

# 黄土丘陵区不同土地利用方式土壤碳氮磷及其生态化学计量特征

白一茹<sup>1,2</sup>, 张兴<sup>1,2</sup>, 包维斌<sup>1,2</sup>, 王幼奇<sup>1,2</sup>, 赵云鹏<sup>1,2</sup>

(1. 宁夏大学资源环境学院, 宁夏 银川 750021; 2. 旱区特色资源与环境治理教育部国际合作联合实验室, 宁夏 银川 750021)

**摘要:**以陕北米脂谷子、苜蓿、柠条和枣树4种不同土地利用方式土壤为研究对象,采集0~100 cm土层土壤样品,采样数共288个,分别对样品土壤的C、N、P及其生态化学计量比C/N、C/P和N/P进行了研究。结果表明:黄土丘陵区土壤C、N、P含量均值分别为2.12、0.21 g·kg<sup>-1</sup>和0.43 g·kg<sup>-1</sup>;C/N、C/P和N/P均值分别为10.83、5.0和0.48;土壤C、N、P及C/N、C/P和N/P的变异系数均大于10%且小于100%,属于中等变异。土地利用方式对土壤C、N、P含量及其生态化学计量特征有显著影响,其中谷子地0~20 cm土层土壤C含量显著高于柠条地和枣树林( $P<0.05$ ),谷子地20~40 cm土层的C含量显著高于苜蓿地( $P<0.05$ );0~20、20~40 cm和60~80 cm土层谷子地N含量显著高于柠条地( $P<0.05$ );苜蓿地P含量在0~20、60~80 cm和80~100 cm土层显著高于柠条地( $P<0.05$ )。谷子地、苜蓿地和枣树林土壤C、N呈表聚性分布,而柠条地随深度增加无明显降低,表明柠条地有较好的固碳能力。各土层C/N在不同土地利用方式间存在显著差异( $P<0.05$ ),其中柠条地最高,谷子地最低;80~100 cm土层土壤C/P在柠条地和苜蓿地间具有显著差异( $P<0.05$ )。0~20 cm和20~40 cm土层深度下,土壤N/P在不同土地利用方式之间具有显著差异( $P<0.05$ ),其中谷子地最高,柠条地最低。通过典型相关分析得出,土壤C、N、C/P和N/P与环境因子中的土层深度、粘粒含量和土壤pH值的累积关系较大。

**关键词:**土地利用方式;土壤碳、氮、磷;化学计量;环境因子;典型相关分析

**中图分类号:**S153.6<sup>+1</sup> **文献标志码:**A

## The soil carbon, nitrogen, and phosphorus contents and their stoichiometry under different land uses in loess hilly region

BAI Yi-ru<sup>1,2</sup>, ZHANG Xing<sup>1,2</sup>, BAO Wei-bin<sup>1,2</sup>, WANG You-qi<sup>1,2</sup>, ZHAO Yun-peng<sup>1,2</sup>

(1. College of Resources and Environment, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;

2. China-Arab Joint International Research Laboratory for Featured Resources and Environmental Governance in Arid Regions, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

**Abstract:** Land use change will break the balance of carbon (C), nitrogen (N), phosphorus (P) in ecosystem, thus affecting the mineralization, transportation, absorption and utilization of C, N, and P elements in soil. There were 288 soil samples collected from the 0~100 cm soil layer in millet, alfalfa, caragana, and jujube land to study soil C, N, and P contents and their stoichiometry of C/N, C/P, and N/P. The results showed that the average soil C, N, and P contents were 2.12, 0.21 g·kg<sup>-1</sup> and 0.43 g·kg<sup>-1</sup>, respectively, which indicated poor nutrient status. The mean values of soil C/N, C/P, and N/P were 10.83, 5.0, and 0.48, respectively. Variation coefficients of SOC, TN, TP, C/N, C/P, and N/P were between 10% and 100%, indicating moderate variation. The results showed that land use had remarkable effect on soil C, N, P, C/N, C/P, and N/P. The 0~20 cm soil C content of millet land was significantly higher than that of jujube and caragana land ( $P<0.05$ ). The 20~40 cm soil C content of millet land was significantly higher than that of alfalfa land ( $P<0.05$ ). The soil N contents of 0~

收稿日期:2018-04-11

修回日期:2018-09-12

基金项目:国家自然科学基金(41761049,41867003);宁夏高等学校项目(NGY2017015);宁夏自然科学基金(2018AAC03027);宁夏重点研发计划重大项目(2018BFG02016);宁夏青年科技人才托举工程项目

作者简介:白一茹(1984-),女,陕西渭南人,博士,副教授,主要从事土壤与环境生态方面研究。E-mail:yr0823@163.com

通信作者:王幼奇(1980-),男,安徽泾县人,博士,副教授,主要从事旱区环境变化方面研究。E-mail:wyq0563@163.com

20, 20~40, and 60~80 cm layers of millet land were significantly higher than that of caragana land ( $P<0.05$ ). The soil P contents of 0~20, 60~80, and 80~100 cm layers from alfalfa land were significantly higher than that of caragana land ( $P<0.05$ ). The soil C and N of jujube, alfalfa, and millet land tended to distribute in surface soil. The soil C and N of caragana land scarcely decreased as the soil depth increased, which indicated high ability of carbon fixation capacity. There were significant differences in C/N among different land uses ( $P<0.05$ ) with highest value in caragana land soil and the lowest value in millet land. The C/P under 80~100 cm soil layer was significantly different between caragana land and alfalfa land ( $P<0.05$ ). There were significant differences for 0~20 and 20~40 cm N/P among different land uses ( $P<0.05$ ) with the highest value in millet land and the lowest value in caragana land. The canonical correlation analysis showed that soil C, N, C/P, and N/P were significantly related to environmental factors such as soil depth, clay content, and soil pH.

**Keywords:** land use mode; soil carbon, nitrogen and phosphorus; stoichiometry; environmental factor; canonical correlation analysis

土壤 C、N、P 是土壤养分的核心,其含量的多少会影响土壤中微生物数量、凋落物再分配过程及土壤养分的长期积累<sup>[1]</sup>。C、N、P 循环过程相互耦合,在生物地球化学循环过程中 C、N、P 的变化会影响土壤 C 平衡,其决定着陆地生态系统 C 源和 C 汇功能,与此同时 N 和 P 是植物生长的主要限制因子,因此研究土壤 C、N、P 的平衡关系对于探索陆地生态系统养分限制和养分循环规律具有重要意义<sup>[2-4]</sup>。土壤 C、N、P 化学计量比可揭示 C、N、P 元素间的交互作用及平衡制约关系,是生态化学计量学的重要内容,也是研究植被—土壤相互作用与养分循环的新思路<sup>[5-7]</sup>。

土地利用方式是人类利用土地各种活动的综合反映,不同土地利用方式下耕作措施和水肥管理的不同会影响进入土壤的肥料、动植物残体和土壤微生物数量及性质,造成土壤 C、N、P 元素的矿化、运输和吸收利用等差异<sup>[1,8-9]</sup>。在黄土高原丘陵区,Chen 等<sup>[10]</sup>发现农地转为林草地,土壤 C 会增加,并且转为灌木林地或野生草地比转化为人工林更有利于 C 的固存。在亚热带丘陵区,杨文等<sup>[11]</sup>发现 C/N、C/P、N/P 高值区主要分布在人为干扰少和肥料使用少的林地区,而低值区主要分布在人类活动频繁以及化肥施用量大的农田区。在闽江河口湿地,王维奇等<sup>[12]</sup>研究得出土壤养分比值随干扰程度的增大而减少,其中弃耕地的 C/N、C/P、N/P 高于有翻耕和施肥影响的耕地,芦苇沼泽 C/N、C/P、N/P 高于池塘养殖地。在川中丘陵区,罗由林等<sup>[13]</sup>发现随着时间推移,水田、旱地、园地和林草地土壤 C/N、C/P、N/P 均有不同程度上升,其中旱地土壤 C、N、P 关系变化相对稳定而园地 C、N、P 比例关系显著改善,呈良性发展。可以看出土地利用方式的改变会影响陆地生态系统原有的 C、N、P 循环,不合理

的土地利用方式会造成土壤 C、N、P 元素的损失,且损失程度取决于干扰强度。

黄土丘陵区自然条件恶劣,植被覆盖度低,土壤侵蚀严重,生态环境脆弱,合理有效的植被恢复是治理该区水土流失和改善生态环境的根本措施<sup>[11,14]</sup>。研究土壤生态化学计量特征有助于了解植被建设过程中养分的循环和再分布规律,进而对植被恢复的合理调控提供科学建议。虽然已有较多研究关注黄土高原地区不同土地利用方式土壤 C、N、P 状况<sup>[1,5,9]</sup>,但关于土壤生态化学计量特征的研究较为缺乏。本文以黄土丘陵区谷子、苜蓿、柠条和枣树 4 种典型土地利用方式为研究对象,通过测定 0~100 cm 土层土壤 C、N、P 含量,比较分析不同土地利用方式下土壤 C、N、P 垂直分布特征,探讨土地利用方式对土壤生态化学计量特征的影响,为促进生态化学计量学理论的发展和完善提供数据参考,对生态环境保护具有积极参考价值和指导意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

采样区位于陕西省米脂县(109.47°E,37.18°N),平均海拔 1 049 m,为典型的黄土高原丘陵沟壑区,属于中温带半干旱性气候。全年年平均降雨量 400 mm 左右,主要集中在 7—9 月份,昼夜温差大,温度变化范围为 -25℃~38℃,多年平均气温 8.5℃。日照时间 8.35 h,平均风速 1.19 m·s<sup>-1</sup>,平均相对湿度为 60%。土壤以黄土母质上发育的黄绵土为主,质地为粉壤土。地形条件复杂,水土流失严重,沟壑密度 3~6 km·km<sup>-2</sup>,土壤侵蚀模数 1.8 万 t·km<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。植被属森林草原植被带,天然草类主要有白草(*Ennisetum centrasiticum*)、地椒(*Thymus mongolicus* Ronn.)、狗尾草(*Setaria viridis* L. Beauv.)等,天然乔灌

木零星分布,人工植被有柠条(*Caragana Korshinskii* Kom.)、沙柳(*Salix cheilophila*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)等,常见的经果林主要有枣(*Ziziphus jujube* Mill.)、杏(*Armeniaca vulgaris* Lam.)、桃(*Amygdalus persica* L.)、梨(*Pyrus spp*)等。

### 1.2 样品采集与指标测定

在研究区内,根据植被调查状况,选取4种典型土地利用方式的坡面:谷子、苜蓿、柠条和枣树,其中苜蓿生长年限为8 a,柠条为20 a,枣树为12 a,坡向均为南偏东,地形概况见表1。在每个坡面的上坡、中坡和下坡三个不同位置,分别布设4个采样点,每种土地利用方式12个采样点,每个采样点深度0~10、10~20、20~40、40~60、60~80 cm和80~100

cm处用土钻采集土壤样品4个,混合均匀后利用四分法保留约1 kg土样,样品总数为288个。土样经风干、剔除杂质后研磨过100目筛备用。土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾氧化法;全氮(TN)采用半微量开氏法;全磷(TP)采用酸溶钼锑抗比色法测定<sup>[15]</sup>。

### 1.3 数据分析

利用SPSS 18.0软件进行数据处理,利用Sigmaplot 10.0软件进行制图,利用Canoco 4.5软件进行典型相关分析,采用单因素方差分析法(one-way ANOVA)和多重比较检验中的最小显著性差异法(LSD)比较不同土地利用方式间的差异,采用Pearson相关系数评价不同指标间的相关性。C/N、C/P和N/P均采用质量比。

表1 样地植被和地形概况

Table 1 The vegetation and topography status of the sample positions

样地 Sample	经度 Longitude	纬度 Latitude	高程 Elevation/m	坡度 Slope	土地利用方式 Land use	主要植被群落 Main vegetation community
谷子 Millet	110.23°	37.80°	1260	9°	农地 Farmland	谷子 Millet
苜蓿 Alfalfa	110.23°	37.81°	1260	21°	草地 Grassland	苜蓿、长芒草、沙柳 Alfalfa, <i>Stipa bungeana</i> , <i>Salix mongolica</i>
柠条 Caragana	110.22°	37.53°	1267	19°	灌木 Shrubland	柠条、长芒草、胡枝子 Caragana, <i>Stipa bungeana</i> , <i>Lespedeza bicolor</i>
枣树 Jujube	110.23°	37.78°	1245	15°	林地 Woodland	枣树 Jujube

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤C、N、P及其化学计量特征统计分析

表2是288个样品的土壤性质统计特征值,可以看出黄土丘陵区土壤C、N、P含量均比较低,其平均值分别为2.12、0.21、0.43 g·kg<sup>-1</sup>,说明采样区土壤养分贫瘠。C/N、C/P和N/P的均值分别为10.83、5.0和0.48,变化范围分别为5.07~26.33、1.77~12.22和0.15~1.47。变异系数可以反映出土壤性质在不同空间位置分布的离散程度,在表2中,土壤C、N、P、C/N、C/P和N/P的变异系数均大于10%且小于100%,属于中等程度变异,受土地利用类型、灌溉、施肥等因素影响明显。

### 2.2 不同土地利用方式下土壤C、N、P垂直分布特征

通过图1可以得出,10~20 cm和20~40 cm土层深度下,谷子地土壤C含量最高,其均值分别比苜蓿地高23.0%,比柠条地高33.1%,比枣树林高28.0%。谷子地0~20 cm土层土壤C含量与柠条地和枣树林差异显著( $P<0.05$ ),谷子地20~40 cm土层土壤C含量与苜蓿地差异显著( $P<0.05$ ),0~20 cm和20~40 cm土层土壤C含量在其它3种土地利用方式之间差异不显著( $P>0.05$ )。40~60、60~80 cm和80~100 cm深度下,4种土地利用方式土

壤C含量虽有不同,但差异均不显著( $P>0.05$ )。土壤C含量随土层增加有降低趋势,其中不同土层间苜蓿地( $F_{4,10}=12.198, P<0.001$ )和谷子地( $F_{4,10}=4.007, P<0.05$ )C含量差异显著,柠条地( $F_{4,10}=0.644, P>0.05$ )和枣树林( $F_{4,10}=0.651, P>0.05$ )无显著性差异。

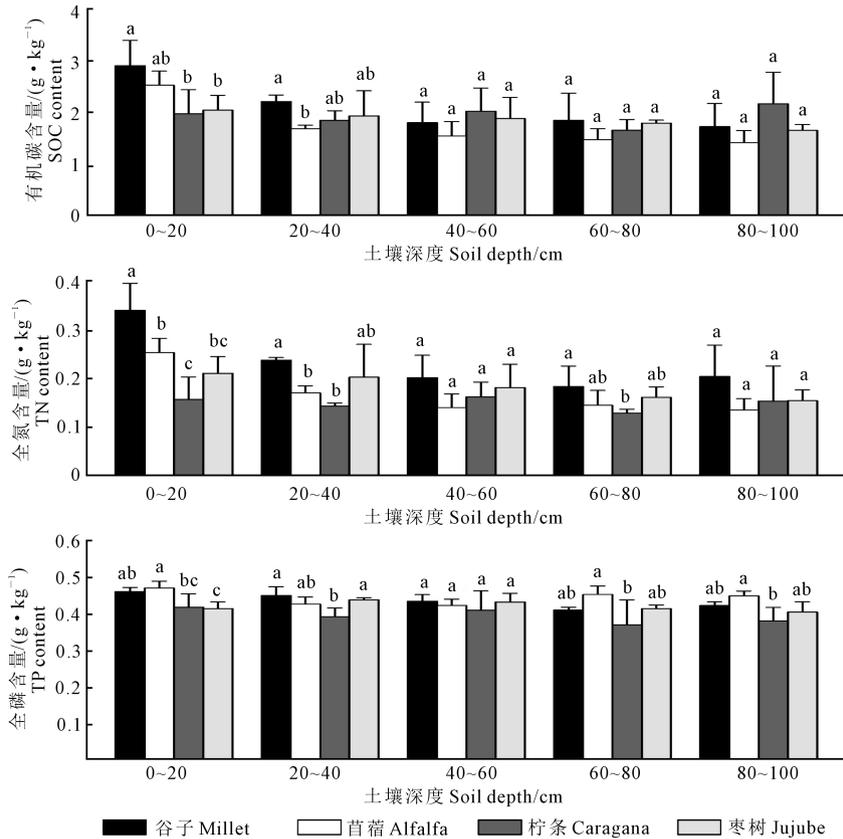
0~20、20~40 cm和60~80 cm土层深度下,土壤N含量谷子地最高,柠条地最低。谷子地各深度N含量均值分别比苜蓿地高36.78%,比柠条地高90.82%( $P<0.05$ ),比枣树林高39.26%。40~60 cm和80~100 cm土层土壤N含量在4种土地利用方式之间差异不显著( $P>0.05$ )。与C含量一致,土壤N含量随土层增加有降低趋势,不同土层之间N含量同样也是苜蓿地( $F_{4,10}=10.800, P<0.001$ )和谷子地( $F_{4,10}=5.28, P<0.05$ )差异显著,柠条地( $F_{4,10}=0.311, P>0.05$ )和枣树林( $F_{4,10}=1.009, P>0.05$ )无显著性差异。

各土层的P含量在不同土地利用类型之间差异性较小,谷子地和苜蓿地较高,柠条地和枣树林较低,其中苜蓿地和柠条地在0~20、60~80 cm和80~100 cm土层存在显著差异( $P<0.05$ )。随着土层加深,除了谷子地( $F_{4,10}=5.408, P<0.05$ )外,其他3种土地利用方式的土壤P含量在不同土层之间差异不显著( $P>0.05$ )。

表 2 采样点土壤性质统计特征值及其化学计量特征

Table 2 Statistic characteristics of soil properties and its characteristics of stoichiometry in the study area

土壤性质 Soil property	样本数 Number	平均值 Mean	最大值 Max.	最小值 Min.	标准误 SE	标准差 SD	变异系数 CV/%
有机碳 SOC/(g · kg <sup>-1</sup> )	288	2.12	5.38	0.67	0.05	0.89	41.98
全氮 TN/(g · kg <sup>-1</sup> )	288	0.21	0.68	0.06	0.006	0.10	47.62
全磷 TP/(g · kg <sup>-1</sup> )	288	0.43	0.85	0.26	0.003	0.06	13.95
C/N	288	10.83	26.33	5.07	0.18	3.03	27.98
C/P	288	5.00	12.22	1.77	0.12	2.05	40.98
N/P	288	0.48	1.47	0.15	0.01	0.22	45.12



注:误差线为标准误( $n=3$ );误差线上的不同字母表示同一土壤深度不同土地利用方式间差异显著性( $\alpha=0.05$ )。下同。

Note: The error line is the standard error ( $n=3$ ). Different letters in the same column mean significantly different at 0.05 level among different land uses. The same below.

图 1 不同土地利用方式下土壤 C、N、P 含量的垂直分布

Fig.1 Vertical distribution of soil C, N, and P contents in different land use types

### 2.3 不同土地利用方式对土壤生态化学计量特征的影响

不同土地利用方式造成土壤 C、N、P 含量的差异,进而影响土壤生态化学计量特征。C/N 是土壤质量的敏感指标,而且会影响土壤中 C、N 循环<sup>[16]</sup>。土壤 C/P 是指示 P 有效性的重要指标<sup>[6]</sup>,而 N/P 是当前限制性养分判断的重要指标之一。图 2 中各土层 C/N 在不同土地利用方式之间具有显著差异( $P<0.05$ ),其中柠条地最高,谷子地最低,柠条地 0~100 cm 土层 C/N 均值比谷子地高 44.82%,比苜

蓿地高 27.12%,比枣树林高 26.70%。4 种土地利用方式土壤 C/N 在不同土层之间差异均不显著( $P>0.05$ ),平均值为 10.72,变化范围为 7.23~19.02。

除 80~100 cm 土层土壤 C/P 在柠条地和苜蓿地之间具有显著差异( $P<0.05$ )外,其它各土层 C/P 在 4 种土地利用方式之间差异均不显著( $P>0.05$ ),其中谷子地和柠条地的 C/P 较高。苜蓿地 C/P 随土壤深度的增加而显著降低( $F_{4,10}=8.455, P=0.003$ ),其它 3 种土地利用方式的 C/P 在不同土层之间无显著差异( $P>0.05$ )。

0~20 cm 和 20~40 cm 土层深度下,土壤 N/P 在不同土地利用方式之间具有显著差异 ( $P < 0.05$ ), 谷子地最高,柠条地最低,谷子地 N/P 0~40 cm 土层均值比柠条地高 71.0%,比苜蓿地高 35.1%,比枣树林高 30.7%。40~60,60~80 cm 和 80~100 cm 深度下,4 种土地利用方式的土壤 N/P 差异均不显著 ( $P > 0.05$ )。与 C/P 类似,苜蓿地 N/P 随土壤深度的增加而显著降低 ( $F_{4,10} = 8.221, P = 0.003$ ),其它 3 种土地利用方式的 N/P 在不同土层之间无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

### 2.4 土壤有机 C、全 N、全 P 及其生态化学计量比与环境因子的相关性

从表 3 可以看出,土壤 C 与 N、C/P 和 N/P 具

有极显著正相关性 ( $P < 0.01$ ),与 P 和 C/N 相关性不显著 ( $P > 0.05$ )。土壤 N 与 P、C/P 和 N/P 具有极显著正相关性 ( $P < 0.01$ ),与 C/N 具有极显著负相关性 ( $P < 0.01$ )。土壤 P 与 C/N 呈现极显著负相关关系 ( $P < 0.01$ ),与 C/P 和 N/P 相关性不显著 ( $P > 0.05$ )。C/N 和 N/P 呈现极显著负相关关系 ( $P < 0.01$ ),与 C/P 相关性不显著 ( $P > 0.05$ )。C/P 和 N/P 呈现极显著正相关关系 ( $P < 0.01$ )。

设环境因子为变量  $x$ ,其中土壤深度为  $x_1$ 、土地利用方式为  $x_2$ 、粘粒含量为  $x_3$ 、土壤 pH 值为  $x_4$ ;土壤生态化学计量学特征为变量  $y$ ,其中 C 为  $y_1$ ,N 为  $y_2$ ,P 为  $y_3$ ,C/N 为  $y_4$ 、C/P 为  $y_5$ ,N/P 为  $y_6$ ,应用典型相关分析法对二者之间的关系进行分析,如图 3

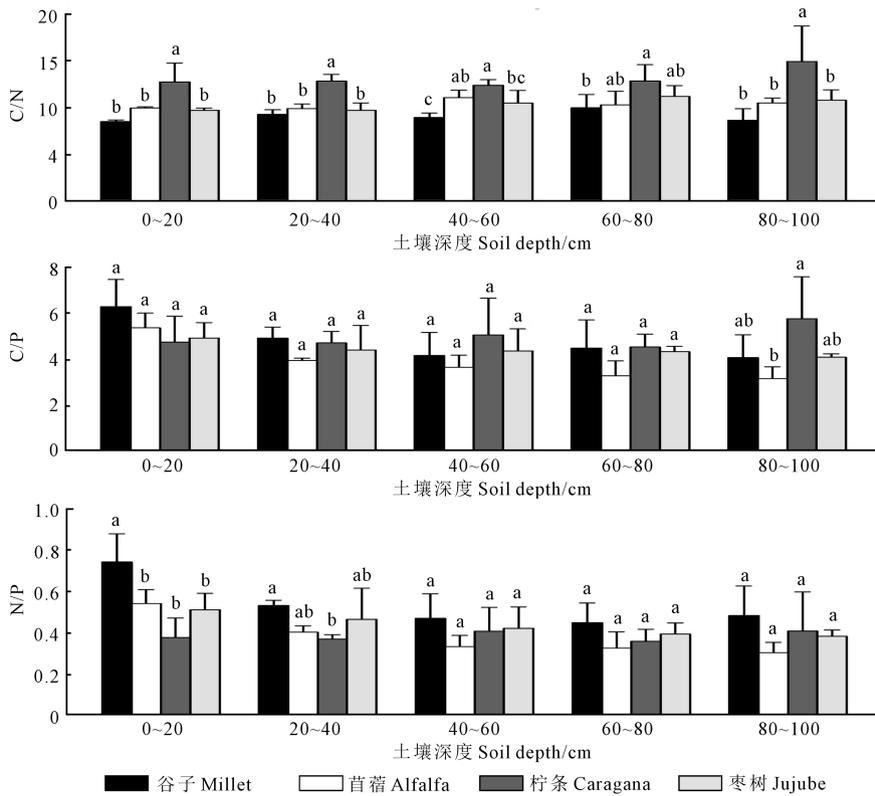


图 2 不同土地利用方式下土壤 C/N、C/P 和 N/P 的垂直格局

Fig.2 Vertical patterns of C/N, C/P, and N/P for different land use types

表 3 土壤 C、N、P 及其化学计量特征相关性分析

Table 3 The correlation analysis between soil carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) contents and its characteristics of stoichiometry

土壤性质 Soil property	SOC	TN	TP	C/N	C/P	N/P
SOC	1					
TN	0.858**	1				
TP	0.130	0.392**	1			
C/N	-0.108	-0.581**	-0.563**	1		
C/P	0.926**	0.676**	-0.246	0.130	1	
N/P	0.883**	0.970**	0.162	-0.490**	0.788**	1

注: \*\* 在 0.01 水平上显著相关。

Note: \*\* means significant correlation at 0.01 level.

所示,得到 4 组典型变量,其中第一组相关系数  $\lambda_1 = 0.884^*$ ,第二组相关系数  $\lambda_2 = 0.702$ ,第三组相关系数  $\lambda_3 = 0.638$ ,第四组相关系数  $\lambda_4 = 0.178$ ,只有第一组相关系数达到显著水平,提取其典型变量数据进行分析,其中  $U$  表示环境因子综合指数, $V$  表示土壤 C、N、P 的综合含量。由于数据单位不统一,通过换算的标准变量的典型相关系数分析土壤生态化学计量学特征与环境因子之间的相关关系,第一组典型变量的标准化线性组合为:  $U_1 = -0.472x_1 + 0.031x_2 - 0.417x_3 - 0.454x_4$ ;  $V_1 = 24.789y_1 - 38.730y_2 + 0.726y_3 + 4.036y_4 - 25.850y_5 + 37.733y_6$ 。在  $U_1$  各系数中起决

定性作用的环境因子是土壤深度、粘粒含量和土壤 pH 值,在  $V_1$  各系数中起决定性作用的是 C、N、C/P 和 N/P,说明土壤 C、N、C/P 和 N/P 与环境因子中的深度、粘粒含量和土壤 pH 值的累积关系较大。

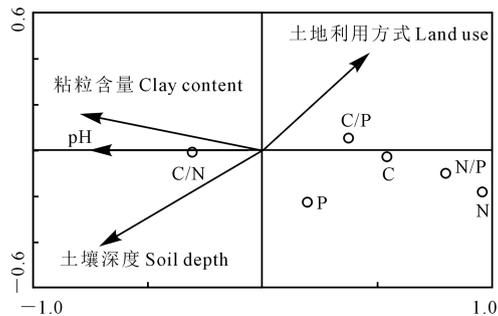


图 3 土壤 C、N、P 及其生态化学计量学特征与环境因素之间的典型相关关系

Fig.3 Canonical correlations of soil carbon (C), nitrogen (N), phosphorus (P) and its characteristics of stoichiometry and environmental factors

## 3 讨论

### 3.1 研究区土壤 C、N、P 含量及其化学计量特征

研究区属于典型黄土高原丘陵沟壑区,根据全国第二次养分普查分级标准<sup>[17]</sup>,研究区土壤 C 和 N 属于六级,土壤 P 属于四级,说明研究区土壤肥力水平偏低。分析原因主要由于气候、地形地貌和人类活动影响导致土壤沙化严重,土壤颗粒组成中细颗粒逐渐减少,粗颗粒逐渐占据优势,而有机质随着细粒物质的侵蚀而损失,同时沙化过程会导致地表植被盖度降低,有机物来源减少,矿化分解作用强烈,土壤养分难以累积<sup>[18-19]</sup>。Tian 等<sup>[20]</sup>研究发现,我国土壤 C/N、C/P、N/P 的原子数比值分别为 11.9、61、5.2。而研究区土壤 C/N、C/P、N/P 换算后的原子数比值分别为 11.78、12.74、1.08, C/N 接近我国平均水平,而 C/P 和 N/P 均比我国平均水平低了 4.8 倍。研究区较低的 C/P 和 N/P,也说明研究区土壤呈现出 C 和 N 的缺乏,严重制约植被的生长。朱秋莲等<sup>[21]</sup>研究黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征,也得出相似的结论。

### 3.2 土地利用方式对土壤 C、N、P 的影响

土地利用方式对土壤 C、N、P 含量有显著影响。研究区谷子地的土壤 C、N 含量显著高于其它 3 种土地利用方式 ( $P < 0.05$ ), P 含量在不同土地利用方式之间差异不显著 ( $P > 0.05$ )。但也有研究者提出农田养分含量低于林草地,如张帅等<sup>[22]</sup>和周正虎等<sup>[23]</sup>。研究结果的差异一方面是由于研究区农田长期施肥(以氮肥为主)增加了土壤 N 的积累和 C

的固存,另一方面黄土丘陵区养分循环受土地利用类型和利用年限等因素影响较大,林灌草的 C 固存是长期过程,要在退耕 35 a 后才会表现出显著的 C 增汇效应<sup>[24]</sup>,而研究区苜蓿、枣树和柠条退耕年限大约 10~15 a,此年限的林草地养分状况差于农地。

土壤 C、N、P 含量的垂直分布格局在不同土地利用方式之间也有明显差异。苜蓿地的 C、N 含量随土层深度的加深降低幅度最大,这与苜蓿的根系分布特征有关。郭正刚等<sup>[25]</sup>研究发现苜蓿在 0~50 cm 土层深度具有发达的侧根系,93% 以上的根系生物量都分布在 50 cm 以上的土层,而且苜蓿具有豆科植物的固氮能力,长期种植可以避免土壤扰动,促进土壤 C 和 N 在土壤表层的累积<sup>[26]</sup>。柠条土壤 C、N 含量随土层深度变化不显著,这与其他几种土地利用方式下土壤 C、N 含量的表聚性分布不同。原因在于人工柠条林是黄土丘陵区植被恢复的深根系植被,根系生物量在 100~400 cm 土层高于其他人工植被,发达的根系会提高土壤深层 C 储量,且随恢复年限的增加,深层土壤 C 储量增加更明显<sup>[27]</sup>。因此,不同植被群落的根系活动和分布特征影响土壤 C、N 的吸收强度和深度,从而导致土壤 C、N 的垂直分布特征在不同土地利用方式间存在显著差异<sup>[28]</sup>。土壤 P 含量的垂直变化格局与土壤 C、N 不同,其随深度增加变化不显著,在黄河三角洲不同湿地,张森等<sup>[29]</sup>也得出相似结论。这是因为土壤 P 主要来源于岩石风化,是沉积型矿物,迁移性差,其含量大小主要取决于立地的地质特征,而受土地利用影响较小<sup>[23]</sup>。

### 3.3 土地利用方式对土壤 C/N、C/P、N/P 的影响

土地利用方式的差异不仅会影响土壤养分状况,同时会明显影响土壤 C、N、P 的生态化学计量特征。研究区 C/N 的变异系数为 27.98,而 C/P 和 N/P 变异系数分别为 40.98% 和 45.12%,说明研究区 C/P 和 N/P 有更高的变异性。这是因为 C/P 和 N/P 受土地利用方式、地形、气候、土壤等因素影响较大,呈现出较高的变异性<sup>[1,10,30]</sup>。

研究区土地利用方式对土壤 C/N、C/P、N/P 有明显影响,其中柠条地的土壤 C/N 显著高于其它土地利用方式 ( $P < 0.05$ )。杨文等<sup>[11]</sup>在亚热带丘陵小流域也得出土壤 C/N、C/P、N/P 高值区主要分布在人为干扰少和肥料使用少的林地区,而低值区主要分布在人类活动频繁以及化肥施用量大的农田区。王维奇等<sup>[12]</sup>在河口湿地、朱秋莲等<sup>[21]</sup>在黄土丘陵沟壑区和曾全超等<sup>[31]</sup>在黄土高原延河流域,均发现随干扰程度的增大,土壤 C、N、P 的生态化学计量比

减小。研究区谷子地受人为干扰强度大,经常翻耕、施肥和季末收获且无枯落物返还,苜蓿地地上部分收割,枣树林的除草和收获,这两者人为干扰强度也较大,而柠条地基本不受人干扰,因此研究区土壤 C/N 表现为柠条地最大,谷子地最小。土壤 C/N 与土壤有机质分解速率成反比,其高值指示良好的碳固存潜力,研究区人工柠条林高 C/N 表明其具有良好的生态效益和固碳能力。

土地利用方式对土壤 C/N、C/P、N/P 的垂直变化也有不同程度影响。本研究中土壤 C/N 随土层加深呈现增加的趋势,且柠条地的增加趋势最显著,说明研究区深层土壤具有较高的碳固存潜力。Hamer 等<sup>[32]</sup>和周正虎等<sup>[23]</sup>也研究发现了 C/N 随土层加深而增加的垂直分布格局。谷子地、苜蓿地和枣树林土壤 C/P 和 N/P 随土层加深呈现降低的趋势,这是由于土壤 C、N 有明显的表层聚集现象,而 P 素随土层变化较小导致的,说明土壤 C/P 和 N/P 随深度的变化分别取决于 C 和 N 含量的分布。Tian 等<sup>[20]</sup>分析我国各区域土壤 C/P 和 N/P 的垂直变化特征也得出相似结论。

总之,人类活动对全球 C、N、P 循环的干扰不断改变其相对有效性,利用土壤 C、N、P 的生态化学计量比这样易获取的生态参数可以预测生态系统 C、N、P 的平衡趋势,有助于探索陆地生态系统养分限制和养分循环规律<sup>[33-34]</sup>。

## 4 结 论

1) 研究区土壤 C、N、P 含量均值分别为 2.12、0.21 g · kg<sup>-1</sup> 和 0.43 g · kg<sup>-1</sup>, 属于低肥区。谷子地的土壤 C、N 含量显著高于其它 3 种土地利用方式 ( $P < 0.05$ ), P 含量在不同土地利用方式之间差异不显著 ( $P < 0.05$ )。谷子地 0~20 cm 土层土壤 C 含量显著高于柠条地和枣树林 ( $P < 0.05$ ), 谷子地 20~40 cm 土层土壤 C 含量显著高于苜蓿地 ( $P < 0.05$ )。0~20、20~40 cm 和 60~80 cm 土层谷子地的 N 含量显著高于柠条地 ( $P < 0.05$ )。各土层的 P 含量在不同土地利用方式之间差异较小。

2) C/N、C/P 和 N/P 的均值分别为 10.83、5.0 和 0.48, 其中 C/N 接近全国均值, 而 C/P 和 N/P 明显较低。各土层 C/N 在不同土地利用方式之间具有显著差异 ( $P < 0.05$ ), C/N 均值为柠条地 (13.12) > 枣树林 (10.36) > 苜蓿地 (10.32) > 谷子地 (9.06), 说明研究区 C/N 随干扰程度的增大而降低。而土壤 C/P 和 N/P 在不同土地利用方式之间差异较小, 仅在个别土层呈现出显著差异。

3) Pearson 相关系数表明土壤 C 与 N、C/P 和 N/P 具有极显著正相关性 ( $P < 0.01$ ); N 与 P、C/P 和 N/P 具有极显著正相关性 ( $P < 0.01$ ), 与 C/N 具有极显著负相关性 ( $P < 0.01$ ); P 与 C/N 呈现极显著负相关性 ( $P < 0.01$ ), C/P 和 N/P 呈现极显著正相关性 ( $P < 0.01$ )。典型相关系数表明土壤 C、N、C/P 和 N/P 与环境因子中的土层深度、粘粒含量和土壤 pH 值的累积关系较大。

## 参 考 文 献:

- [1] 赵彤, 闫浩, 蒋跃利, 等. 黄土丘陵区植被类型对土壤微生物量碳氮磷的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5615-5622.
- [2] Hartman W H, Richardson C J. Differential nutrient limitation of soil microbial biomass and metabolic quotients ( $qCO_2$ ): is there a biological stoichiometry of soil microbes? [J]. PLOS ONE, 2013, 8(3): e57127.
- [3] 洪江涛, 吴建波, 王小丹. 全球气候变化对陆地植物碳氮磷生态化学计量学特征的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(9): 2658-2665.
- [4] 何俊杰, 陈小梅, 冯思红, 等. 城郊梯度上南亚热带季风常绿阔叶林土壤 C、N、P 化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2016, 35(3): 591-596.
- [5] 魏孝荣, 邵明安. 黄土高原沟壑区小流域坡地土壤养分分布特征[J]. 生态学报, 2007, 27(2): 603-612.
- [6] 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.
- [7] 范拴喜. 陕西省眉县猕猴桃园土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(4): 33-38.
- [8] 王维奇, 徐玲琳, 曾从盛, 等. 河口湿地植物活体-枯落物-土壤的碳氮磷生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2011, 31(23): 7119-7124.
- [9] 杜宁宁, 邱莉萍, 张兴昌, 等. 半干旱区土地利用方式对土壤碳氮矿化的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(5): 73-78.
- [10] Chen L D, Gong J, Fu B J, et al. Effect of land use conversion on soil organic carbon sequestration in the loess hilly area, loess plateau of China [J]. Ecological Research, 2007, 22(4): 641-648.
- [11] 杨文, 周脚根, 王美慧, 等. 亚热带丘陵小流域土壤碳氮磷生态计量特征的空间分异性[J]. 土壤学报, 2015, (6): 1336-1344.
- [12] 王维奇, 曾从盛, 钟春棋, 等. 人类干扰对闽江河口湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征的影响[J]. 环境科学, 2010, 31(10): 2411-2416.
- [13] 罗由林, 李启权, 王昌全, 等. 近 30 年川中丘陵区不同土地利用方式土壤碳氮磷生态化学计量特征变化[J]. 土壤, 2016, 48(4): 726-733.
- [14] 张海东, 汝海丽, 焦峰, 等. 黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植物群落与土壤 C、N、P、K 化学计量学特征[J]. 环境科学, 2016, 37(3): 1128-1138.
- [15] 张向茹, 马露莎, 陈亚南, 等. 黄土高原不同纬度下刺槐林土壤生态化学计量学特征研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(4): 818-825.
- [16] Ren S J, Cao M K, Tao B, et al. The effects of nitrogen limitation on terrestrial ecosystem carbon cycle: a review [J]. Progress in Geography, 2006, 31(4): 117-124.
- [17] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.