

秦岭中段太白山以北不同海拔土壤碳·氮·磷生态化学计量特征

李丹¹, 范拴喜^{1,2*}, 孙旻涵¹, 黄意成¹

(1. 宝鸡文理学院, 陕西宝鸡 721013; 2. 陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室, 陕西宝鸡 721013)

摘要 [目的]探究秦岭中段太白山以北土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量特征。[方法]在秦岭中段太白山以北选取4个不同海拔梯度(1 500、1 800、2 100、2 400 m)的0~20、20~40、40~60 cm土层取样,测定分析土壤有机碳、总氮、总磷含量及变化特征,并计算分析生态化学计量特征。[结果]土壤有机碳、总氮和总磷的平均含量分别为31.72、3.36、0.29 g/kg,随着海拔增加,土壤整体的有机碳、总氮和总磷均呈先升后降趋势;土壤C/N、C/P、N/P的均值分别为9.58、94.45和10.02,随着海拔增加,土壤整体的C/N呈下降趋势,N/P呈上升趋势,C/P无明显变化;0~20 cm土层的C/P、N/P均显著高于20~40和40~60 cm土层,而海拔2 100~2 400 m处不同土层的C/N之间无显著差异,且土壤C、N之间具有较高的耦合性;在20~40和40~60 cm土层中,海拔2 100~2 400 m处的土壤C/P、N/P均高于1 500~1 800 m,1 500~1 800 m处C/N高于其他海拔。[结论]该地区土壤养分及其化学计量特征随海拔有明显变异,总体表现为碳、氮含量丰富,磷缺乏,应适量增施磷肥,重视土壤保育工作。

关键词 海拔;土壤有机碳;总氮;总磷;含量;生态化学计量特征;土层深度;秦岭

中图分类号 X 144 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2023)09-0049-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.09.013



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Ecological Stoichiometry Characteristic of Carbon, Nitrogen and Phosphorus at Different Altitudes in North of Taibai Mountain in the Middle Qinling Mountains

LI Dan¹, FAN Shuan-xi^{1,2}, SUN Min-han¹ et al (1. Baoji University of Arts and Sciences, Baoji, Shaanxi 721013; 2. Shaanxi Province Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Simulation, Baoji, Shaanxi 721013)

Abstract [Objective] To investigate the contents of soil carbon, nitrogen and phosphorus and their ecological chemometric characteristics in soils from north of the Taibai Mountains in the middle part of the Qinling Mountains. [Method] This study selected soil samples from 0-20, 20-40 and 40-60 cm at four different elevation gradients (1500, 1800, 2100 and 2400 m) north of the Taibai Mountains in the middle part of the Qinling Mountains, the contents of soil organic carbon, total nitrogen and total phosphorus and their variation characteristics were determined and analyzed, and the ecological chemometric characteristics were calculated and analyzed. [Result] The average contents of soil organic carbon, total nitrogen and total phosphorus were 31.72, 3.36 and 0.29 g/kg, respectively, and the soil organic carbon, total nitrogen and total phosphorus showed an increasing first and then decreasing trend with increasing altitude. The average values of soil C/N, C/P, and N/P were 9.58, 94.45, and 10.02, respectively. With the increase of altitude, the overall C/N of the soil showed a downward trend, while N/P showed an upward trend, with no significant change in C/P. The C/P and N/P in 0-20 cm soil layer were significantly higher than those of 20-40 and 40-60 cm soil layer, while there was no significant difference between the C/N of different soil layers at altitude 2100-2400 m, and there was a high coupling between soil C and N. In the soil layers of 20-40 and 40-60 cm, the soil C/P and N/P at altitude 2100-2400 m were higher than those at 1500-1800 m, and the C/N at 1500-1800 m was higher than those at other altitudes. [Conclusion] The soil nutrients and their stoichiometric characteristics in this area have obvious variation with altitude, and the overall performance is rich in carbon and nitrogen and deficient in phosphorus, which should be appropriately increased with phosphorus fertilizer and attention to soil conservation work.

Key words Altitude; Soil carbon; Total nitrogen; Total phosphorus; Content; Ecological stoichiometry characteristic; Soil depth; Qinling Mountains

生态化学计量学是研究生态系统内各组分能量以及多种化学元素之间平衡的科学,对于研究生物地球化学循环和生态系统稳定性等有重要意义^[1-2]。土壤作为生态系统重要组成部分,不仅为植物及微生物提供营养,而且土壤中的碳、氮、磷等元素影响植物生长、微生物动态、凋落物分解以及土壤养分的积累与循环等^[3]。目前国内土壤生态化学计量学研究主要集中在不同植被^[4]、不同土地利用方式^[5]、不同海拔^[6]等方面的差异分析。近年来土壤随海拔条件的变化引起大量关注,这是由于海拔变化对土壤性质、植被分布以及凋落物都有很大影响^[7],而这些因素又会直接或间接影响土壤养分^[8]。因此,研究不同海拔土壤养分及其生态化学计量特征有重要意义。张广帅等^[9]对泥石流频发区的研究表明,土壤碳、氮及其生态化学计量比均随海拔升高而升高,全磷

随海拔升高而下降;李新星等^[10]研究表明,马衔山土壤碳、氮、磷含量和生态化学计量比随海拔变化呈现出不同的特征;李丹维等^[11]对太白山研究表明,土壤碳、氮、磷含量随海拔升高变化不显著,其生态化学计量比在不同海拔上呈现较大的空间变异。

秦岭中段太白山以北属于太白县管辖范围内,该区域是陕西省海拔最高县城,其独特的气候条件和地理位置,造就了森林等各种丰富的自然资源,对西北地区生态保护有重要意义。该区域目前有关太白山生态化学计量特征的研究多集中在太白山栎属树种中^[12],对不同海拔土壤碳、氮、磷生态化学计量特征的研究较少。该研究以秦岭中段太白山以北作为研究区域,运用生态化学计量学理论来研究不同海拔土壤碳、氮、磷分布特征,旨在分析该区域土壤碳、氮、磷含量和生态化学计量比垂直变化特征以及土壤碳、氮、磷含量与计量比之间的关系,以期深入认识该区域土壤碳、氮、磷地球化学循环,对掌握太白山以北区域不同海拔土壤养分分布状况和推动秦岭生态环境可持续发展具有重要意义。

基金项目 陕西省科技厅自然科学基金项目(2020SF-438)。

作者简介 李丹(1997—),女,陕西宝鸡人,硕士研究生,研究方向土壤改良。*通信作者,副教授,博士,硕士生导师,从事土壤改良研究。

收稿日期 2022-09-28

1 材料与与方法

1.1 研究区概况 研究区位于太白县(107°03′00″~107°46′40″E,33°38′13″~34°09′55″N),属于暖温带半干旱型大陆季风气候,带有大陆性季风气候与高山气候交汇的特征,年平均气温7.7℃,无霜期158 d。该试验中样品采集范围在海拔1 500~2 400 m。海拔1 500 m处为阔叶林,海拔1 800 m处为针阔叶混交林,海拔2 100和2 400 m处为针叶林。

1.2 土壤样品采集 2020年8月,在海拔1 500~2 400 m按每300 m为1个海拔梯度,按照“S”型取样法在各海拔梯度内选取8个代表性样点,按0~20、20~40、40~60 cm层次,用土钻分层取土,同层土壤混匀为1个混合土样,去除枯枝落叶和石砾等杂质后装入自封袋,共采集96个土样。土壤混合样品室内风干后过100目筛。

1.3 测定方法 土壤分析参照鲍士旦《土壤农化分析》^[13]中的方法。总氮(TN)的测定采用凯氏定氮法;总磷(TP)的测定采用氢氧化钠熔融-钼锑抗显色-紫外分光光度法;土壤有机碳(SOC)的测定采用重铬酸钾氧化-外加热法。

1.4 数据处理 该研究中土壤C、N、P生态化学计量比均为元素质量比。利用SPSS 17.0软件计算不同海拔梯度土壤的SOC、TN、TP以及C/N、C/P、N/P等指标的平均值(Mean)、标准差(SD),并对不同海拔和土层的土壤养分指标进行单因素方差分析和最小显著差数法(LSD)多重比较。采用Pearson相关系数法分析土壤中各养分元素的含量及其生态化学计量间的相关性。利用Microsoft Excel 2010软件对数据进行前期处理与作图。

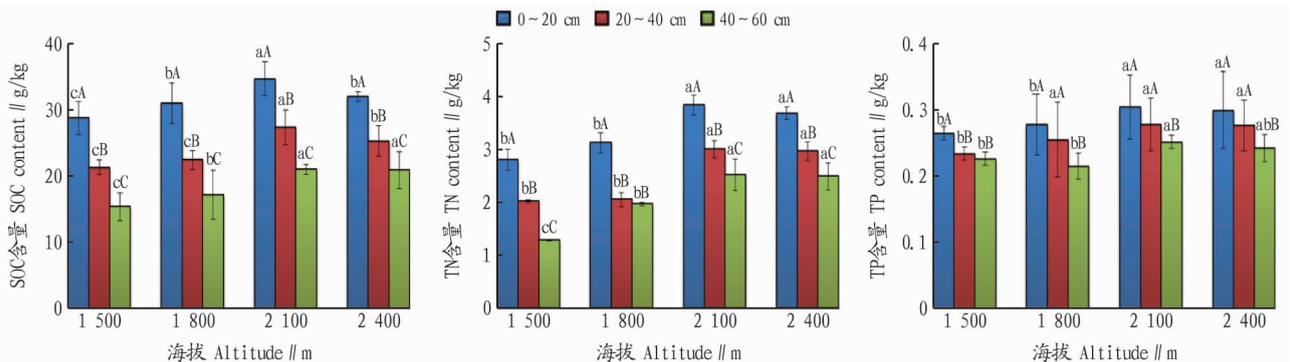
2 结果与分析

2.1 不同海拔土壤C、N、P含量特征 从图1可以看出,土壤SOC、TN和TP含量在不同海拔和剖面上存在不同程度的差异,土壤SOC含量在0~20 cm土层为28.86~34.77 g/kg,均值为31.72 g/kg,20~40 cm土层为21.37~27.44 g/kg,均

值为24.17 g/kg,40~60 cm土层为15.40~21.06 g/kg,均值为18.66 g/kg。土壤SOC含量随海拔升高呈现先增后减的趋势,SOC含量1 500~2 100 m明显增加,且在2 100 m达到最大;海拔2 100~2 400 m变化不明显。土壤TN含量在0~20 cm为2.80~3.84 g/kg,均值为3.36 g/kg,在20~40 cm为2.02~3.00 g/kg,均值为2.51 g/kg,在40~60 cm为1.28~2.52 g/kg,均值为2.06 g/kg;土壤TN含量在海拔2 100 m处与2 400 m处无显著差异,在2 100 m处高于其余海拔。土壤TP含量随海拔增加无明显变化趋势;其中0~20 cm层为0.26~0.30 g/kg,均值为0.29 g/kg;20~40 cm层为0.23~0.28 g/kg,均值为0.26 g/kg;40~60 cm层为0.23~0.25 g/kg,均值为0.23 g/kg;TP含量在2 100 m处达到最大,在海拔1 500 m处最小,且表层土壤TP含量普遍高于中下层。

不同剖面上土壤SOC、TN和TP含量均随土层深度增加呈现垂直波动减小的变化规律。不同层次土壤SOC含量差异显著,峰值出现在0~20 cm土层,同一土层海拔2 100 m处SOC含量高于其他海拔。除海拔1 800 m处中下土层TN含量差异不显著外,其余各海拔处不同土层土壤TN含量存在显著差异;各海拔处TN含量峰值出现在0~20 cm土层,同一土层海拔2 100 m处TN含量高于其他海拔。海拔1 500 m处0~20 cm土层土壤TP含量与中下层差异显著,其余各海拔TP含量0~20 cm与20~40 cm土层差异不显著。

对不同海拔0~60 cm整体土壤的SOC、TN和TP分别进行线性回归分析,结果显示(图2),SOC和TN、SOC和TP、TN和TP之间均存在显著的正向相关关系($R^2=0.8567, P<0.01$; $R^2=0.7680, P<0.01$; $R^2=0.7616, P<0.01$)。这表明研究区土壤的SOC、TN、TP的空间分布在一定程度上存在相互耦合的关系。



注:不同大写字母表示相同海拔不同土层间差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示相同土层不同海拔间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different capital letters indicate significant differences between different soil layers at the same altitude ($P<0.05$), while different lowercase letters indicate significant differences between different elevations of the same soil layer ($P<0.05$).

图1 不同海拔土壤SOC、TN和TP的空间分布特征

Fig. 1 Spatial distribution characteristics of SOC, TN, and TP in soils at different altitudes

2.2 不同海拔土壤生态化学计量特征 从图3可以看出,土壤C/N、C/P和N/P在不同海拔和剖面上存在不同程度的差异。土壤C/N在0~20 cm土层为9.05~10.31,均值为9.51,20~40 cm土层为8.55~11.16,均值为9.82,40~60 cm

土层为8.37~12.09,均值为9.42;土壤C/N随海拔升高呈现减小的趋势;0~20 cm土层C/N在海拔1 500~1 800 m处无显著差异,1 800~2 100 m呈显著降低趋势,2 100~2 400 m处无显著差异。随海拔增加,土壤C/P呈现出先升后降的变

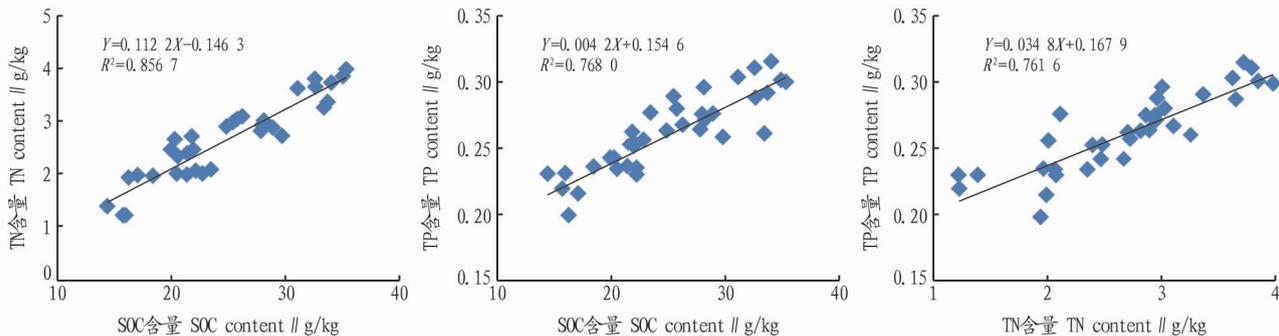


图2 不同海拔土壤 SOC、TN 和 TP 的回归拟合关系

Fig. 2 Regression fitting relationship of soil SOC, TN, and TP at different altitudes

化规律;土壤 C/P 在 0~20 cm 土层为 107.30~112.03,均值为 110.71,在 20~40 cm 土层为 89.88~98.55,均值为 92.95,在 40~60 cm 土层为 68.28~86.48,均值为 79.70;0~20 cm 处土壤 C/P 在各海拔处无显著差异。土壤 N/P 随海拔增加呈现先增后减的趋势;其中 0~20 cm 土层为 10.58~12.65,均值为 11.69;20~40 cm 土层为 8.09~10.81,均值为 9.57;40~60 cm 土层为 5.68~10.28,均值为 8.79;N/P 在 2 100 m 处达到最大,在海拔 1 500 m 处最小。

垂直剖面上,土壤 C/N 基本随土层深度增加呈现先增后减的趋势,土壤 C/P 和 N/P 均随土层深度增加呈现垂直波动减小的变化规律(图 3)。除海拔 1 800 m 处 C/N 在 0~20 cm 和 20~40 cm 差异显著外,其余各海拔在 0~20 cm 和 20~40 cm 差异均不显著,C/N 峰值出现在 20~40 cm 处,同一土层海拔 1 500 m 处土壤 C/N 高于其他海拔。除 2 400 m 处土壤 C/P 在中下层间差异不显著外,其余各海拔不同土壤 C/P 土层间差异显著,各海拔处 C/P 峰值均出现在 0~20 cm 土层。N/P 在各海拔处 0~20 cm 土层最高,1 500 m 处不同土层间 N/P 差异显著,1 800~2 400 m 处 0~20 cm 土层均显著高于 20~40、40~60 cm,但 20~40 cm 与 40~60 cm 无显著差异。

3 讨论

3.1 不同海拔土壤碳、氮、磷特征 C、N、P 作为土壤营养元素,对土壤肥力、植物生长发育以及物质循环过程都有影响,其含量高低主要受到气候、植被、生物、地形等因素的综合作用^[14]。该研究显示,研究区域 0~20 cm 土壤 SOC、TN、TP 含量均值分别为 31.72、3.36、0.29 g/kg 与全国土壤 C、N、P 平均含量(0~10 cm 土壤 C、N、P 平均含量分别为 24.56、1.88、0.78 g/kg)^[15]相比,SOC 和 TN 含量均高于全国水平,TP 含量低于全国水平,说明该地区碳、氮含量丰富,缺乏磷素。

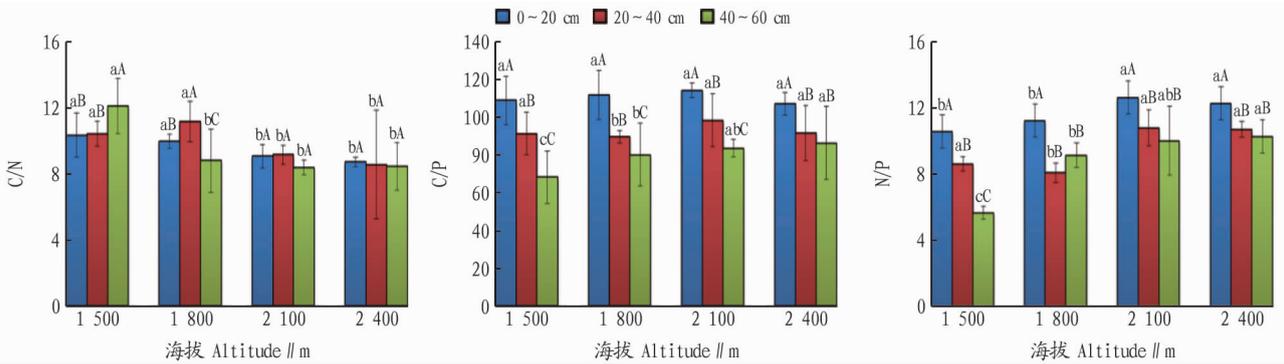
该研究发现,土壤 C、N、P 随土层深度变化而变化。各海拔土壤 SOC、TN、TP 的含量随土层加深均呈减少的趋势,其中 C、N 含量在表层与中下层间显著下降,而 TP 含量下降趋势不明显,这与张广帅等^[9]的研究结果一致。土壤 C、N 显著下降的原因是受土壤母质、水热条件、枯落物分解以及植物吸收利用等因素的影响^[16],尤其是表层土壤植被凋落物分解较多,合成的有机质也较多,使得养分聚集在表层,受水分向下迁移影响,从表层到底层逐渐减小。而土壤 TP 空

间变异性小主要是由于土壤 TP 主要来源于成土母质中的磷素,受其他因素(干湿沉降、动植物残体、微生物活动)影响较小^[17],其含量一般较为稳定。

张继平等^[18]研究发现,土壤养分随海拔的变化呈现出不同的特征。该研究发现,随海拔的升高,表层土壤 SOC 含量总体呈先升高再降低的趋势。海拔 1 500~2 100 m 表层土壤 SOC 含量随海拔升高而升高,这与李新星等^[10]的研究结果一致。在该研究区,1 500~2 100 m 随着海拔升高,温度下降,降水增多,植被类型更加丰富,凋落物种类及数量增多,土壤微生物活性减弱,有机质矿化速率减慢,使得有机碳积累量增加;而 2 100~2 400 m 土壤 SOC 含量减少,可能是由于气温过低,使得土壤微生物数量减少,土壤有机碳积累速率降低。因此,在一定海拔范围内,土壤有机碳含量随海拔增加而增加,当海拔达到一定高度后,土壤有机碳会由增加变为减少趋势。土壤 N 素主要来源于动植物残体的分解、植被根系的固氮作用和大气氮沉降^[19]。随海拔升高,有机质分解速度减缓,所需的氮素减少,氮素积累增加,有机碳含量也增加。该研究区土壤 TP 随海拔升高无显著变化,这与李丹维等^[11]在太白山的研究结果一致。研究表明,土壤 TP 含量高低大多受成土母质和成土作用影响^[20],短时期内随环境的变化较小,因此土壤 TP 随海拔变化空间变异较小。

3.2 不同海拔土壤碳、氮、磷生态化学计量特征 不同海拔土壤 C、N、P 生态化学计量值可以用作土壤养分限制和 C、N、P 饱和和诊断预测性指标^[21]。该研究区域不同海拔土壤 C/N 介于 8.37~12.09,其均值为 9.58,低于全国平均值(11.9)^[22];C/P 介于 68.28~112.03,其均值为 94.45,高于全国平均值(61)^[22];N/P 介于 5.68~12.65,其均值为 10.02,高于全国平均水平(5.2)^[22]。

有研究表明,土壤 C/N 越低,有机质分解速度越快;相反,土壤 C/N 越高,有机质分解速度越慢^[4]。该研究区土壤 C/N 低于全国平均值,说明该区域有机质矿化分解速率较高。随海拔升高,土壤 C/N 整体表现出降低的趋势,这与朱秋莲等^[4]的研究结果相同。这可能是由于随着海拔的升高,C、N 增加速率不一致,有机质矿化速度较快,释放氮素较多,导致 C/N 较低。王绍强等^[1]研究发现,不同土壤生态系统的 C/N 保持相对稳定,该研究中也呈现出此规律,土壤 C/N 变化范围较小,这是由于土壤 SOC 与 TN 之间存在显著的正



注:不同大写字母表示相同海拔不同土层间差异显著($P < 0.05$),不同小写字母表示相同土层不同海拔间差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different capital letters indicate significant differences between different soil layers at the same altitude ($P < 0.05$), while different lowercase letters indicate significant differences between different elevations of the same soil layer ($P < 0.05$).

图3 不同海拔土壤生态化学计量特征的垂直分布变化

Fig. 3 Vertical distribution changes of soil ecological stoichiometric characteristics at different altitudes

相关关系, C、N 作为有机质的结构性成分,二者的积累和消耗过程较为稳定。海拔 1 500 m 处 0~40 cm 土层与 40~60 cm 土层间 C/N 差异显著,1 800 m 处各土层间 C/N 差异显著,2 100~2 400 m 处不同土层深度 C/N 无显著差异。

土壤 C/P 可以作为判断土壤微生物矿化释放 P 或固持吸收 P 的指标^[23],较高的 C/P 是磷有效性低的表征^[1]。该研究区不同海拔土壤 C/P 均值高于全国平均值,说明该区域磷有效性较低,微生物分解释放磷的能力较弱,磷素缺乏,植物生长受到磷的限制。随海拔升高 C/P 呈现出先升高后下降的趋势,但各海拔差异不大,这与赵维俊等^[24]对祁连山青海云杉林土壤的研究结果一致。土壤 C/P 随土层加深而下降,这主要是由于随土层加深,微生物活性降低,有机质分解过程受到抑制,积累量减少,TP 较缺乏导致的。

土壤 N/P 可以用来判断土壤氮素是否饱和以及确定土壤养分限制的阈值^[23]。该研究区土壤 N/P 均值高于全国均值,表明研究区土壤氮素饱和,可以供植物生长发育。赵维俊等^[24]研究指出 N/P 高可能是由于研究区磷较少造成的,该研究中也发现类似的结果。随海拔升高,土壤 N/P 整体表现为增加的趋势,这与 Nottingham 等^[25]的研究结果相同。这可能是由于研究区土壤 TN 随海拔整体增加,而磷素缺乏导致的,这也恰恰说明磷为该区域土壤养分的限制性因子。土壤 N/P 随土层加深而下降,这可能与土壤氮素积累在土壤表面,而磷素在垂直方向上变化不大有关。

综上所述,不同海拔土壤碳、氮、磷及其生态化学计量特征存在差异。海拔不是直接影响土壤碳、氮、磷及其生态化学计量特征,而是通过气候、植被、生物、地形等因素来影响其变化。研究不同海拔土壤碳、氮、磷及其生态化学计量对于分析土壤养分状况和植物生长条件有重要意义,同时还可以为该区域生态环境保护提供理论依据。该研究仅研究了土壤碳、氮、磷及其生态化学计量特征,后续还需进一步深入研究土壤-植被-凋落物这个系统的碳、氮、磷及其生态化学计量。

4 结论

该研究对长白山以北区域不同海拔的土壤养分及其化学计量特征进行了初步分析,结果表明,不同土层土壤有机

碳、总氮含量随海拔上升总体均呈现出先升高后降低的趋势,而总磷含量无大幅度变化;海拔升高,各土层土壤 C/N 逐渐减小,C/P 无明显变化,N/P 整体呈升高趋势;各海拔处土壤有机碳、总氮、总磷以及其生态化学计量比在垂直剖面上存在明显差异,SOC、TN、TP、C/N、C/P 和 N/P 总体均呈降低趋势。

参考文献

- [1] 王绍强,于贵瑞.生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J].生态学报,2008,28(8):3937-3947.
- [2] 程滨,赵永军,张文广,等.生态化学计量学研究进展[J].生态学报,2010,30(6):1628-1637.
- [3] 朱平宗,张光辉,杨文利,等.红壤区林地浅沟不同植被类型土壤生态化学计量特征[J].水土保持研究,2020,27(6):60-65.
- [4] 朱秋蓬,邢肖毅,张宏,等.黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征[J].生态学报,2013,33(15):4674-4682.
- [5] 张晗,欧阳真程,赵小敏.不同利用方式对江西省农田土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响[J].环境科学学报,2019,39(3):939-951.
- [6] 李相楹,张维勇,刘峰,等.不同海拔高度下梵净山土壤碳、氮、磷分布特征[J].水土保持研究,2016,23(3):19-24.
- [7] ZHANG M, ZHANG X K, LIANG W J, et al. Distribution of soil organic carbon fractions along the altitudinal gradient in Changbai Mountain, China [J]. Pedosphere, 2011, 21(5): 615-620.
- [8] HE X J, HOU E Q, LIU Y, et al. Altitudinal patterns and controls of plant and soil nutrient concentrations and stoichiometry in subtropical China [J]. Scientific reports, 2016, 6: 1-9.
- [9] 张广帅,邓浩俊,杜银,等.泥石流频发区山地不同海拔土壤化学计量特征:以云南省小江流域为例[J].生态学报,2016,36(3):675-687.
- [10] 李新星,刘桂民,吴小丽,等.马街山不同海拔土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征[J].生态学杂志,2020,39(3):758-765.
- [11] 李丹维,王紫泉,田霞霞,等.太白山不同海拔土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征[J].土壤学报,2017,54(1):160-170.
- [12] 陈昊轩,刘欣蕊,孙天雨,等.太白山栎属树种叶片生态化学计量特征随海拔梯度的变化规律[J].生态学报,2021,41(11):4503-4512.
- [13] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [14] ELSER J J, BRACKEN M E S, CLELAND E E, et al. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems [J]. Ecology letters, 2007, 10(12): 1135-1142.
- [15] 韩华,王昊彬,余华光,等.崇明滩涂湿地不同盐度梯度下芦苇种群及土壤的生态化学计量学特征[J].长江流域资源与环境,2015,24(5):816-823.
- [16] 吕金林,闫美杰,宋变兰,等.黄土丘陵区刺槐、辽东栎林地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征[J].生态学报,2017,37(10):3385-3393.
- [17] CHEN X W, LI B L. Change in soil carbon and nutrient storage after human disturbance of a primary Korean pine forest in Northeast China [J]. Forest ecology and management, 2003, 186(1/2/3): 197-206.

支付区,商洛市、安康市、汉中市是主要的获补区。随着经济的快速发展,越来越多的城市由获补区逐渐演变为支付区;陕西省碳补偿总额不断提升,其中榆林市、渭南市碳补偿额度占比较多,这说明陕西省完成双碳目标实现低碳发展的任务仍然很艰巨。

3.2 讨论 基于研究结果,在未来城市实现低碳发展过程中需考虑以下几点策略:①加强对耕地、林地、草地等其他生态用地的保护。林草地发挥的碳汇作用不容忽视,因此,在碳汇较低的地区应提高植被覆盖度增加碳储量,碳汇较高的地区应实施严格的生态保护制度,保证碳汇能力不降低。②推广能源清洁利用和转化技术,从根本上减少碳排放量,转变能源利用结构,将以化石能源为主的高碳排能源利用结构转变为以可再生清洁能源为主的能源利用结构。③加快建立城市碳源和碳汇数据库,实现区域碳源和碳汇量速查,动态更新的碳排放数据是碳补偿机制建立的基础,也是实现双碳目标的重要途径。在双碳目标的引领下,未来城市的发展要同时兼顾社会、生态与经济效益,将探索低碳发展模式融入城市发展规划中。

需要说明的是,虽然该研究在改进区域碳补偿机制的基础上,对陕西省市域碳补偿额度进行了系统分析,进一步优化了碳补偿理论机制,但在测算陕西省各市(区)土地利用净碳排放量时,虽然选取的相关碳排放系数研究成果与陕西省自然条件较为相符,但是因为每个地区的能源排放强度、林地草地等植被覆盖密度,自然植被状况等均存在一定差异,可能对研究结果的精度造成影响。除此之外,由于数据限制,该研究未测算耕地利用过程中产生的碳源,也未考虑耕地撂荒、熟制差异对碳汇能力的影响。在今后的研究中应该注重建立可以实时监测的本地化碳排放因子,细化碳排放量的计算方法,这样计算出的结果精度才会更高,更具有政策指导意义。该研究从市域尺度上开展碳补偿研究,实质上,碳排放量和碳补偿额度核算可以尝试基于不同用地类型地块尺度开展,更微观的研究尺度可以使碳补偿研究具有更大的应用价值,更具操作性,另外可以对碳补偿未来趋势进行预测,提出更加有效的应对措施。

参考文献

[1] 刘志华,徐军委,张彩虹. 科技创新、产业结构升级与碳排放效率:基于省际面板数据的PVAR分析[J]. 自然资源学报,2022,37(2):508-520.
 [2] 习近平. 坚定信心共克时艰共建更加美好的世界:在第七十六届联合国大会一般性辩论上的讲话[J]. 中国产经,2021(19):8-11.
 [3] 王灿,张雅欣. 碳中和愿景的实现路径与政策体系[J]. 中国环境管理,2020,12(6):58-64.

[4] HOUGHTON R A. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850-1990[J]. Tellus B:Chemical and physical meteorology,1999,51(2):298-313.
 [5] GOLDEWIJK K K, RAMANKUTTY N. Land cover change over the last three centuries due to human activities: The availability of new global data sets[J]. GeoJournal,2004,61(4):335-344.
 [6] 赵荣钦,黄贤金. 基于能源消费的江苏省土地利用碳排放与碳足迹[J]. 地理研究,2010,29(9):1639-1649.
 [7] 崔宁波,生世玉,方袁意. 粮食安全视角下省际耕地生态补偿的标准量化与机制构建[J]. 中国农业大学学报,2021,26(11):232-243.
 [8] 陈儒,姜志德. 中国省域低碳农业横向空间生态补偿研究[J]. 中国人口·资源与环境,2018,28(4):87-97.
 [9] 郝春旭,赵艺柯,何明,等. 基于利益相关者的赤水河流域市场化生态补偿机制设计[J]. 生态经济,2019,35(2):168-173.
 [10] 马明娟,李强,周文瑞. 碳中和视域下黄河流域碳生态补偿研究[J]. 人民黄河,2021,43(12):5-11.
 [11] 吴立军,田启波. 碳中和目标下中国地区碳生态安全与生态补偿研究[J]. 地理研究,2022,41(1):149-166.
 [12] 周嘉,王钰莹,刘学荣,等. 基于土地利用变化的中国省域碳排放时空差异及碳补偿研究[J]. 地理科学,2019,39(12):1955-1961.
 [13] 赵荣钦,刘英,马林,等. 基于碳收支核算的河南省县域空间横向碳补偿研究[J]. 自然资源学报,2016,31(10):1675-1687.
 [14] 马远,刘真真. 黄河流域土地利用碳排放的时空演变及影响因素研究[J]. 生态经济,2021,37(7):35-43.
 [15] 万伦来,林春鑫,陈艺. 基于相对碳赤字的中国省际碳补偿时空格局研究[J]. 长江流域资源与环境,2020,29(12):2572-2583.
 [16] 刘燕华,李宇航,王文涛. 中国实现“双碳”目标的挑战、机遇与行动[J]. 中国人口·资源与环境,2021,31(9):1-5.
 [17] 张巍. 陕西省重点生态功能区碳汇/碳源核算与生态补偿研究[J]. 生态经济,2018,34(10):191-194.
 [18] 王雅敬,谢炳庚,李晓青,等. 长株潭经济圈土地利用变化的碳排放量及生态补偿研究[J]. 生态科学,2017,36(4):160-165.
 [19] 赵荣钦,刘英,李宇翔,等. 区域碳补偿研究综述:机制、模式及政策建议[J]. 地域研究与开发,2015,34(5):116-120.
 [20] 黄晶晶,李玲玲,徐琳瑜. 基于外溢生态系统服务价值的区域生态补偿机制研究[J]. 生态学报,2021,41(17):6994-7001.
 [21] 李璐,董捷,徐磊,等. 功能区土地利用碳收支空间分异及碳补偿分区:以武汉城市圈为例[J]. 自然资源学报,2019,34(5):1003-1015.
 [22] 曾德珩,李生萍,吴雅,郑倩倩. 重庆市五大功能区碳失衡及其对策[J]. 经济地理,2016,36(8):152-157.
 [23] 杨洁,谢保鹏,张德罡. 基于InVEST和CA-Markov模型的黄河流域碳储量时空变化研究[J]. 中国生态农业学报,2021,29(6):1018-1029.
 [24] 段晓男,王效科,逯非,等. 中国湿地生态系统固碳现状和潜力[J]. 生态学报,2008,28(2):463-469.
 [25] 田云,张俊颺,罗小锋. 中国种植业净碳效益与经济效益协调性区域比较研究[J]. 经济地理,2014,34(3):142-148.
 [26] 魏燕茹,陈松林. 福建省土地利用碳排放空间关联性与碳平衡分区[J]. 生态学报,2021,41(14):5814-5824.
 [27] 董梅,李存芳. 低碳省区试点政策的净碳减排效应[J]. 中国人口·资源与环境,2020,30(11):63-74.
 [28] FANG G C, TIAN L X, LIU M G, et al. How to optimize the development of carbon trading in China—Enlightenment from evolution rules of the EU carbon price[J]. Applied energy,2018,211:1039-1049.
 [29] 王刚,张华兵,薛菲,等. 成都市县域土地利用碳收支与经济发展关系研究[J]. 自然资源学报,2017,32(7):1170-1182.
 [30] 莫惠斌,王少剑. 黄河流域县域碳排放的时空格局演变及空间效应机制[J]. 地理科学,2021,41(8):1324-1335.

(上接第52页)

[18] 张继平,张林波,王凤玉,等. 井冈山国家级自然保护区森林土壤养分含量的空间变化[J]. 土壤,2014,46(2):262-268.
 [19] 张秋芳,陈奶寿,陈坦,等. 不同恢复年限侵蚀红壤生态化学计量特征[J]. 中国水土保持科学,2016,14(2):59-66.
 [20] 刘超,王洋,王楠,等. 陆地生态系统植被氮磷化学计量研究进展[J]. 植物生态学报,2012,36(11):1205-1216.
 [21] HOBBIE S E, GOUGH L. Foliar and soil nutrients in tundra on glacial landscapes of contrasting ages in northern Alaska[J]. Oecologia,2002,131(3):453-462.

[22] TIAN H Q, CHEN G S, ZHANG C, et al. Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils: A synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry,2010,98(1/2/3):139-151.
 [23] 曾全超,李鑫,董扬红,等. 陕北黄土高原土壤性质及其生态化学计量的纬度变化特征[J]. 自然资源学报,2015,30(5):870-879.
 [24] 赵维俊,刘贤德,金铭,等. 祁连山青海云杉林叶片-枯落物-土壤的碳氮磷生态化学计量特征[J]. 土壤学报,2016,53(2):477-489.
 [25] NOTTINGHAM A T, TURNER B L, WHITAKER J, et al. Soil microbial nutrient constraints along a tropical forest elevation gradient: A below-ground test of a biogeochemical paradigm[J]. Biogeosciences discussions,2015,12(8):6489-6523.