

文章编号: 1000-0240(2009)04-0642-08

祁连山东段南麓不同海拔土壤有机质及全氮的分布状况

薛晓娟^{1,2}, 李英年^{1*}, 杜明远³, 刘安花^{1,2},
张法伟¹, 王建雷^{1,2}

(1. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810001; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;
3. 日本农业环境技术研究所, 筑波 3058604 日本)

摘要: 在祁连山东段南麓设置实验样带, 研究了植被生产力、土壤有机质和全氮等在不同海拔的分布状况及其影响因素。结果表明: 海拔 3 200 m 开始到海拔 4 300 m 山顶, 沿海拔升高年平均气温按 $0.51 \cdot 100 \text{ m}^{-1}$ 递减率下降。海拔 3 200~3 800 m 间植被生产力随海拔升高而降低。土壤有机质和全氮含量沿海拔从 3 200 m 开始下降至 3 400 m 后开始急剧上升, 在海拔 3 600 m 处最高, 而后又迅速下降; 土壤有机质和全氮在土壤剖面中的垂直分布趋势一致, 表层土壤有机质和全氮含量高, 随深度加深而降低。土壤碳氮比介于 6~14 之间, 相对较低, 利于土壤腐殖质化和有机氮矿。土壤碳氮比沿海拔的升高先增加后减小, 在土壤剖面中的分布随海拔的不同而有所差异。土壤有机质含量和全氮含量和气候因子、植被类型及放牧利用有关。

关键词: 祁连山东段南麓; 垂直带; 土壤有机质; 全氮

中图分类号: S153.6 **文献标识码:** A

0 引言

土壤有机质是陆地生态系统重要的碳库, 据估计全球土壤的总碳量在 $14 \times 10^{17} \sim 15 \times 10^{17} \text{ g}$, 是陆地生物总碳量 ($5.6 \times 10^{17} \text{ g}$) 的 2.5~3 倍。而每年因土壤有机质分解释放到大气中的总碳量为 $68 \times 10^{15} \text{ g}$, 全球每年因燃烧燃料释放到大气的碳约 $6 \times 10^{15} \text{ g}$, 仅只是土壤呼吸作用释放碳的 8%~9%^[1]。可见, 土壤有机质的损失对地球自然环境具有重大的影响。地面观测和遥感估算的结果一致表明, 北半球中高纬度的陆地生态系统是重要的碳汇^[2]。氮是大气圈中含量最丰富的元素, 又是各种生态系统在发生植物光合作用形成初级生产过程中最受限制的营养元素之一^[3]。在草地生态系统中, 土壤碳氮不仅是主要的土壤肥力指标, 也是土壤氮素肥力的基础, 它受植被状况、环境条件和草地利用等的影

响。土壤碳氮的含量不仅与温度和降水量等环境因子有关, 而且与土壤特性、土地利用方式、植被特征及人类活动干扰程度等有关^[4]。

多年来, 草地生态系统土壤碳氮空间分布及不同管理条件下土壤碳氮特征的研究报道较多^[5-7], 但在山体垂直带上特别是青藏高原高寒地区土壤碳氮分布状况的研究工作开展较少。青藏高原是研究生态系统对气候变化适应与响应机制的天然实验室, 其极端环境下的植被及土壤对气候变化的响应极为敏感。故我们选择位于青藏高原北部祁连山东段南麓坡地典型的自然垂直带, 沿海拔按 200 m 为梯度, 进行微气象、植物群落及种类组成、土壤参数等观测研究。本文主要针对垂直带上的植被生产力、土壤有机质和全氮进行分析研究, 以期对祁连山东段南麓坡地垂直带植被生产力、土壤有机质和氮素的分布有较详尽的认识, 为高寒草甸生态系统

收稿日期: 2008-11-28; 修订日期: 2009-01-29

基金项目: 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-06-01); 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX2-YW-432-1); 中国科学院百人计划项目资助

作者简介: 薛晓娟(1982—), 女, 山东曲阜人, 2009年在中国科学院西北高原生物研究所获硕士学位, 主要从事植物生态学研究。

E-mail: iamxuexiaojuan@126.com

*通讯作者: 李英年, E-mail: ynli@nwpb.ac.cn

对气候变化响应机制的研究提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

本研究在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站(简称海北站)进行。海北站位于青藏高原东北隅的青海海北藏族自治州门源回族自治县,祁连山北支冷龙岭东段南麓坡地的大通河河谷西段,地理位置为 $37^{\circ}29' \sim 37^{\circ}45' N$, $101^{\circ}12' \sim 101^{\circ}23' E$ 。该区具有明显的高原大陆性气候,东南季风及西南季风微弱。高海拔条件制约,气温极低,无明显四季之分,仅有冷暖二季之别,干湿季分明;地区年平均气温 $-1.7^{\circ}C$; 年平均降水量 $560 mm$ ^[8]。

本试验区设在自海北站开始向东 $9 km$ 处祁连山冷龙岭南麓坡顶,涉及到矮蒿草草甸和金露梅灌丛草甸。海拔 $3200 m$ 处为矮蒿草草甸群落,主要优势种为矮蒿草、异针茅(*Stipa aliena*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、早熟禾(*Poa annua*)等,植物 19 科 40 属 54 种;海拔 $3400 m$ 处为金露梅灌丛草甸,主要优势种除金露梅外,还有垂穗披碱草、异针茅、青藏苔草(*Carex moorcroftii*)、早熟禾等,植物有 15 科 37 属 47 种;海拔 $3600 m$ 处群落主要优势种为青藏苔草、矮蒿草、异针茅等,植物有 12 科 24 属 31 种;海拔 $3800 m$ 处,群落主要优势种为青藏苔草、异针茅、早熟禾、矮火绒草(*Leontopodium nanum*)、矮蒿草等,植物有 10 科 20 属 25 种。土壤类型在海拔 $3200 m$ 为草毡寒冻锥形土,其余均为暗沃寒冻锥形土^[9-11]。

1.2 研究材料与方法

于 2006 年自海北站(海拔 $3200 m$)开始,到东 $9 km$ 处祁连山冷龙岭南麓坡顶(海拔 $4300 m$)为止,沿山体海拔为梯度,每升高 $200 m$ 选择植被分布均匀地段设置样地,共 7 个梯度样地(山顶海拔 $4300 m$ 处多增设一个)。由于海拔 $4000 m$ 以上仅生长垫状点地梅(*Androsace tapete*)等稀疏植被,基本为流石坡,故只进行气象要素的观测。在有植被分布的海拔 $3200 \sim 3800 m$ 进行了土壤、植被有关参数的监测。微气象观测包括 $1.5 m$ 大气高度的空气温湿度和土壤 $10 cm$ 、 $20 cm$ 和 $50 cm$ 的温湿度(30 min 平均值)。因自动微气象观测的是土壤 TDR 体积含水量,山体较高地带土壤沙砾明显,TDR 观测值失真严重。为此,在实验阶段也用土钻烘箱烘干法观测了 $0 \sim 10 cm$ 、 $10 \sim 20 cm$ 和 $20 \sim 30 cm$ 的土壤重量百分比含水量(%)。在 2007 年 8

月每个梯度样地收集 $0 \sim 10 cm$ 、 $10 \sim 20 cm$ 、 $20 \sim 30 cm$ 的土壤样品,5 次重复。土壤有机质测定采用重铬酸钾氧化法,土壤全氮测定采用凯氏定氮法^[12]。在植被生物量达最大的 2007 年 8 月底每一海拔梯度上随机选取 3 个 $50 cm \times 50 cm$ 的样方,采用样方法进行了植物群落调查。用收获法测定植被地上生物量,分检处理后,在 $65^{\circ}C$ 的恒温下烘干称重^[13],单位为 $g \cdot m^{-2}$ 。因调查在地上生物量达最高时的 8 月底进行,故其生物量可为地上净初级生产力。

2 结果与分析

2.1 温度沿海拔分布特征

观测表明,祁连山东段南麓坡地气温沿海拔梯度逐渐降低,之间具有显著的负相关关系。2007 年在海拔 3200 、 3400 、 3600 、 3800 、 4000 、 4200 和 $4300 m$ 处年平均气温分别为 $-0.4^{\circ}C$ 、 $-0.6^{\circ}C$ 、 $-0.8^{\circ}C$ 、 $-1.6^{\circ}C$ 、 $-3.0^{\circ}C$ 、 $-4.3^{\circ}C$ 和 $-6.1^{\circ}C$ (表 1)。从海拔 $3200 m$ 到 $4300 m$,年平均气温下降 $5.8^{\circ}C$,递减率为 $0.51^{\circ}C \cdot (100m)^{-1}$ 。然而,季节不同气温随海拔升高下降速率有所不同,如从海拔 $3200 m$ 到 $4300 m$,1 月平均气温递减率为 $0.26^{\circ}C \cdot (100m)^{-1}$,从海拔 $3200 m$ 到山顶气温下降 $2.9^{\circ}C$;而 8 月为 $0.59^{\circ}C \cdot (100m)^{-1}$,从海拔 $3200 m$ 到山顶气温下降 $6.50^{\circ}C$ 。受冬季大气层结稳定,易形成逆温等影响,气温随海拔升高的递减率在暖季高,冷季低。

所观测的地温亦有相同的变化规律,在 7 个不同海拔上,土壤 $10 cm$ 和 $20 cm$ 层次地温的年变化状况看到(表 2), $10 cm$ 、 $20 cm$ 年平均地温自海拔 $3200 m$ 到 $4300 m$ 分别下降了 $11.3^{\circ}C$ 和 $11.0^{\circ}C$,表现出随海拔地温降低的速率比气温低。空气温度及土壤温度的这种随海拔的降低现象,导致了区域植被类型及群落结构有所不同。

2.2 植被地上年净初级生产量随海拔的分布

土壤有机质和全氮含量决定于有机物质及氮素输入和输出量的相对大小^[13]。有机质的输入量主要依赖于有机残体归还量多少及有机残体的腐殖化系数^[14],而氮素的输入量则主要依赖于植物残体的归还量及生物固氮,也有少数来源于大气沉降^[15]。因海拔不同,致使植被类型,气候环境,植被的人为放牧利用,生物生产力等将有所不同。随海拔升高地上净初级生产力呈现下降趋势(图 1)。植被地上净初级生物量沿着海拔每升高 $100 m$ 将

表 1 祁连山东段南麓坡地不同海拔气温年变化

Table 1 Annual variation of monthly air temperatures at different altitudes on the southern foot of eastern Qilian Mountains

| 海拔 / m | 月 | | | | | | | | | | | | 年平均 / |
|---|--------|--------|--------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|--------|--------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | |
| 3 200 | - 14.6 | - 9.5 | - 4.2 | 0.3 | 6.6 | 8.1 | 10.1 | 10.9 | 6.0 | 0.4 | - 6.9 | - 12.3 | - 0.4 |
| 3 400 | - 13.4 | - 9.5 | - 4.1 | - 1.0 | 5.3 | 6.6 | 8.9 | 10.3 | 5.6 | 0.0 | - 6.0 | - 10.5 | - 0.7 |
| 3 600 | - 12.7 | - 7.8 | - 5.0 | - 1.8 | 4.9 | 6.0 | 8.6 | 9.3 | 4.9 | - 1.2 | - 5.2 | - 9.6 | - 0.8 |
| 3 800 | - 12.8 | - 8.1 | - 5.8 | - 2.8 | 3.9 | 5.1 | 7.6 | 8.3 | 3.6 | - 2.3 | - 6.8 | - 9.5 | - 1.6 |
| 4 000 | - 14.4 | - 9.7 | - 7.4 | - 4.4 | 2.4 | 3.6 | 6.2 | 7.1 | 2.7 | - 4.2 | - 8.2 | - 10.3 | - 3.1 |
| 4 200 | - 15.8 | - 11.3 | - 9.1 | - 6.1 | 0.8 | 2.8 | 6.1 | 6.3 | 1.3 | - 5.7 | - 9.5 | - 11.8 | - 4.3 |
| 4 300 | - 17.5 | - 13.0 | - 10.8 | - 8.0 | - 1.2 | 0.8 | 5.4 | 4.4 | - 0.6 | - 6.7 | - 11.8 | - 14.8 | - 6.2 |
| 直减率/ ($^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{m})^{-1}$) | 0.26 | 0.32 | 0.60 | 0.75 | 0.71 | 0.67 | 0.42 | 0.59 | 0.60 | 0.64 | 0.44 | 0.15 | 0.51 |

表 2 祁连山东段南麓坡地不同海拔地温年变化

Table 2 Annual variations of monthly soil temperatures at different altitudes on the southern foot of eastern Qilian Mountains

| 海拔 / m | 土层 / cm | 月 | | | | | | | | | | | | 年平均 / |
|-----------|------------|--------|--------|--------|-------|-------|-----|------|------|-----|--------|-------|--------|----------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | |
| 3 200 | 10 | 1.6 | 2.7 | 3.6 | 4.7 | 5.6 | 6.7 | 7.6 | 8.6 | 9.7 | 10.6 | 11.7 | 4.3 | 6.5 |
| | 20 | 1.7 | 2.8 | 3.7 | 4.7 | 5.7 | 6.7 | 7.7 | 8.7 | 9.7 | 10.7 | 11.7 | 3.9 | 6.5 |
| 3 400 | 10 | - 7.1 | - 4.9 | - 1.4 | 0.4 | 4.6 | 7.5 | 10.8 | 12.4 | 9.0 | 4.4 | 0.3 | - 3.2 | 2.7 |
| | 20 | - 6.3 | - 4.7 | - 1.4 | - 0.1 | 3.0 | 6.6 | 9.9 | 11.7 | 8.9 | 4.6 | 0.8 | - 2.0 | 2.6 |
| 3 600 | 10 | - 3.0 | - 3.8 | - 1.6 | - 0.1 | 2.2 | 6.4 | 10.4 | 11.2 | 8.2 | 4.1 | 0.1 | - 2.1 | 2.7 |
| | 20 | - 1.4 | - 2.9 | - 1.4 | - 0.2 | 0.4 | 4.9 | 9.1 | 10.2 | 8.0 | 4.7 | 0.9 | - 0.4 | 2.7 |
| 3 800 | 10 | - 13.2 | - 8.4 | - 6.1 | - 3.1 | 3.7 | 4.9 | 9.0 | 10.1 | 3.8 | - 2.3 | - 5.9 | - 9.9 | - 1.5 |
| | 20 | - 9.6 | - 6.3 | - 3.5 | - 0.9 | 2.7 | 4.8 | 7.4 | 8.2 | 6.3 | 1.5 | - 4.3 | - 8.7 | - 0.2 |
| 4 000 | 10 | - 14.3 | - 9.5 | - 6.9 | - 2.2 | 1.4 | 3.7 | 7.5 | 8.8 | 4.4 | 1.9 | - 3.2 | - 10.6 | - 1.6 |
| | 20 | - 13.9 | - 9.3 | - 6.8 | - 2.2 | 0.5 | 3.3 | 7.2 | 8.5 | 4.6 | 2.1 | - 2.3 | - 10.0 | - 1.5 |
| 4 200 | 10 | - 8.8 | - 8.9 | - 7.1 | - 3.0 | 1.2 | 2.4 | 6.1 | 7.9 | 3.3 | - 0.01 | - 1.7 | - 5.1 | - 1.1 |
| | 20 | - 8.6 | 8.8 | - 7.1 | - 3.2 | 0.4 | 1.9 | 5.4 | 7.1 | 3.6 | - 0.02 | - 1.5 | - 4.9 | - 1.3 |
| 4 300 | 10 | - 16.4 | - 14.0 | - 10.7 | - 6.1 | - 0.4 | 0.4 | 4.0 | 5.8 | 1.2 | - 1.0 | - 8.0 | - 13.0 | - 4.8 |
| | 20 | - 15.9 | - 13.9 | - 10.7 | - 6.0 | - 0.3 | 1.1 | 4.3 | 5.9 | 1.4 | - 0.5 | - 7.2 | - 12.5 | - 4.5 |

减少 $43.47 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ，二者间具有极显著的负相关性 ($R^2 = 0.9644$, $P < 0.05$)。

2.3 土壤有机质及全氮含量沿海拔的分布

图 2 给出了祁连山冷龙岭南坡的不同海拔土壤有机质含量及全氮含量分布。图 2 看出，冷龙岭东段南麓坡地土壤有机质含量随海拔变化明显。自海拔 3 200 m 到 3 800 m 每 200 m 梯度高程，土壤有机质表现出自海拔 3 200 m ($108.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 开始缓

慢下降，到海拔 3 400 m 为 $104.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，从海拔 3 400 m 到 3 600 m 又急剧升高至 $126.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，以后迅速下降，到海拔 3 800 m 为 $84.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

随海拔和植被群落的不同，土壤全氮的含量也随海拔有明显变化 (图 2)，而且其变化规律与土壤有机质的变化相似。图 2 看到，在祁连山冷龙岭东段南麓海拔 3 600 m 处土壤全氮含量最高达 $7.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，而最低海拔 3 400 m 处为 $5.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

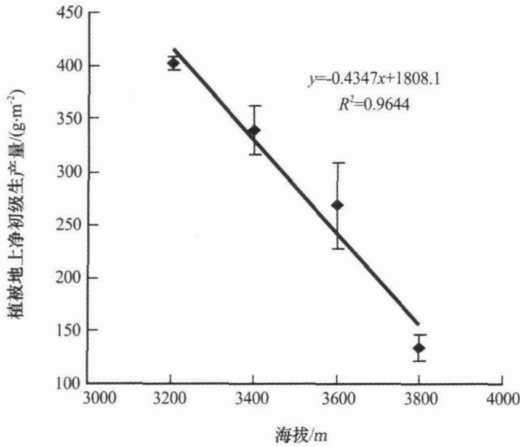


图 1 祁连山东段南麓坡地植被地上净初级生产量随海拔的变化

Fig. 1 Net primary productivity changing with altitudes on the southern foot of eastern Qilian Mountains

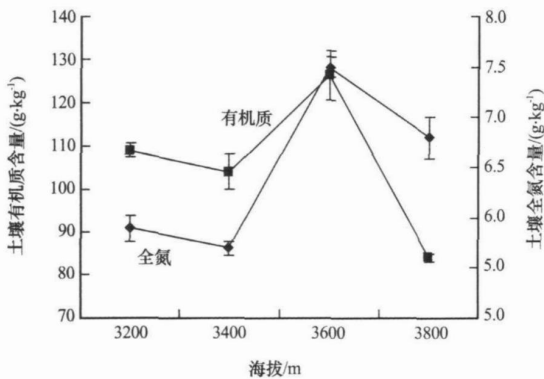


图 2 祁连山东段南麓坡地土壤有机质和全氮沿海拔的变化

Fig. 2 Soil organic matter and total nitrogen changing with altitudes on the southern foot of eastern Qilian Mountains

2.4 不同海拔土壤有机质及全氮含量的垂直剖面分布

研究表明，在垂直方向上，土壤有机质及氮的含量随土壤深度的加深而降低^[16]。在祁连山冷龙岭东段南麓坡地也是相同的变化规律(表 3)。表 3 看出，不同海拔土壤有机质和全氮的垂直分布均表现出表层 0~10 cm 明显高于下层，且随着深度的增加呈降低趋势。土壤有机质含量 0~10 cm 土层在海拔 3 200、3 400、3 600 和 3 800 m 比对应高度 20~30 cm 层次分别高 133.7、26.4、110.0 和 47.1 g·kg⁻¹。在海拔 3 200 m 的矮嵩草草甸和海拔 3 600 m 退化后的金露梅灌丛依土壤深度的增加土壤有机质的下降速率比海拔 3 400 m 金露梅灌丛草甸和海拔 3 800 m 的高寒草甸快。底层 20~30 cm 处 4 个不同高度上的土壤有机质除海拔 3 400 m 显著高于其它 3 个高度外，另外 3 个高度差异不显著。这与海拔 3 400 m 是由于植被为金露梅灌丛草甸的木本金露梅具有较深的根系有关：一般草甸草本植物根系较浅，主要分布在土壤 0~20 cm 层次，而金露梅根系可延伸到 50 cm 层次^[17]。在海拔 3 600 m 虽然过去也为金露梅灌丛草甸，但经超载放牧，金露梅已不复存在，残留的植物根系量包括有机质已在长时间的分解过程中降低，但仍可看到，海拔 3 600 m 处 20~30 cm 层次土壤有机质含量仍比海拔 3 200 m 和 3 800 m 处同层次略高。同样土壤全氮含量也有相似的变化规律，0~10 cm 土层在海拔 3 200、3 400、3 600 和 3 800 m 比对应高度 10~20 cm 土层分别高 3.5、-0.2、1.9 和 1.5 g·kg⁻¹；比对应高度 20~30 cm 土层分别高 4.4、2.7、5.4 和 3.1 g·kg⁻¹。

2.5 不同海拔土壤碳氮比状况

土壤碳氮比通常被认为是土壤氮素矿化能力的

表 3 祁连山东段南麓坡地不同海拔土壤有机质、全氮含量的垂直分布

Table 3 Soil organic matter and total nitrogen at different altitudes on the southern foot of eastern Qilian Mountains

| 海拔 / m | 土层/cm | | | | | |
|--------|--------------------------|-------------|------------|-------------------------|-----------|------------|
| | 有机质(g·kg ⁻¹) | | | 全氮(g·kg ⁻¹) | | |
| | 0~10 | 10~20 | 20~30 | 0~10 | 10~20 | 20~30 |
| 3200 | 193.9 ±3.0a | 73.3 ±1.8c | 60.2 ±4.2b | 8.5 ±0.5b | 5.0 ±0.4c | 4.1 ±0.01b |
| 3400 | 112.7 ±6.2b | 113.2 ±6.9b | 86.3 ±0.7a | 6.6 ±0.3c | 6.8 ±0.3b | 3.9 ±0.3b |
| 3600 | 176.7 ±11.3a | 136.0 ±8.6a | 66.7 ±7.1b | 10.0 ±0.2a | 8.1 ±0.2a | 4.6 ±0.1ab |
| 3800 | 109.8 ±2.9b | 80.1 ±2.4c | 62.7 ±1.4b | 8.3 ±0.2b | 6.8 ±0.2b | 5.2 ±0.3a |

注：表中数据为平均值 ±标准差；同列有不相同字母者，则差异显著(P<0.05)。

标志^[18-19], 碳氮比低有利于微生物在有机质分解过程中的养分释放, 土壤中的有效氮增加; 反之, 微生物在分解有机质的过程中会存在氮受限, 从而与植物存在对土壤无机氮的竞争, 不利于植物的生长及净初级生产力的增加. 土壤有机质模型 CENTURY^[20] 就是根据碳氮比来决定有机质分解过程中是发生矿化还是微生物固持, 较低的碳氮比有利于氮的矿化养分释放. 通常认为土壤碳氮比在 25~30 之间会出现净矿化, 是微生物分解的最佳值^[19]. 从图 3 看到, 祁连山东段南麓土壤碳氮比介于 6~14 之间, 是适合微生物矿化的, 即微生物在分解有机质的过程中是不受氮限制, 有利于分解过程中的养分释放, 说明祁连山东段南麓土壤腐殖化程度高, 氮矿化能力强.

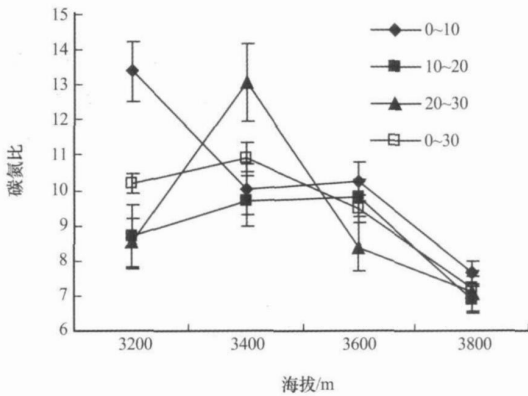


图 3 祁连山东段南麓土壤各层碳氮比沿海拔的变化
Fig. 3 C/N ratios at different depths changing with altitudes on the southern foot of eastern Qilian Mountains

图 3 还看到, 0~10 cm 土层土壤碳氮比在海拔 3 200 m (13.38) 最高, 并随海拔升高而降低, 到海拔 3 800 m (7.64) 最低. 海拔 3 400 m 略低于海拔 3 600 m, 除海拔 3 400 m 与 3 600 m 之间差异不显著外, 其它梯度差异显著; 10~20 cm 土壤碳氮比表现出自海拔 3 200 m 开始到海拔 3 600 m 升高, 海拔 3 600 m 开始下降, 到海拔 3 800 m 处最低, 海拔 3 400 和 3 600 与 3 800 m 之间差异达到显著, 其它梯度之间差异不显著; 20~30 cm 表现出自海拔 3 200 m 开始到海拔 3 400 m 升高, 海拔 3 400 m 开始下降, 到海拔 3 800 m 处最低, 海拔 3 400 m 与各海拔之间差异达到显著, 其它之间未达到显著水平. 在 20~30 cm 土层土壤碳氮比随海拔变化幅度较大, 而 10~20 cm 层次保持相对平稳. 海拔 3 600 m 和 3 800 m 处, 0~10 cm、10~20 cm 和 20

~30 cm 的土壤碳氮比基本接近, 相互差值明显减小. 从 0~30 cm 整层来看, 沿海拔的升高先增加后减小, 在海拔 3 400 m 处最大, 在海拔 3 800 m 处最小. 海拔 3 200、3 400、3 600 和 3 800 m 处的碳氮比值分别为 10.20、10.94、9.48 和 7.22, 其 0~30 cm 整层土壤碳氮比 (y) 与海拔 (x) 具有显著的对数关系 ($y = -17.842 \ln(x) + 155.02, R^2 = 0.8210$), 表现出土壤碳氮比随海拔增加降低明显.

不同海拔土壤碳氮比随土壤深度变化呈现不同的变化趋势 (图 4). 海拔 3 200、3 400 和 3 800 m 处, 土壤碳氮比随土壤深度的增加呈现先降低再增加. 海拔 3 600 m 处随土壤深度增加呈现逐渐降低. 在海拔 3 200 m 处 0~10 cm 随土壤深度增加碳素含量减小速度大于氮素含量的减小速度, 土壤碳氮比减小幅度较大, 土壤碳氮比变化剧烈. 海拔 3 400 m 处 20~30 cm 土壤层次土壤碳氮比最大, 从表层到深层变化基本平稳. 但海拔 3 600 m 和 3 800 m 处碳氮比变化幅度不大, 碳和氮的减小速度大致同步. 造成这些原因可能为海拔 3 400 m 处夏季放牧草场放牧强度大, 每年植被地上草本植物基本被牛羊啃食殆尽, 但金露梅仍可得到良好的生长, 斑状的裸露地表导致土壤有机质损失严重, 必然会引起土壤全氮含量的减少. 同时高山草甸氨化作用较强, 土壤全氮的挥发和反硝化损失高, 因此植被覆盖度低的地方全氮减少速度较快^[21]. 同理, 海拔 3 200 m 为典型的矮蒿草草甸, 该草甸在广大高寒草地均有较高的草地生产力, 植被覆盖度大, 减缓了全氮含量的减少速度.

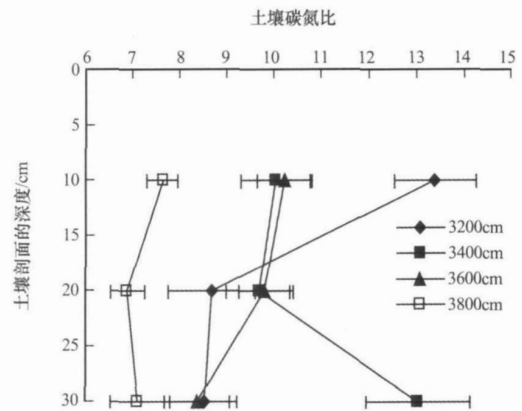


图 4 祁连山东段南麓不同海拔土壤碳氮比随深度的变化
Fig. 4 C/N ratios at different altitudes changing with soil depths on the southern foot of eastern Qilian Mountains

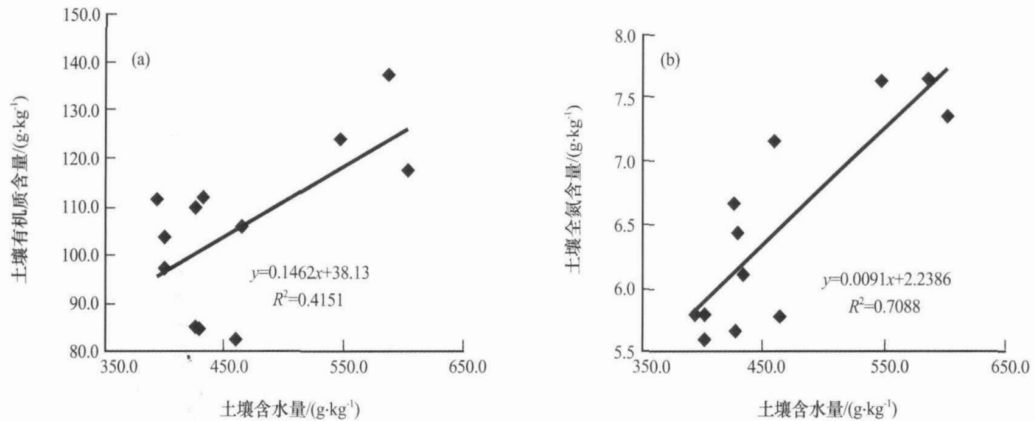


图 5 土壤有机质和全氮含量与土壤含水量(0~30 cm)的关系

Fig. 5 Soil organic matter and total nitrogen changing with soil moisture (0~30 cm)

2.6 土壤有机质和全氮与气候因子和植被类型的关系

祁连山冷龙岭东段南麓坡地土壤有机质和全氮随海拔分布,与区域植被群落结构,以及随海拔气候环境等发生变化有关.表现在不同的气候条件和人类活动干扰下,通过植被、土壤,进而影响着进入土壤中的有机质数量及土壤有机质的分解等.

就某一地点而言,0~30 cm 土壤中有机质含量和全氮含量均随着土壤含水量的增加而增加,具有显著的正相关关系(图 5).土壤有机质(y_1)和全氮(y_2)与土壤温度(x)之间(图略)均呈负二次曲线关系($y_1 = -0.1443x^2 + 1.1543x + 9.478$, $R^2 = 0.647$; $y_2 = -0.0024x^2 + 0.0011x + 0.6783$, $R^2 = 0.2255$).而且对土壤有机质和土壤全氮的影响中土壤含水量明显高于温度.

土壤有机质和全氮在随海拔增加的过程中,与植被生产力存在一定的正相关关系,但均未达到显著水平.土壤有机质和全氮与植被生产力的 R 为 0.462 ($P=0.152$)和 -0.582 ($P=0.06$).

从植被类型分布及人类活动影响来看,海拔 3 200 m 为典型的矮嵩草草甸,该草甸在广大高寒草地均有较高的草地生产力.虽有放牧等外界因素的干扰,但因地下生物量是地上生物量的数倍^[22],每年将有大量的植物有机残体归入土壤,提高了土壤有机质,但该区域在 4 个不同海拔中海拔最低,热量条件尚好,利于有机质的分解和迁移,限制了土壤有机质及全氮的提高;海拔 3 400 m 处为典型的金露梅灌丛草甸,过去在该区域放牧轻,植被生长良好,土壤有机质含量比矮嵩草草甸地区高^[23].但在 20 世纪 80 年代后期到 90 年代中期被当地政

府用于为夏季放牧草场,夏季放牧草场放牧强度大,每年植被地上草本植物基本被牛羊啃食殆尽,但金露梅仍可得到良好的生长.在非金露梅生长区,植被近似裸露,导致土壤有机质损失严重.虽然近十几年来,区域草场又回归为冬春放牧草场,植被有所恢复,但处于恢复阶段,故其土壤有机质仍较低;海拔 3 600 m 区域一直以来是夏季放牧草场,在 20 世纪 80 年代前,放牧牲畜数量较少,虽然为夏季放牧草场,但植物生长可有生长喘息的机会,植被仍有较大的覆盖度,木本金露梅生长高度在 40~60 cm.但是 80 年代以后,放牧家畜急剧增长,夏季放牧草场压力巨大,对草地破坏严重,就是很高的金露梅灌丛已不复存在,但大量的枯死根系埋藏于土壤,根系残体对土壤有机质含量提高有利;3 800 m 处虽然与海拔 3 600 m 区域一样为夏季放牧草地,但该区年平均气温已比海拔 3 200 m 低近 4℃,长久以来极端恶劣外部环境条件,限制了植物的正常生长和发育,植被种类组成明显减少.植被盖度低,部分地段出现斑状裸露地表,区域土壤层浅薄,植被生产力低下,特别是植物地下生物量明显减少,进而对土壤有机质的补给也很低,导致区域土壤有机质明显降低.

3 结语

(1) 祁连山东段南麓气温沿海拔梯度逐渐降低,从海拔 3 200 m 到 4 300 m,气温与海拔具有显著的负相关关系,年平均气温递减率为 $0.51 (100m)^{-1}$,且气温随海拔升高的递减率暖季高,冷季低.植物地上净初级生产力沿海拔的升高逐渐降低.

(2) 祁连山东段南麓坡地土壤有机质表现出海拔 3 200 m 到 3 400 m 缓慢下降, 海拔 3 400 m 到 3 600 m 急剧升高至 $126.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 以后迅速下降, 到海拔 3 800 m 达最低 ($84.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。全氮的变化规律与土壤有机质的变化非常相似, 在海拔 3 600 m 处土壤全氮含量最高达 $7.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而最低的海拔 3 400 m 处为 $5.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 这是由于土壤有机质和全氮与土壤含水量之间有显著的正相关关系。

(3) 不同海拔的土壤有机质和全氮含量随土壤加深呈降低趋势, 这主要与植物残体在土壤剖面分布有关。但不同海拔降低幅度不同, 土壤有机质含量和全氮含量均在海拔 3 200 m 和 3 600 m 降低幅度较大。

(4) 祁连山东段南麓土壤碳氮比值较小, 表明该区域腐殖化程度高, 氮矿化能力强。随海拔的升高土壤碳氮比先增加后减小, 在海拔 3 400 m 处最大, 在海拔 3 800 m 处最小。

(5) 土壤含水量是影响土壤有机质含量和全氮含量最显著的气候因子, 温度次之, 与植被生产力存在一定的正相关关系, 但未达显著性检验水平。但可认为植被类型不同以及放牧利用不同将影响到土壤有机质含量和全氮含量随海拔的分布。

参考文献 (References) :

- [1] Huang Changyong. Soil [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 45 - 46. [黄昌勇. 土壤学[M]. 中国农业出版社, 2000:45 - 46.]
- [2] Schlesinger W H. An overview of the C cycle[M]// Lal R, Kimble J, Levin E, *et al.* Soils and Global Change. CRC Press, Inc, 1995: 9 - 26
- [3] Burke I C, Lauenroth W K, Patton W J. Regional and temporal variation in net primary production and nitrogen mineralization in grasslands [J]. Ecology, 1997, **78**: 1330 - 1340.
- [4] Wang Changting, Long Ruijun, Wang Qiji, *et al.* Distribution of organic matter, nitrogen and phosphorus along an altitude gradient and productivity change and their relationships with environmental factors in the Alpine meadow[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2005, **14**(4): 15 - 20. [王长庭, 龙瑞军, 王启基, 等. 高寒草甸不同海拔梯度土壤有机质氮磷的分布和生产力变化及其与环境因子的关系[J]. 草业学报, 2005, **14**(4): 15 - 20.]
- [5] Calderen J F, Louise E J, Scow K M. Microbial response to simulated tillage in cultivated and uncultivated soils[J]. Soil Biology Biochemistry, 2000, **32**: 1547 - 1559.
- [6] Dan T H. Tillage and crop residue effects on carbon dioxide evolution and carbon storage in a Paleustoll[J]. Soil Science Society of American Journal, 1998, **62**:250 - 256.
- [7] Estavilo J M, Merino P, Pinto M, *et al.* Short term effect of ploughing a permanent pasture on N_2O production from nitrification and denitrification[J]. Plant and Soil, 2002, **239**: 253 - 265.
- [8] Li Yingnian, Zhao Xinquan, Cao Guangmin, *et al.* Analyses on climates and vegetation productivity background at Haibei Alpine Meadow Ecosystem Research Station [J]. Plateau Meteorology, 2004, **23**(4): 556 - 558. [李英年, 赵新全, 曹广民, 等. 海北高寒草甸生态系统定位站气候、植被生产力背景的分析[J]. 高原气象, 2004, **23**(4): 558 - 566.]
- [9] Yang Shihai, Li Yingnian, Pu Jiyan, *et al.* Investigation of the plant community and soil environmental factors of three alpine vegetation types [J]. Acta Agrestia Sinica, 2006, **14**(1): 77 - 83. [杨时海, 李英年, 蒲继延, 等. 三种高寒草甸植被类型植物群落结构及其土壤环境因子研究[J]. 草地学报, 2006, **14**(1): 77 - 83.]
- [10] Zhou Xingmin, Li Jianhua. The principal vegetation types and their geographical distribution at the Haibei Research Station of Alpine Meadow Ecosystem, Menyuan County, Qinghai Province [C]// Alpine Meadow Ecosystem. Lanzhou: Gansu People Press, 1982: 9 - 18. [周兴民, 李建华. 海北高寒草甸生态系统定位站的主要植被类型及其地理分布规律[C]// 高寒草甸生态系统. 兰州: 甘肃人民出版社, 1982: 9 - 18.]
- [11] Yang Futun, Sha Qu, Zhang Songlin. On the primary production of alpine shrubland and alpine meadow in Haibei, Qinghai Plateau [C]// Alpine Meadow Ecosystem. Lanzhou: Gansu People Press, 1982: 44 - 51. [杨福囤, 沙渠, 张松林. 青海高原海北高寒灌丛和高寒草甸初级生产量[C]// 高寒草甸生态系统. 兰州: 甘肃人民出版社, 1982: 44 - 51.]
- [12] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Pysiochemical Analysis of Soil [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1981.
- [13] Trumbore S E, Chadwick O A, Amundson R. Rapid exchange between soil carbon and atmospheric carbon dioxide driven by temperature change[J]. Science, 1996, **272**: 393 - 396.
- [14] Li Zhongpei, Wang Xiaoju. Analysis and evaluation of soil organic matter dynamics at a little region scale [J]. Scientia Geographica Sinica, 2000, **20**(2): 182 - 187. [李忠佩, 王效举. 小区域水平土壤有机质动态变化的评价与分析[J]. 地理科学, 2000, **20**(2): 182 - 187.]
- [15] Zhang Jintun. Effects of global climate change on C and N circulation in natural soils [J]. Scientia Geographica Sinica, 1998, **18**(5): 463 - 471. [张金屯. 全球气候变化对自然土壤碳、氮循环的影响[J]. 地理科学, 1998, **18**(5): 463 - 471.]
- [16] He peng, Deng Liangji, Gou Xi, *et al.* Vertical distribution of labile soil organic carbon on different land use in purple hill area[J]. Journal of Mountain Science, 2006, **24**(Suppl.): 21 - 26. [何鹏, 邓良基, 苟曦, 等. 紫色丘陵区不同土地利用方式下土壤活性有机碳垂直分布特征[J]. 山地学报, 2006, **24**(S) 21 - 26.]
- [17] Li Yingnian, Zhao Liang, Wang Qinxue, *et al.* Estimation of biomass and annual turnover quantities of Potentilla Froticosa shrub [J]. Acta Agrestia Sinica, 2006, **14**(1): 72 - 76. [李英年, 赵亮, 王勤学, 等. 高寒金露梅灌丛生物量及年周转量[J]. 草地学报, 2006, **14**(1): 72 - 76.]
- [18] Paul E A, Clark F E. Soil Mncrobiology and Biochemistry [M]. San Diego: Academic Press, 1989.
- [19] Prescott C E, Chappell N H, Vesterda L. Nitrogen turnover in forest floors of coastal Douglas fir at sites differing in soil nitrogen capital [J]. Ecology, 2000, **81**: 1878 - 1886.

- [20] Patton W J , Stewart J W B , Cole C V . Dynamics of C , N , P and S in grassland soils: a model [J]. *Biogeochemistry* , 1988 , 5 : 109 - 131 .
- [21] Zhou Xingmin . Chinese Kobresia Meadow [M]. Beijing : Science Press , 2001 : 188 - 206 . [周兴民 . 中国嵩草草甸 . 北京 : 科学出版社 , 2001 : 188 - 206 .]
- [22] Wang Qiji , Wang Wenyong , Deng Zifa . The dynamics of biomass and the allocation of energy in alpine kobresia meadow communities , Haibei region of Qinghai Province [J]. *Acta Phytocologica Sinica* , 1998 , 22 (3) : 222 - 230 . [王启基 , 王文颖 , 邓自发 . 青海海北地区高山嵩草草甸植物群落生物量动态及能量分配 [J]. *植物生态学报* , 1998 , 22 (3) : 222 - 230 .]
- [23] Le Yanzhou , Zuo Kecheng , Zhang Jinxia , *et al.* Soil types and their basic characteristics at Haibei Research Station of Alpine Meadow Ecosystem [C] // *Alpine Meadow Ecosystem* . Lanzhou : Gansu People Press , 1982 : 19 - 33 . [乐炎舟 , 左克成 , 张金霞 , 等 . 海北高寒草甸生态系统定位站的土壤类型及其基本特点 [C] // 高寒草甸生态系统 . 兰州 : 甘肃人民出版社 , 1982 : 19 - 33 .]

Soil Organic Matter and Total Nitrogen Changing with Altitudes on the Southern Foot of Eastern Qilian Mountains

XUE Xiao-juan^{1,2} , LI Ying-nian¹ , DU Ming-yuan³ , LIU An-hua^{1,2} ,
ZHANG Fa-wei¹ , WANG Jian-lei^{1,2}

(1. Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining Qinghai 810001, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of sciences, Beijing 100049, China; 3. National Institute of
Agror Environmental Sciences, Tsukuba 3058604, Japan)

Abstract: On the vertical zones on the southern foot of eastern Qilian Mountains, the distribution of vegetation primary production, soil organic matter and total nitrogen, as well their influencing factors are studied. It is found that the decreasing rate of the annual air temperature is $0.51 \cdot (100\text{m})^{-1}$ and the productivity of vegetation decreases with increasing altitude. The contents of soil organic matter and total nitrogen decrease from 3 200 m to 3 400 m and then increase sharply, having a maximum at 3 600 m, followed by a rapid decrease upwards. The vertical changes of soil or-

ganic matter and total nitrogen have the similar trends. The contents of soil organic matter and total nitrogen are higher at the surface, and decrease with depth. The soil C/N ratio ranges from 6 to 14, which is lower than the appropriate C/N ratio of 25 ~ 30. The soil C/N ratio increases firstly and then decreases with altitude. And its distribution in the soil profile varies with elevation. Climate factors, vegetation types and grazing types control the contents of soil organic matter and total nitrogen.

Key words: Qilian Mountains; vertical zone; soil organic matter; total nitrogen