速率进行测定,旨在揭示华南地区森林生态系统中土壤硝化-反硝化和呼吸作用的主要境因子及其对土壤温度因子变化的响应规律。其结果对了解华南地区不同森林类型土壤微生物碳氮转化特征具有重要意义,同时也为华南地区人工林地氮素营养管理提供参考。

1 研究区概况

研究区位于广西桂林市猫儿山国家级自然保护区($110^\circ20'\sim110^\circ35'\text{E}$, $25^\circ48'\sim25^\circ58'\text{N}$)。猫儿山是华南地区最高峰,以其优越的自然地理环境,丰富的地貌类型和生物资源,人为干扰少及完好的原生状态,为研究华南地区不同海拔植被带土壤碳氮转化速率提供了非常适合的研究区域^[17]。猫儿山主峰海拔2 141.5 m,属于中亚热带季风气候,同时受海拔、山地地形等地理环境因子影响,表现出明显的亚热带山地气候特征。年均气温 12.8°C ,年均相对湿度92%,多年均降水量为2 509.1 mm,降水主要发生在5—6月^[18]。猫儿山是广西主要的水源林区之一,涵养水源丰富,地表水系发达,是漓江、浔江、资江的发源地,连接着长江、珠江两大水系。猫儿山植被垂直分布带变化明显,沿海拔植被带依次为毛竹人工林、常绿阔叶林、常绿落叶阔叶混交林、针叶阔叶混交林、高山矮林和山顶灌丛等^[19]。主要地貌类型为中山区侵蚀剥蚀地貌,地带性土壤以山地红黄壤为主,成土母岩以花岗岩为主。

2 材料与方法

2.1 样地设置和样品采集

在猫儿山国家自然保护区按照国家林业行业标准 LY/T 1952—2011^[20] 设定不同植被带定位观测标准样地,记录其海拔、经纬度、坡度等并调查植物属种,样地特征见表 1。于 2015 年 3 月在不同

植被带样地分别选取 5 个 1 m×1 m 样方,并设定土壤温度计测量 0~5 cm 土层温度。在每个样方去除枯枝落叶层采用“S”形取样法采集 5 点 0~5 cm 土壤混合样品,并用 BaPS 系统的环刀采集 5 个 0~5 cm 土层土壤环刀样品。每个样方带回 1 kg 土壤混合样品在室内晾干,测定 pH、有机质、全氮、全磷、全钾,速效氮、速效磷、速效钾含量等指标。

表 1 猫儿山不同植被带样地特征
Table 1 Characteristic of sample area in different vegetation zones of Mao'er Mountain

植被带 vegetation zones	海拔/m elevation	土壤类型 soil type	坡度/ (°) slope	坡向/ (°) slope aspect	郁闭度 canopy density	土壤温度/℃ soil temperature	地理坐标 geographic coordinate	主要树种组成 dominant species in tree layer
杉木人工林(CFP) Chinese fir plantation	1 130	山地黄红壤	5	NE 61	0.85	11.48	110°29'13"E, 25°53'15"N	杉木(<i>Cunninghamia lanceo- lata</i>)、青窄槭(<i>Acer davidii</i>)、 光皮桉(<i>Swida wilsoniana</i>)等
毛竹人工林(BP) bamboo plantation	1 144	山地黄红壤	2	NE 49	0.80	12.00	110°29'17"E, 25°54'21"N	毛竹(<i>Phyllostachys heterocy- cla</i>)、交让木(<i>Daphniphyllum macropodum</i>)、团叶杜鹃 (<i>Rhododendron orbiculare</i>)等
常绿、落叶阔叶 混交林(EDBF) evergreen and deciduous broad-leaved forest	1 222	山地黄壤	42	NE 50	0.80	10.52	110°29'27"E, 25°53'15"N	罗浮栲(<i>Castanopsis fabri</i>)、钩 栗(<i>Castanopsis tibetana</i>)、白辛 树(<i>Pterostyrax psilophyllus</i>)等
水青冈天然林(BNF) beech natural forest	1 385	山地黄壤	35	SE 135	0.75	9.58	110°27'54"E, 25°54'21"N	长柄水青冈(<i>Fagus longipeti- olata</i>)、摆竹(<i>Indosasa shiba- taeoides</i>)、团叶杜鹃等
南方铁杉林(SHF) southern hemlock forest	2 042	泥炭土	2	0	0.70	7.46	110°26'01"E, 25°53'48"N	南方铁杉(<i>Tsuga chinensis</i>)、 曼 桉 (<i>Cyclobalanopsis oxyo- don</i>)、丁 香 杜 鹃 (<i>Rhododendron farrerae</i>)等
山顶灌丛(MS) mountaintop shrub	2 045	山地黄棕壤	12	NE 62	0.90	8.04	110°24'45"E, 25°51'58"N	豪猪刺(<i>Berberis julianae</i>)、 三花冬青(<i>Ilex triflora</i>)、灯笼 树(<i>Enkianthus chinensis</i>)等

2.2 样品分析

2.2.1 土壤理化性质分析

土壤理化性质均参照《土壤农业化学分析方法》测定^[21]。

2.2.2 BaPS 系统测定方法

取每个样方 5 个重复的土壤环刀样品置于 BaPS 系统的培养器中,调整系统恒温至待测温度,检测培养器的气密性。参数环刀数量(soil columns)选择 5×100 mL 环刀土样(5×soil sampling rings with 100 mL),温度变异范围(temperature variation)均选择 0.5 K,土壤含水量、干质量、pH 等土壤因子参数等均根据样品测定数据设定。 N_xO_y 系数设定为 2.333,自养/异养硝化系数 (aut/het coefficient) 设定为 0.750,溶解气体的误差 (deviation error of dissolved gases) ΔCO_2 、 ΔO_2 分

别设定为 4.0% 和 8.0%。设定好各项参数后,测定不同植被带土壤自然温度和 5、10、15、20 ℃ 下的土壤呼吸速率、总硝化速率、反硝化速率。对于不能立即分析的土壤样品放入 0~4 ℃ 冰箱保存,120 d 内测定完毕。

2.3 数据处理

采用 SPSS 17.0 进行数据处理与分析。运用单因素方差分析(One-way ANOVA)对不同植被带土壤总硝化速率、反硝化速率及土壤呼吸速率差异性进行分析,运用一元线性回归分析、相关性分析对土壤呼吸速率、总硝化速率、反硝化速率、土壤含水量、pH、有机质、全氮含量等因子的关系进行分析。

3 结果与分析

3.1 不同植被带土壤理化性质

沿海拔分布的6种植被带土壤性质见表2。不同植被带土壤pH为3.40~4.94,表现为BP>CFP>EDBF>BNF>MS>SHF,随着海拔的上升各植被带土壤pH呈递减趋势。不同海拔植被带土壤有机质含量为73.65~707.61 g/kg,全氮含量为4.08~21.11 g/kg,速效氮含量为366.28~1 830.20 mg/kg,速效磷含量为1.23~7.37 mg/kg,速效钾含量为41.80~233.80 mg/kg,它们随着海拔的升高呈现增加趋势。不同植被带土壤质量含水量为43.15%~276.08%,随着海拔的上升呈现增加趋

势。SHF的有机质含量较高,但碳氮含量比(C/N)比较低,而BP的有机质含量较低,但其C/N却较高。猫儿山植被茂密,凋落物丰富,海拔高,长期低温等条件为土壤有机质的累积提供了有利条件。不同植被带中,由于SHF南方铁杉林是一个由8个相对高度50~100 m山峰所围成的一个低洼盆地,从而形成了一个特殊环境^[19],这里气候湿润,低温,冬季寒冷持续时间长,微生物活动弱,有机质得不到分解,长期积水造成嫌气环境,发生泥炭化作用和土层下部的潜育作用形成泥炭土,除与成土母质相关的全磷、全钾外,SHF的有机质、全氮、速效氮、速效磷、速效钾含量均高于其他植被带土壤。

表2 不同植被带样地土壤理化性质

Table 2 Soil physic-chemistry characteristics in different vegetation zones of Mao'er Mountain

植被带 vegetation zones	pH	有机质含量/ (g·kg ⁻¹) organic matter content	全氮含量/ (g·kg ⁻¹) total N content	全磷含量 (P ₂ O ₅) / (g·kg ⁻¹) total P content	全钾含量 (K ₂ O) / (g·kg ⁻¹) total K content	速效氮含量/ (mg·kg ⁻¹) available N content	速效磷含量/ (mg·kg ⁻¹) available P content	速效钾含量/ (mg·kg ⁻¹) available K content	质量含水量/% moisture content	碳氮比 C/N
CFP	4.44±0.19 c	109.21±15.91 ab	4.68±0.62 ab	2.38±0.25 b	32.48±0.95 c	366.50±40.18 a	2.93±0.64 a	66.37±2.29 a	55.22±7.86 ab	13.53±0.23 c
BP	4.94±0.10 d	103.27±17.69 ab	4.08±0.31 a	1.96±0.13 a	26.70±7.38 bc	366.28±149.31 a	1.23±1.03 a	41.80±9.00 a	43.15±3.11 a	14.64±1.66 c
EDBF	4.10±0.02 b	149.39±35.63 b	6.40±1.62 b	2.00±0.30 a	23.66±2.78 b	631.33±176.80 b	3.10±0.98 a	78.07±9.50 a	63.02±14.81 ab	13.57±0.38 c
BNF	3.92±0.16 b	73.65±9.03 a	5.23±0.49 ab	1.94±0.10 a	30.32±0.28 bc	365.07±85.87 a	1.20±0.17 a	114.07±18.03 ab	77.57±11.40 ab	8.16±0.56 a
SHF	3.40±0.06 a	707.61±51.83 d	21.11±0.81 d	1.77±0.08 a	8.62±3.39 a	1830.20±82.82 d	7.37±3.18 b	233.80±83.86 c	276.08±67.20 c	19.47±1.90 d
MS	3.51±0.10 a	244.81±45.17 c	12.94±1.25 c	1.76±0.15 a	25.82±0.44 bc	974.27±147.72 c	3.70±2.61 a	152.50±32.44 b	109.52±1.53 b	10.98±1.72 b

注:数据为均值±标准差,n=5。同一列数据中不同字母表示不同植被类型差异显著(P<0.05)。下同。The value is “mean±SD”, n=5. Different letters within the same columns indicated significant difference at 0.05 level. The same below.

3.2 不同植被带土壤的呼吸速率、总硝化速率和反硝化速率

不同植被带土壤在3月土壤自然温度下的土壤呼吸速率、总硝化速率、反硝化速率具有明显的差异(图1)。6种植被带土壤呼吸速率CFP>EDBF>BP>MS>SHF>BNF为208.1~361.6 μg/(kg·h)(以碳表示,下同)之间变化,其中CFP

的土壤呼吸速率最高为361.6 μg/(kg·h),BNF最低为208.1 μg/(kg·h)。土壤总硝化速率BP最低为58.3 μg/(kg·h)(以氮表示,下同),SHF土壤总硝化速率最高为275.3 μg/(kg·h)。不同植被带土壤反硝化速率BP>CFP>EDBF>BNF>SHF>MS,随着海拔的升高呈现递减趋势,MS土壤反硝化速率最低为93.80 μg/(kg·h)(以氮表示,下同)。结果表明,猫儿山低海拔的人工林CFP、BP相对于天然林具有更高的呼吸速率和反硝化速率。

3.3 不同植被带土壤呼吸速率、总硝化速率和反硝化速率对模拟土壤温度变化的响应

土壤呼吸速率随温度变化规律见图2,不同植被带土壤呼吸速率、总硝化速率、反硝化速率均随着温度的上升呈现递增趋势。5℃时土壤呼吸速率CFP最高为223.9 μg/(kg·h),BNF最低为101.5 μg/(kg·h)。20℃时土壤呼吸速率则为MS最高达到898.5 μg/(kg·h),BP最低为453.8 μg/(kg·h)。在5~20℃下总硝化速率SHF均最高241.8~473.4 μg/(kg·h),BP总硝化速率均最低为11.6~58.3 μg/(kg·h)之间,MS则有较大的变化,5℃时总硝化速率为61.3 μg/(kg·h),当温

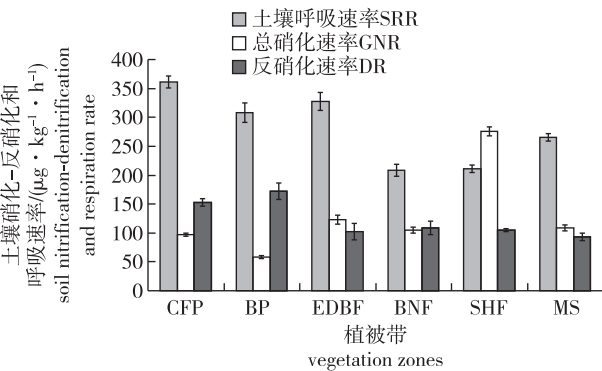


图1 猫儿山不同植被带土壤呼吸速率、总硝化速率和反硝化速率
Fig.1 Soil respiration rate, gross nitrification rate and denitrification rate in different vegetation zones of Mao'er Mountain

度上升至 20 ℃ 总硝化速率较大幅度的上升至 438.3 μg/(kg·h)。5 ℃ 下反硝化速率 BP 最高为 114.0 μg/(kg·h),MS 最低仅为 3.9 μg/(kg·h)。20 ℃ 时,高海拔的 SHF 反硝化速率最高为 471.0 μg/(kg·h),EDBF 最低为 156.4 μg/(kg·h)。同在低温(5 ℃)下低海拔植被带土壤比高海拔植被带土壤具有更高的土壤呼吸速率和反硝化速率,高

温(20 ℃)下高海拔植被带土壤则比低海拔下植被带具有更高的土壤呼吸速率、总硝化速率和反硝化速率。因此,从变化趋势来看,高海拔植被带的土壤随着温度的升高,土壤呼吸速率、总硝化速率、反硝化速率增加得更快,即高海拔植被带土壤的呼吸速率、总硝化速率、反硝化速率对温度具有更高的敏感性。

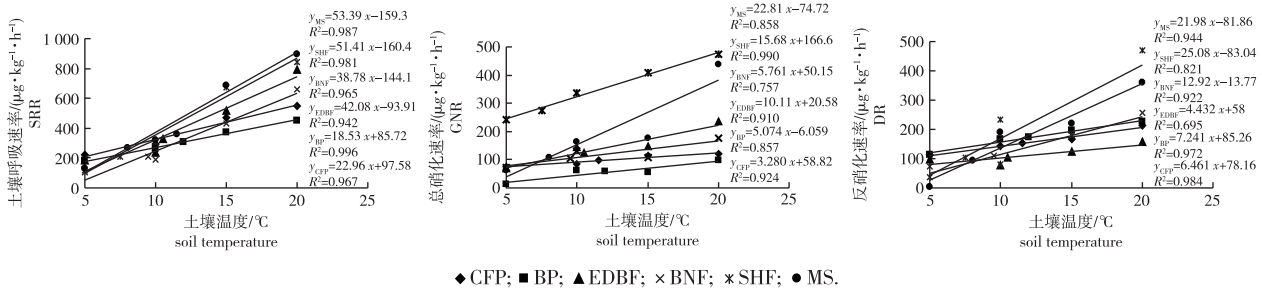


图 2 不同植被带土壤呼吸速率、硝化-反硝化速率随温度的变化趋势

Fig.2 Changes of soil respiration rate, gross nitrification rate and denitrification rate with soil temperature in different vegetation zones of Mao'er Mountain

3.4 不同植被带土壤呼吸速率、总硝化速率、反硝化速率与土壤环境因子相关性

猫儿山自然保护区不同植被带土壤有机质与全氮、速效氮、速效磷、速效钾含量极显著正相关($P<0.01$)(表 3),与全钾含量极显著负相关($P<0.01$),说明凋落物在养分循环和平衡中具有重要

作用。同时土壤有机质与含水量、海拔极显著正相关($P<0.01$),与土壤温度极显著负相关($P<0.01$)。土壤全量氮与速效氮、速效磷、速效钾含量极显著正相关($P<0.01$),与含水量、海拔极显著正相关($P<0.01$),与土壤温度极显著负相关($P<0.01$)。

表 3 猫儿山自然保护区森林土壤呼吸速率、总硝化速率、反硝化速率和土壤理化因子及海拔的相关性

Table 3 Correlation analysis of soil respiration rate, gross nitrification rate, denitrification rate, soil physic-chemistry characteristics and elevation

项目 item	pH	有机质 organic matter	全氮 total N	全磷 (P ₂ O ₅) total P	全钾 (K ₂ O) total K	速效氮 available N	速效磷 available P	速效钾 available K	含水量 moisture content	碳氮比 C/N	海拔 elevation	土壤 温度 soil temperature	土壤呼吸 速率 SRR	总硝化 速率 GNR	反硝化 速率 DR
pH	1														
有机质	-0.650 **	1													
全量氮	-0.788 **	0.954 **	1												
全量磷	0.483 *	-0.395	-0.472 *	1											
全量钾	0.531 *	-0.891 **	-0.824 **	0.467	1										
速效氮	-0.731 **	0.973 **	0.983 **	-0.433	-0.871 **	1									
速效磷	-0.544 *	0.779 **	0.795 **	-0.064	-0.662 **	0.820 **	1								
速效钾	-0.771 **	0.799 **	0.877 **	-0.386	-0.683 **	0.853 **	0.822 **	1							
含水量	-0.697 **	0.950 **	0.912 **	-0.479 *	-0.857 **	0.916 **	0.666 **	0.834 **	1						
C/N	-0.082	0.755 **	0.567 *	-0.086	-0.740 **	0.663 **	0.580 *	0.323	0.629 **	1					
海拔	-0.841 **	0.777 **	0.910 **	-0.601 **	-0.670 **	0.865 **	0.647 **	0.788 **	0.749 **	0.339	1				
温度	0.955 **	-0.727 **	-0.866 **	0.601 **	0.607 **	-0.806 **	-0.580 *	-0.854 **	-0.771 **	-0.137	-0.912 **	1			
SRR	-0.852 **	0.698 **	0.836 **	-0.359	-0.512 *	0.779 **	0.659 **	0.740 **	0.678 **	0.276	-0.890 **	0.555 *	1		
GNR	-0.890 **	0.801 **	0.926 **	-0.591 **	-0.698 **	0.886 **	0.672 **	0.821 **	0.784 **	0.338	0.964 **	-0.760 **	0.923 **	1	
DR	-0.821 **	0.897 **	0.977 **	-0.589 *	-0.774 **	0.940 **	0.708 **	0.857 **	0.875 **	0.468 *	-0.963 **	0.850 **	0.868 **	0.965 **	1

注: **.在置信度(双侧)为 0.01 时,相关性是显著的 correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed). *.在置信度(双侧)为 0.05 时,相关性是显著的 correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

由表 3 还可知,土壤呼吸速率(SRR)与有机质、全氮、速效氮、速效磷、速效钾、含水量极显著正相关($P<0.01$),与土壤温度显著正相关($P<0.05$),与 pH、海拔极显著负相关($P<0.01$)。总硝

化速率(GNR)与有机质、全氮、速效氮、速效磷、速效钾、含水量、海拔极显著正相关($P<0.01$),与pH、全磷、全钾、土壤温度极显著负相关($P<0.01$)。反硝化速率(DR)与有机质、全氮、速效氮、速效磷、速效钾、含水量、土壤温度、极显著正相关($P<0.01$),与pH、全磷、全钾、海拔极显著负相关($P<0.01$)。

4 讨论

4.1 不同植被带土壤理化性质差异

猫儿山自然保护区沿海拔分布的不同植被带土壤有机质、全氮及速效养分的累积随着海拔的升高呈递增趋势。这是由于不同植被带土壤随着海拔的升高,温度降低,土壤微生物活性减弱,土壤有机质累积不断增加,速效养分累积不断增加。同时天然林相对于人工林其有机质含量和速效养分含量高,这说明天然林养分归还要强于人工林,也与不同森林类型生态系统复杂程度及人为干扰情况有关^[17]。也有一些学者认为^[22-23],针阔叶混交林森林生态系统的生态位重叠比较低,能提高养分的循环效率,有利于土壤养分的积累。

4.2 不同海拔植被带土壤碳氮转化速率影响因素

大气CO₂浓度升高导致温室效应,而土壤呼吸则是土壤碳的主要输出途径和大气CO₂主要来源之一^[7,24-25]。在自然温度下,CFP土壤呼吸速率最高为361.6 μg/(kg·h),BNF最低为208.1 μg/(kg·h)。不同植被带土壤呼吸速率沿着海拔的升高而降低,随着温度升高而升高,同时随着土壤含水量增加而降低,这与施政等^[7]的研究结论一致。

不同植被带BP土壤总硝化速率最低为58.3 μg/(kg·h),SHF土壤总硝化速率最高为275.3 μg/(kg·h),土壤反硝化速率BP最高为172.2 μg/(kg·h),MS最低为93.8 μg/(kg·h)。相关研究认为^[26-29]大部分微生物只能在厌氧环境下进行反硝化反应,氧气对反硝化酶的合成与活性有显著影响,而土壤中水、气是互相消长的,土壤含水量与O₂呈负相关^[30]。SHF土壤主要为泥炭土,其高有机质、高含水量是其反硝化速率的主要有利因素,土壤低温则是其反硝化速率的主要限制因子。在自然温度下低海拔的人工林相对于高海拔的天然林具有更高的土壤呼吸速率和反硝化速率。

4.3 不同植被带土壤硝化-反硝化和呼吸作用对温度的敏感性

不同植被带随着海拔的升高,温度降低,其土壤呼吸速率和反硝化速率降低。笔者研究发现,模

拟土壤温度在5~20℃范围变化时,高海拔植被带土壤随着温度的增加,其土壤硝化-反硝化和呼吸速率增加得更快,当温度达到20℃时,SHF土壤反硝化速率最大为471.0 μg/(kg·h),低温是常年积水SHF土壤反硝化作用的限制因子。这也说明,虽然在自然温度下低海拔的人工林土壤具有更高的土壤呼吸速率和反硝化速率,但是高海拔植被带土壤的碳氮转化速率对温度敏感性更强。有相关研究表明^[31-33],低温地区土壤微生物对温度的敏感性更高,从而导致高海拔地区土壤呼吸对温度的敏感性高,北方比南方地区的土壤呼吸温度反应系数高。Shaw等^[34]在野外原位加热实验显示在干燥土壤环境中微生物活性对温度响应较弱。高海拔森林类型土壤由于潮湿寒冷环境下长年累月积累了庞大有机质碳库和氮素,当环境发生转变,土壤温度上升,土壤微生物活化,将在土壤呼吸速率、硝化-反硝化速率上形成正反馈效应^[35]。施政等^[7]研究也认为在全球气候变化过程中,高海拔森林类型的土壤将释放出更多的CO₂。

森林土壤的碳氮转化是一个非常复杂的生态过程^[36],受各种生物、非生物因子的综合影响,笔者认为由海拔引起的土壤温度、含水量、有机质含量等因子差异是影响猫儿山自然保护区森林土壤碳氮转化速率的重要因素。同时,土壤微生物群落与土壤温度、有机质、含水量等因子是互相联系在一起,它们之间也相互影响^[37-38]。本研究对于猫儿山自然保护区沿海拔分布的不同植被带土壤的硝化-反硝化和呼吸作用及其影响因素进行了研究,关于各个因子究竟如何影响土壤呼吸、硝化-反硝化速率,需要进一步深入研究不同植被带土壤微生物群落多样性特征,研究其土壤微生态及土壤氧化还原过程。另外,虽然BaPS系统在国内外一定范围内得到了应用,也有学者对该系统提出了质疑,尤其是参数的设定和后期曲线拟合方面存在不确定性和随机性。

参考文献(reference):

- [1] 于辉,陈燕,张欢,等.添加无机氮对山西太岳山油松林土壤氮素及温室气体通量的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2019,43(3):85-91. YU H, CHEN Y, ZHANG H, et al. The effect of inorganic nitrogen addition on soil nitrogen and greenhouse gas flux for the *Pinus tabulaeformis* forest in Taiyue Mountain, Shanxi Province[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2019, 43(3): 85-91. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.201805047.
- [2] 孙宝玉,韩广轩.模拟增温对土壤呼吸影响机制的研究进展与展望[J].应用生态学报,2016,27(10):3394-3402. SUN

- B Y, HAN G X. Research and prospects for response mechanisms of soil respiration to experimental warming[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(10): 3394-3402. DOI: 10.13287/j.1001-9332.201610.037.
- [3] 白日军, 杨治平, 张强, 等. 晋西北不同年限小叶锦鸡儿灌丛土壤氮矿化和硝化作用[J]. 生态学报, 2016, 36(24): 8008-8014. BAI R J, YANG Z P, ZHANG Q, et al. Soil nitrogen mineralization and nitrification under *Caragana microphylla* shrubs of different ages in the northwestern Shanxi Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(24): 8008-8014. DOI: 10.5846/stxb201506101175.
- [4] 赵吉霞, 王邵军, 陈奇伯, 等. 滇中高原云南松幼林和成熟林土壤呼吸及主要影响因子分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2014, 38(3): 71-76. ZHAO J X, WANG S J, CHEN Q B, et al. Soil respiration and its affecting factors in young and mature forests of *Pinus yunnanensis* in middle Yunnan Plateau, China[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2014, 38(3): 71-76. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2014.03.014.
- [5] 邓小军, 陈晓龙, 唐健, 等. 基于 Nemerow 法的森林土壤肥力综合指数评价[J]. 草业学报, 2016, 25(7): 34-41. DENG X J, CHEN X L, TANG J, et al. Assessment of forest soil fertility using an integrated index based on the Nemerow method[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(7): 34-41. DOI: 10.11686/cyxb2015435.
- [6] HANSON P J, EDWARDS N T, GARTEN C T, et al. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration; a review of methods and observations[J]. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 115-146. DOI: 10.1023/a:1006244819642.
- [7] 施政, 汪家社, 何容, 等. 武夷山不同海拔植被土壤呼吸季节变化及对温度的敏感性[J]. 应用生态学报, 2008, 19(11): 2357-2363. SHI Z, WANG J S, HE R, et al. Seasonal variation and temperature sensitivity of soil respiration under different plant communities along an elevation gradient in Wuyi Mountains of China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(11): 2357-2363. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2008.0414.
- [8] 苗方琴, 汪金松, 孙继超, 等. 太岳山油松天然林不同土层的碳氮转化速率[J]. 应用与环境生物学报, 2010, 16(4): 519-522. MIAO F Q, WANG J S, SUN J C, et al. Conversion rate of soil carbon and nitrogen in natural *Pinus tabulaeformis* forest on the Taiyue Mountains, China[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2010, 16(4): 519-522. DOI: 10.3724/SP.J.1145.2010.00519.
- [9] 高文栋, 钟圣赞, 刘伟丰, 等. 吊罗山青皮林土壤硝化-反硝化作用及其影响因素[J]. 林业资源管理, 2014(5): 69-73. GAO W D, ZHONG S Y, LIU W F, et al. The intensity of soil nitrification-denitrification and its influence factors in Diaoluoshan *Vatica mangachapoi* forest[J]. Forest Resources Management, 2014(5): 69-73. DOI: 10.13466/j.cnki.lyzygl.2014.05.013.
- [10] 孙志高, 刘景双, 杨继松, 等. 三江平原典型小叶章湿地土壤硝化-反硝化作用与氧化亚氮排放[J]. 应用生态学报, 2007, 18(1): 185-192. SUN Z G, LIU J S, YANG J S, et al. Nitrification-denitrification and N_2O emission of typical *Calamagrostis angustifolia* wetland soils in Sanjiang Plain[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(1): 185-192. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2007.0032.
- [11] 刘巧辉, 黄耀, 郑旭华. 基于 BaPS 系统的旱地土壤呼吸作用及其分量确定探讨[J]. 环境科学学报, 2005(8): 1105-1111. LIU Q H, HUANG Y, ZHENG X H. Determination of upland soil respiration and its components with BaPS system[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(8): 1105-1111. DOI: 10.3321/j.issn.0253-2468.2005.08.019.
- [12] 刘艳, 陈书涛, 刘燕, 等. 增温对农田土壤碳氮循环关键过程的影响[J]. 中国环境科学, 2013, 33(4): 674-679. LIU Y, CHEN S T, LIU Y, et al. Effects of simulated warming on the key processes of soil carbon and nitrogen cycling in a cropland[J]. China Environmental Science, 2013, 33(4): 674-679. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6923.2013.04.014.
- [13] 刘巧辉. 应用 BaPS 系统研究旱地土壤硝化-反硝化过程和呼吸作用[D]. 南京: 南京农业大学, 2005. LIU Q H. Using BaPS system to study upland soil nitrification-denitrification and respiration[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2005.
- [14] 刘方平, 柳根水, 许亚群, 等. 基于 BaPS 系统的棉花土壤硝化和反硝化作用分析[J]. 江西农业学报, 2011, 23(12): 121-123. LIU F P, LIU G S, XU Y Q, et al. Analysis of nitrification and denitrification in soil of cotton field based on BaPS system[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2011, 23(12): 121-123. DOI: 10.19386/j.cnki.jxnyxb.2011.12.036.
- [15] 付素静. 干旱荒漠区典型土壤硝酸盐分布特征及硝化反硝化作用研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012. FU S J. Nitrification-Denitrification in the soils of desert areas, northwest China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.
- [16] 孙庚, 吴宁, 罗鹏. 不同管理措施对川西北草地土壤氮和碳特征的影响[J]. 植物生态学报, 2005, 29(2): 304-310. SUN G, WU N, LUO P. Characteristics of soil nitrogen and carbon of pastures under different management in northwestern Sichuan[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2005, 29(2): 304-310. DOI: 10.17521/cjpe.2005.0039.
- [17] 邓小军, 曹继钊, 宋贤冲, 等. 猫儿山自然保护区3种森林类型土壤养分垂直分布特征[J]. 生态科学, 2014, 33(6): 1129-1134. DENG X J, CAO J Z, SONG X C, et al. Vertical distribution characteristics of three forest types' soil properties on Mao'er Mountain Biosphere Reserve[J]. Ecological Science, 2014, 33(6): 1129-1134. DOI: 10.14108/j.cnki.1008-8873.2014.06.015.
- [18] 宋贤冲, 曹继钊, 唐健, 等. 猫儿山常绿阔叶林不同土层土壤微生物群落功能多样性[J]. 生态科学, 2015, 34(6): 93-99. SONG X C, CAO J Z, TANG J, et al. Soil microbial functional diversity of subtropical evergreen broad-leaved forest in Maoer Mountain[J]. Ecological Science, 2015, 34(6): 93-99. DOI: 10.14108/j.cnki.1008-8873.2015.06.015.
- [19] 黄金玲, 蒋得斌. 广西猫儿山自然保护区综合科学考察[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2010. HUANG J L, JIANG D B. Integrated scientific investigation of Maoershan Natural Reserve of Guangxi[M]. Changsha: Hunan Science and Technology Press, 2010.
- [20] 中国林业科学研究院. 森林生态系统长期定位观测方法: LY/T 1952—2011[S]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011. CSFA. Observation methodology for long-term forest ecosystem research: LY/T 1952—2011[S]. Beijing: China State Forestry Administration, 2011.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. LU R K. Methodology for soil agricultural chemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Science and Technique Press, 2000.
- [22] 孙杰杰, 江波, 吴初平, 等. 浙江省櫟木林生境与生态位研究

- [J]. 生态学报, 2019, 39(3): 131-141. SUN J J, JIANG B, WU C P, et al. Study on the habitat and niche of *Sassafras tzumu* (Hemsl.) Hemsl. in Zhejiang Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(3): 131-141. DOI: 10.5846/stxb201804030749.
- [23] RUSTAD L E, CRONAN C S. Element loss and retention during litter decay in a red spruce stand in Maine [J]. Canadian Journal Forest Research, 1988, 18(6): 947-953. DOI: 10.1139/x88-144.
- [24] LI T, DI Z, HAN X, et al. Elevated CO₂ improves root growth and cadmium accumulation in the hyperaccumulator *Sedum alfredii* [J]. Plant and Soil, 2012, 354(1/2): 325-334. DOI: 10.1007/s11104-011-1068-4.
- [25] RAICH J W, TUFEKCIOGLU A, RUSTAD L E, et al. Vegetation and soil respiration: correlations and controls [J]. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 71-90. DOI: 10.1023/a:1006112000616.
- [26] LUKOW T, DIEKMANN H. Aerobic denitrification by a newly isolated heterotrophic bacterium strain TL1 [J]. Biotechnology Letters, 1997, 19(11): 1157-1159. DOI: 10.1023/A:1018465232392.
- [27] 周立祥, 黄峰源, 王世梅. 好氧反硝化菌的分离及其在土壤氮素转化过程中的作用 [J]. 土壤学报, 2006, 43(3): 430-435. ZHOU L X, HUANG F Y, WANG S M. Isolation of aerobic denitrifiers and their roles in soil nitrogen transformation [J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(3): 430-435. DOI: 10.3321/j.issn:0564-3929.2006.03.011.
- [28] TIAN X F, HU H W, DING Q, et al. Influence of nitrogen fertilization on soil ammonia oxidizer and denitrifier abundance, microbial biomass, and enzyme activities in an alpine meadow [J]. Biology and Fertility of Soils, 2014, 50(4): 703-713. DOI: 10.1007/s00374-013-0889-0.
- [29] WU Q, KNOWLES R, NIVEN D F. O₂ regulation of denitrification in *Flexibacter canadensis* [J]. Canadian Journal of Microbiology, 1994, 40(11): 916-921. DOI: 10.1139/m94-147.
- [30] DENMEAD O T, FRENEY J R, SIMPSON J R. Nitrous oxide emission during denitrification in a flooded Field1 [J]. Soil Science Society of America Journal, 1979, 43(4): 716. DOI: 10.2136/sssaj1979.03615995004300040017x.
- [31] 吴鹏, 崔迎春, 杨婷, 等. 茂兰喀斯特森林主要演替群落土壤呼吸研究 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2013, 37(4): 57-62. WU P, CUI Y C, YANG T, et al. Soil respiration of major successional communities in the Maolan Nature Reserve of Karst areas [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2013, 37(4): 57-62. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2013.04.011.
- [32] 牟守国. 温带阔叶林、针叶林和针阔混交林土壤呼吸的比较研究 [J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 564-570. MOU S G. Respiration of soils under temperate deciduous, coniferous and mixed forests [J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4): 564-570. DOI: 10.11766/trxb200307050411.
- [33] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 土壤呼吸对温度升高的适应 [J]. 生态学报, 2004, 24(11): 2649-2655. CHEN Q S, LI L H, HAN X G, et al. Acclimatization of soil respiration to warming [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(11): 2649-2655. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2004.11.044.
- [34] SHAW M R, HARTE J. Control of litter decomposition in a sub-alpine meadow-sagebrush steppe ecotone under climate change [J]. Ecological Applications, 2001, 11(4): 1206-1223. DOI: 10.2307/3061022.
- [35] MELILLO J M. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system [J]. Science, 2002, 298(5601): 2173-2176. DOI: 10.1126/science.1074153.
- [36] 赵超, 彭赛, 阮宏华, 等. 氮沉降对土壤微生物影响的研究进展 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2015, 39(3): 149-155. ZHAO C, PENG S, RUAN H H, et al. Effects of nitrogen deposition on soil microbes [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2015, 39(3): 149-155. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2015.03.027.
- [37] ZHANG Z S, DONG X J, LIU Y B, et al. Soil oxidases recovered faster than hydrolases in a 50-year chronosequence of desert revegetation [J]. Plant and Soil, 2012, 358(1/2): 275-287. DOI: 10.1007/s11104-012-1162-2.
- [38] SONG L, TIAN P, ZHANG J, et al. Effects of three years of simulated nitrogen deposition on soil nitrogen dynamics and greenhouse gas emissions in a Korean pine plantation of northeast China [J]. Science of The Total Environ, 2017, 609: 1303-1311. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.017.

(责任编辑 刘昌来)