

DOI: 10.5846/stxb201804030756

高君亮, 罗凤敏, 高永, 党晓宏, 蒙仲举, 陈晓娜, 段娜. 农牧交错带不同土地利用类型土壤碳氮磷生态化学计量特征. 生态学报, 2019, 39(15):

Gao J L, Luo F M, Gao Y, Dang X H, Meng Z J, Chen X N, Duan N. Ecological soil C, N, and P stoichiometry of different land use patterns in the agriculture-pasture ecotone of Northern China. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(15):

农牧交错带不同土地利用类型土壤碳氮磷生态化学计量特征

高君亮¹, 罗凤敏¹, 高永^{2,*}, 党晓宏², 蒙仲举², 陈晓娜¹, 段娜¹

1 内蒙古磴口荒漠生态系统国家定位观测研究站/中国林业科学研究院沙漠林业实验中心, 磴口 015200

2 内蒙古农业大学沙漠治理学院, 呼和浩特 010019

摘要:为了阐明土地利用方式对土壤养分含量及土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响,选择阴山北麓农牧交错带 4 种主要的土地利用类型(放牧草地、封育草地、弃耕地和耕地)为研究对象,分析了浅层土壤(0—25 cm)有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)、碱解氮(AN)和速效磷(AP)含量及土壤 C、N、P 生态化学计量特征。结果表明:1) 研究区土壤贫瘠,养分含量整体水平不高,SOC、TN、TP 含量分别为 14.57、0.63、0.76 g/kg,AN 和 AP 含量分别为 39.87、6.72 mg/kg,5 项养分指标均为中等变异。2) 土地利用方式对土壤养分含量和土壤 C、N、P 生态化学计量特征均存在显著的影响,草地(封育草地、放牧草地)的 SOC、TN 和 AN 含量均高于农耕地(弃耕地、耕地),而 TP 和 AP 含量低于农耕地;草地的 C:N、C:P 和 C:P 值均高于农耕地。3) 土壤 C、N、P 元素化学计量值与 C、N、P 元素之间的最优拟合关系显示 C:N、C:P 主要受 SOC 影响,C:P 主要受 N 影响,表明 SOC 和 N 含量决定了研究区土壤中 C、N、P 化学计量特征的变化过程。研究结果对丰富土壤生态化学计量学科学理论具有重要意义,同时可为阴山北麓农牧交错带脆弱生态区的生态功能恢复提供科学依据。

关键词:土壤养分, 化学计量, 土地利用类型, 农牧交错带, 阴山北麓

Ecological soil C, N, and P stoichiometry of different land use patterns in the agriculture-pasture ecotone of Northern China

GAO Junliang¹, LUO Fengmin¹, GAO Yong^{2,*}, DANG Xiaohong², MENG Zhongju², CHEN Xiaona¹, DUAN Na¹

1 National Research Station of Inner Mongolia Dengkou Desert Ecosystem / Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Dengkou 015200, China

2 College of Desert control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China

Abstract: The way of land use affects soil nutrients and influences of stoichiometry characteristics was investigated by analyzing four different types of shallow soil (0—25 cm) taken from four different land (grazed grassland, enclosure grassland, abandoned land, farmland) in the northern piedmont of Yinshan Mountain, and the soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), available nitrogen (AN), available phosphorus (AP), and stoichiometry characteristics were determined. The results were as follows: (1) In general the soil was impoverished and the nutrient content was low in the study area. The soil SOC, TN, and TP were 14.57, 0.63, and 0.76 g/kg, respectively, and the AN and AP were 39.87 and 6.72 mg/kg, respectively. These five indicators showed modest variations. (2) Soil nutrient content

基金项目:国家自然科学基金项目(51769019)

收稿日期:2018-04-30; 网络出版日期:2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 13948815709@163.com

and stoichiometry characteristics were significantly affected by land use patterns. The SOC, TN, and AN in grassland (grazed grassland and enclosure grassland) were higher than those in agricultural land (abandoned land and farmland), whereas the TP and AP were lower than those in agricultural land. The C:N, C:P, and C:P ratios in grassland were higher than in agricultural land. Furthermore, the optimal fitting relationship showed that the C:N and C:P ratios were mainly affected by SOC, whereas the C:P ratio was mainly affected by N, which indicated that both factors affected the C, N, and P stoichiometry characteristics in the study area soils. These results have important implications for the theoretical improvement of soil ecological stoichiometry and provide a scientific basis for constructing an ecologically functional recovery program for the fragile ecological zone located in the agriculture-pasture ecotone of northern China.

Key Words: soil nutrient; stoichiometry; land use patterns; agro-pastoral transitional zone; northern piedmont of the Yinshan Mountain

生态化学计量学(ecological stoichiometry)是分析多重化学元素的质量平衡对生态交互作用影响的一种理论^[1-2],是当前生态学研究的主要方法和热点方向^[3]。生态化学计量学结合生物学、化学和物理学的基本原理,利用生态过程中多重化学元素的平衡关系,为研究碳(C)、氮(N)、磷(P)等元素在生态系统过程中的耦合关系提供了一种综合方法和工具^[4-5]。有助于解决植物和生态系统养分供应与需求平衡等方面的难题,其优点是通过分析生态系统组成部分的元素含量及比值关系,认识养分耦合循环特征、驱动力及其机制等问题^[6]。作为陆地生态系统的重要组成部分,土壤与生物的生存和发展密切相关,其C、N、P元素是生物体内元素的本质组分与主要来源,在生态系统物质循环及多元素平衡过程中发挥着重要作用^[1,7]。此外,N和P又是陆地植被生长的主要养分限制因子,其有效性是调节凋落物分解速率和生态系统养分平衡的主要因素之一^[8]。因此,研究土壤C、N、P化学计量特征对揭示养分可获得性及C、N、P元素的循环和平衡机制具有重要的科学意义^[9]。

阴山北麓是中国北方典型的农牧交错带,具有生态和生产的双重功能。近半个世纪以来,由于气候干旱、水资源短缺、大风日数多、加之人类高强度的土地资源开发利用,突破了该区域生态系统健康阈值,使其生态系统功能全面受损,进而使得该区域成了中国北方农牧交错带沙质荒漠化强烈发展的地区之一^[10]。强烈的土壤风蚀导致区域土壤蓄水保肥能力减弱,进而加剧了土壤C、N、P元素的流失。因此,恢复该区域生态系统的健康已是当务之急。目前,众多研究者围绕该区域的土壤风蚀与土地沙化问题开展了大量的研究工作^[10-14],但是针对土壤养分方面的研究相对较少^[15-16],对土壤生态化学计量的研究未见报道。基于此,本文选取阴山北麓典型农牧交错带为研究对象,分析区域内4种主要不同利用类型土地(放牧草地、封育草地、耕地和弃耕地)浅层土壤有机碳、全氮、全磷、碱解氮和速效磷含量,探讨不同利用类型土地土壤生态化学计量特征,揭示土地利用方式对土壤C、N、P含量及其生态化学计量特征的影响,以期为今后该区域合理利用与经营土地提供理论指导和技术支持,同时也为实现北方典型农牧交错带生态系统的优化管理和合理保护,维护区域生态安全和实现可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古呼和浩特市武川县上秃亥乡(图1),海拔1700 m。该区域的气候特征为典型的中温带大陆性季风气候,年均降水量274 mm,年均蒸发量2350 mm,年均气温1.0℃,年均日照时数3015 h,无霜期86 d,年均风速4.7 m/s^[15]。地貌类型主要为缓坡丘陵,旱作农耕地多分布于缓坡坡面上。土壤以栗钙土为主,质地粗糙。植物种类组成简单,天然植被主要以大针茅(*Stipa grandis*)、沙生针茅(*Agropyron glareosa*)、克氏针茅(*Stipa krylovii*)和冷蒿(*Artemisia frigida*)等为主,农作物主要为马铃薯(*Solanum tuberosum*),莜麦(*Avena Chinensis*)和荞麦(*Fagopyrum esculentum*)^[15]。

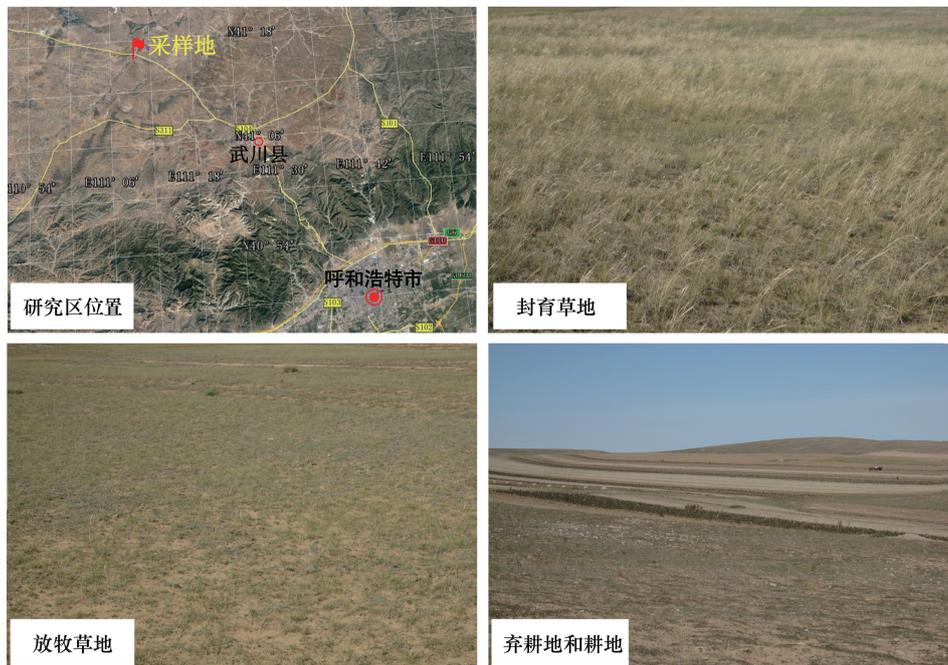


图 1 研究区位置及样地实景图

Fig.1 Study area location and sample plots reality images

1.2 土壤样品采集

2013 年 9 月下旬在研究区选择 4 个有代表性的采样地,分别为放牧草地 (Grazed grassland, GG)、封育草地 (Enclosure grassland, EG)、弃耕地 (Abandoned land, AL) 和耕地 (Farmland, FL), 每个样地的概况详见图 1 和表 1。在每个采样地按照“S”形布设 5 个采样点,每两个采样点之间距离约 200 m。在每个采样点分 5 层 (0—5、5—10、10—15、15—20 和 20—25 cm) 采样,然后将每个采样地 5 个采样点同一层次的土样混合装袋并进行编号。

表 1 样地概况

Table 1 Basic situation of sample plots

样地 Sample plots	样地概况 Situation of sample plots
放牧草地 Grazed grassland (GG)	植被以禾本科为主,伴有菊科植物,被牲畜啃食,盖度约 30%,均高<15 cm
封育草地 Enclosure grassland (EG)	已封育管理 11 a,植被以禾本科针茅属 (<i>Stipa</i>) 为主,盖度>80%,均高>20 cm
弃耕地 Abandoned land (AL)	弃耕 7—8 a,植被盖度约 35%,长势较好,被牲畜啃食
耕地 Farmland (FL)	耕种 10 a 左右,采样时莪麦已收割

1.3 土壤样品测定

土样阴干后剔除植物根系、叶片、动物粪便、昆虫尸体等杂物,并充分混合均匀;然后按四分法将样品分为 4 份,选择其中 1 份进行土壤养分分析;样品研磨后使之全部通过孔径 1.0 mm 的土壤筛后分成 2 份,一份测定 AN 和 AP,另一份用孔径 0.25 mm 的土壤筛筛分,选粒径<0.25 mm 的样品测定 SOC、TN 和 TP。5 项土壤养分指标的具体测定方法参照《土壤农化分析》^[17]。

1.4 数据分析

用 Microsoft Excel 2010 软件进行数据整理和作图;用 SAS 9.0 软件进行数理统计分析(单因素方差分析和回归分析)。

2 结果与分析

2.1 研究区浅层(0—25 cm)土壤 C、N、P 含量特征

土壤 C、N、P 是植物生长、发育及物质循环过程中重要的化学元素。研究区 SOC、TN 和 TP 的平均含量分别为 14.57、0.63、0.76 g/kg; AN、AP 含量分别为 39.87、6.72 mg/kg(表 2)。5 项土壤养分指标均为中等变异(12.88%—55.81%)。其中,全量养分的变异系数较小,而速效养分和有机碳的变异系数相对较大,这主要是因为全量养分主要受成土母质中矿物成分影响,大多以稳定态存在;而速效养分和有机碳与农牧业生产(耕作、施肥、放牧等)、地上枯落物的分解及植物的吸收利用有着密切关系。

表 2 研究区土壤养分特征统计

Table 2 Statistical results of surface soil fertility

指标 Indexs	有机碳 SOC Soil organic carbon/(g/kg)	全氮 TN Total nitrogen/ (g/kg)	全磷 TP Total phosphorus/ (g/kg)	碱解氮 AN Available nitrogen/ (mg/kg)	速效磷 AP Available phosphorus/ (mg/kg)
最小值 Min	8.21	0.52	0.61	22.96	2.72
最大值 Max	21.27	0.81	0.96	56.06	15.70
平均值 Mean	14.57	0.63	0.76	39.87	6.72
标准差 Std	3.81	0.08	0.10	9.14	3.75
变异系数 CV/%	26.13	12.88	13.51	22.93	55.81

2.2 不同土地利用类型土壤 C、N、P 含量特征

4 种不同土地利用类型样地 0—25 cm 土壤层 5 项指标的质量分数均存在不同程度的差异(图 2)。SOC

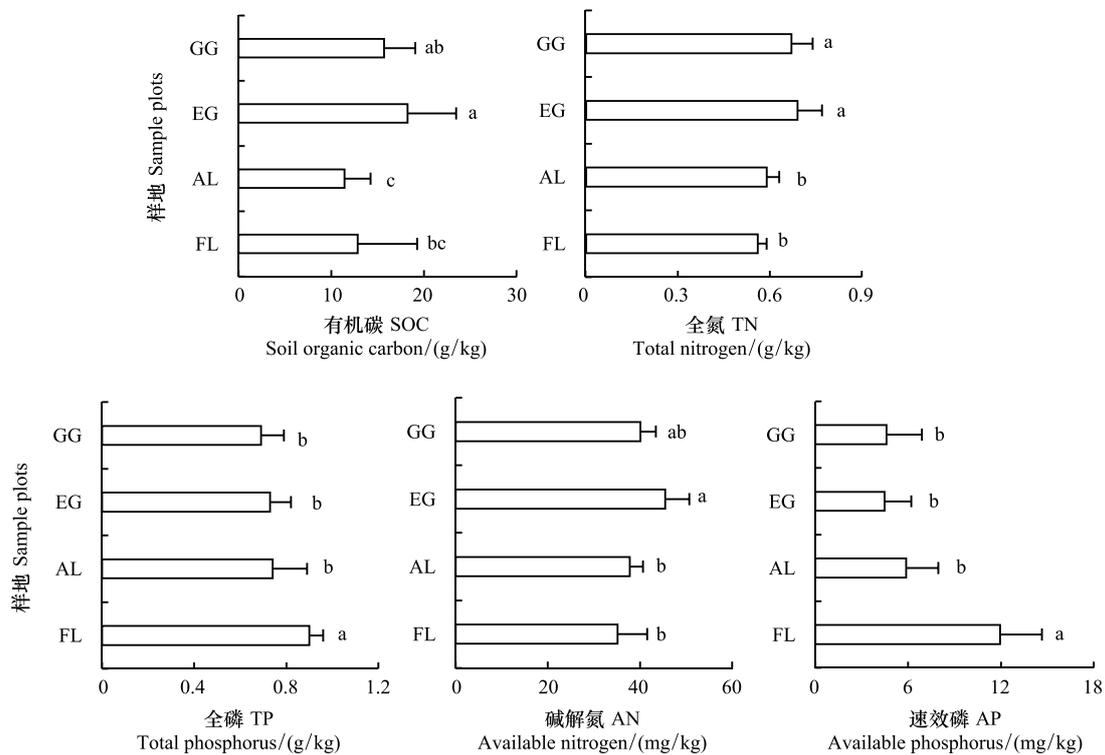


图 2 不同土地利用类型的土壤养分含量

Fig.2 Soil nutrition content in different land use patterns

GG,放牧草地 Grazed grassland; EG,封育草地 Enclosure grassland; AL,弃耕地 Abandoned land; FL,耕地 Farmland; 图中不同字母表示同一指标在不同样地间差异显著($\alpha=0.05$)

平均含量差异极显著 ($P < 0.01$), 封育草地 (18.24 g/kg) > 放牧草地 (15.72 g/kg) > 耕地 (12.86 g/kg) > 弃耕地 (11.45 g/kg); TN 平均含量差异极显著 ($P < 0.01$), 封育草地 (0.69 g/kg) > 放牧草地 (0.67 g/kg) > 弃耕地 (0.59 g/kg) > 耕地 (0.56 g/kg); TP 平均含量差异显著 ($P < 0.05$), 耕地 (0.90 g/kg) > 弃耕地 (0.74 g/kg) > 封育草地 (0.73 g/kg) > 放牧草地 (0.69 g/kg); AN 由于受 TN 的影响相对较大, 排序同 TN 一致, 封育草地 (15.48 mg/kg) > 放牧草地 (40.06 mg/kg) > 弃耕地 (37.8 mg/kg) > 耕地 (35.14 mg/kg), 但差异不显著 ($P > 0.05$); AP 含量差异极显著 ($P < 0.01$), 耕地 (11.94 mg/kg) > 弃耕地 (5.87 mg/kg) > 放牧草地 (4.60 mg/kg) > 封育草地 (4.47 mg/kg)。

2.3 不同土地利用类型土壤 C、N、P 化学计量特征

图 3 显示, 4 种不同土地利用类型样地 0—25 cm 土壤层的土壤 C:N、C:P、C:P 均存在极显著差异 ($P < 0.01$), 且草地 (封育草地和放牧草地) 的 C:N、C:P、C:P 值均大于农耕地 (弃耕地和耕地)。C:N 均值为封育草地 (26.57) > 放牧草地 (23.37) > 耕地 (23.21) > 弃耕地 (19.49); C:P 均值为封育草地 (25.10) > 放牧草地 (22.79) > 弃耕地 (15.95) > 耕地 (14.40); C:P 均值为放牧草地 (0.97) > 封育草地 (0.95) > 弃耕地 (0.82) > 耕地 (0.62)。

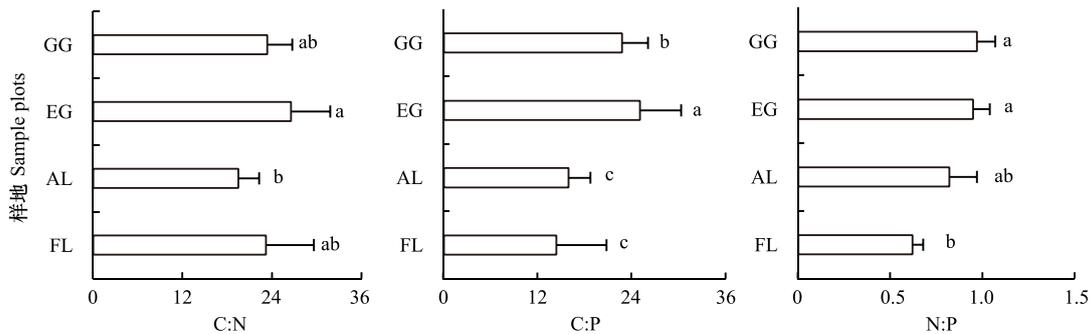


图 3 不同土地利用类型土壤 C、N、P 化学计量特征

Fig.3 Soil stoichiometric characteristics in different land use patterns

2.4 土壤 C、N、P 之间及其化学计量比的关系

表 3 表明, 研究区浅层土壤 5 项指标含量之间存在一定的相关关系, 但显著水平不同。SOC 和 TN、SOC 和 AN、AP 和 TP 之间均为极显著的线性相关关系 ($P < 0.01$); TP 和 TN、AP 和 TN 之间为显著的二次函数关系 ($P = 0.03$); SOC 与 TP、AP, AN 与 TP、AP 关系不显著 (P 分别为 0.31、0.21、0.36、0.41)。

表 3 土壤 C、N、P 含量之间的最优拟合关系 (N=20)

Table 3 Relationships among soil C, N, P contents (N=20)

x	y			
	TN	TP	AN	AP
SOC	$y = 0.013x + 0.43$ $R^2 = 0.39$ $P < 0.01$	$y = 0.001x^2 - 0.05x + 1.16$ $R^2 = 0.13$ $P = 0.31$	$y = 1.80x + 13.68$ $R^2 = 0.56$ $P < 0.01$	$y = 0.09x^2 - 2.90x + 29.17$ $R^2 = 0.17$ $P = 0.21$
TN		$y = 5.98x^2 - 8.43x + 3.66$ $R^2 = 0.35$ $P = 0.03$	$y = 56.52x + 4.44$ $R^2 = 0.25$ $P = 0.03$	$y = 200.57x^2 - 284.63x + 105.09$ $R^2 = 0.34$ $P = 0.03$
TP			$y = -115.93x^2 + 154.53x - 9.36$ $R^2 = 0.11$ $P = 0.36$	$y = 22.51x - 10.47$ $R^2 = 0.38$ $P < 0.01$
AN				$y = 0.01x^2 - 0.86x + 24.96$ $R^2 = 0.10$ $P = 0.41$

图 4 表明, SOC 与 C:N、C:P 均呈极显著线性相关关系 ($P < 0.01$); TN 与 C:P 呈极显著线性相关关系 ($P < 0.01$)、与 C:N 关系不显著 ($P = 0.72$); TP 与 C:P、C:P 均呈极显著线性相关关系 ($P < 0.01$)。此外, 从图中还可以看出, C:N、C:P、C:P 的化学计量比值与分子的相关关系均强于与分母的相关关系。

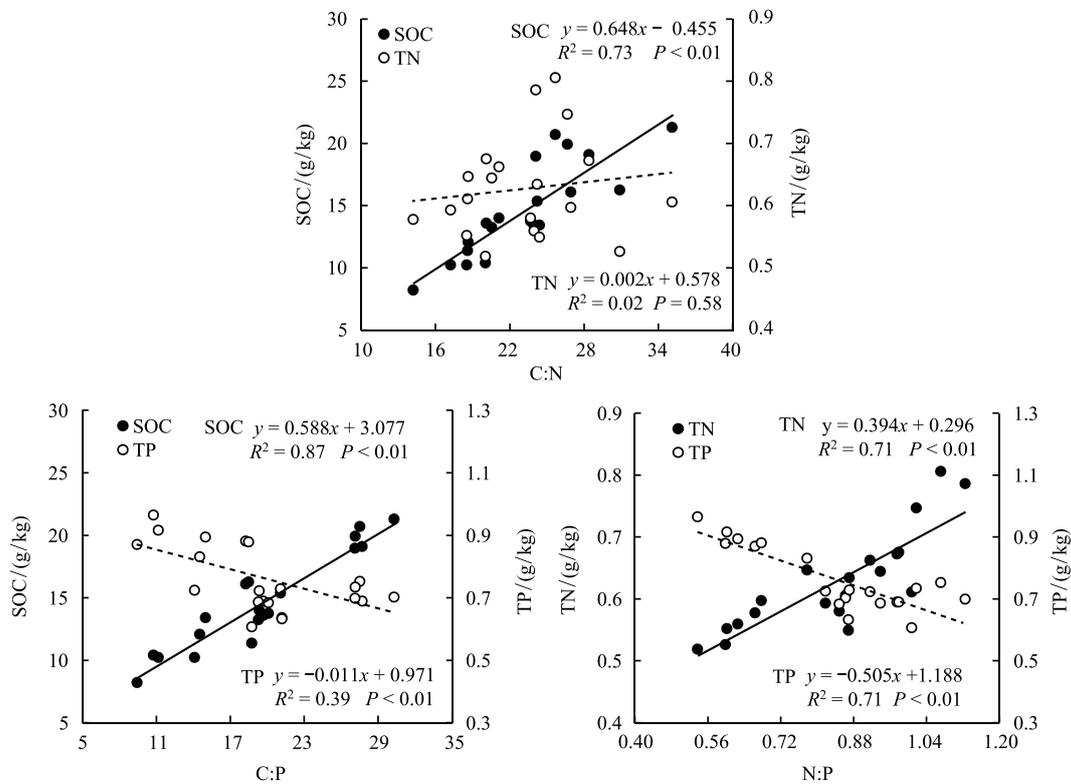


图4 土壤 C、N、P 含量与对应化学计量比之间的关系

Fig.4 Relationships among soil C, N, P contents and Ecological stoichiometry

3 讨论与结论

3.1 土壤养分含量特征

土壤是陆地植物生长的主要基质,其 C、N、P 元素是植物生长、发育及物质循环过程中重要的化学元素。本研究表明,研究区浅层土壤(0—25 cm) SOC、TN、TP、AN 和 AP 的平均含量分别为 14.57 g/kg、0.63 g/kg、0.76 g/kg、39.87 mg/kg、6.72 mg/kg。据全国第二次土壤普查标准可以确定研究区 SOC、TP 含量为 3 级(中上等级),AP 含量为 4 级(中下等级),TN 和 AN 含量为 5 级(低等级)^[18]。据此认为研究区 SOC 和 TP 相对较丰富,AP 较缺少,TN 和 AN 极为缺乏。5 项指标均为中等变异(12.88%—55.81%)。其中,全量养分的变异系数(12.88%—13.51%)较小,而速效养分和有机碳的变异系数(22.93%—55.81%)相对较大,这主要是因为全量养分主要受成土母质中矿物成分影响,大多以稳定态存在;而速效养分和有机碳与农牧业生产(耕作、施肥、放牧等)、地上枯落物的分解及植物的吸收利用有着密切关系。

土地利用方式对土壤养分含量存在显著影响。SOC 含量主要受植物枯落物、微生物残体和根系分泌物等有机质的影响^[19-20],草地开垦为农耕地后,枯落物数量减少,减少了地上生物量中碳素向土壤的输入;此外,开垦使土壤通气性增强,有机质充分暴露在空气中,土壤温度和湿度条件得到改善,好氧微生物活性增强,促进了土壤呼吸作用,加速了土壤有机碳的矿化分解^[21-22],降低了 SOC 含量。因此,本研究中 4 个样地的 SOC 含量差异极显著($P < 0.01$),且草地 SOC 含量显著高于农耕地,这与前人研究结果一致^[22-23]。

N 是土壤养分最重要的指标,是植物吸收的大量元素之一。4 个样地的 TN 含量存在极显著差异($P < 0.01$),且草地 TN 含量显著高于农耕地,这主要是因为氮素损失过程与碳素损失机制相近,因此在有机质损失的同时,土壤氮素也逐渐减少,草地被开垦利用后,土壤经过长期而稳定的耕作,N 含量会下降是必然的结果^[22]。AN 由于受 TN 的影响相对较大,排序同 TN 一致,但差异不显著($P > 0.05$),土壤氮的 95%来源于土壤

有机质^[24],草地枯落物数量较多、加之有牲畜粪便而使其土壤中有机质含量增加,进而使 N 含量较高。

P 是一种沉积性矿物,不利于迁移,土壤 TP 含量主要受土壤母质、气候、植被的影响^[25-27],耕地的 TP 含量极显著高于其他 3 者($P<0.01$),而其他 3 者之前差异不显著($P>0.05$),这是因为耕作施肥和放牧等人为干扰活动在一定程度上也会对其产生一定影响^[28-29]。农耕地的 AP 含量均高于草地,AP 含量主要受人为活动影响,长期耕作过程中磷肥的使用使农耕地土壤 AP 含量高于草地等自然植被土壤^[28]。

3.2 土壤 C、N、P 生态化学计量特征

土壤 C:C:P 生态化学计量特征可以反映出土壤有机质组成和质量程度,是表征土壤内部 C、N、P 化学元素循环的一个重要指标^[30]。

土壤 C:N 是衡量土壤 C、N 营养平衡状况的指标,是土壤质量评价的敏感指标。土壤 C:N 会影响 SOC 和 N 的循环,较低的 C:N 表明土壤有机质具有更快的矿化速率^[9,31]。本研究中土壤 C:N 均值为 23.16,低于准噶尔荒漠区域(29.92)^[32],但是却高于中国陆地均值(12.30)^[33]和中国北方干旱半干旱区的其他研究区,如黄土丘陵沟壑区(8.23)^[34]、黄土高原草地(9.04—9.63)^[35]、毛乌素沙地人工柠条林(10.65—15.56)^[36]、塔克拉玛干沙漠腹地人工林(14.80)^[6]、塔里木盆地北缘绿洲(12.14)^[37]和古尔班通古特沙漠(8.124)^[38]等。相对较高的 C:N 值(23.16)表明该区域土壤 N 比 C 更缺乏,N 含量为 5 级,表现为极缺乏,且土壤 C 源、有机质分解速率和矿化速率较低。此外,4 个样地的 C:N 值存在极显著差异($P<0.01$),草地明显高于农耕地。这因为草地的枯落物数量较多,枯落物的不断分解使其 SOC 含量较农耕地高;此外,草地地表由于植被的存在,降低了风速,减轻了风蚀,富含营养成分的细粒物质被保留,因此有机质损失的也少,而农耕地由于强烈的土壤风蚀,土壤中的细粒物质被风蚀,粗粒和砾石残留在地表,造成了土壤粗化,使得土壤保水保肥能力下降;此外,春季翻耕和秋季农作物收获,造成土壤养分含量下降^[15]。

土壤 C:P 通常被认为是土壤 P 素矿化能力的标志,也是衡量微生物矿化土壤有机物质释放 P 或从环境中吸收固持 P 素潜力的一个指标,其高低对植物生长发育具有重要的影响。较低的 C:P 是土壤 P 有效性高的一个指标^[9,27,39-40]。研究区土壤 C:P 均值为 19.56,远低于中国陆地平均值(52.70)^[33]和毛乌素沙地人工柠条林(33.68—61.06)^[36],相等于黄土高原草地(19.62—32.27)^[35],但高于塔克拉玛干沙漠腹地人工林(2.69)^[6]、塔里木盆地北缘绿洲(4.55)^[37]和古尔班通古特沙漠(3.486)^[38]。表明研究区土壤 P 的有效性相对较高,P 的矿化速率也相对较高,微生物分解有机质过程中受 P 的限制可能性较小,这与陶冶等人在准噶尔荒漠的研究结果相一致^[32]。研究表明,人为活动会影响植物生长的生态系统,进而改变植物所需的 C、N 源储蓄库和 C、N、P 的循环过程,进而引起植物生态化学计量学特征发生变化^[32,41-44]。本研究的 4 个不同样地 C:P 值存在极显著差异($P<0.01$),且草地大于农耕地,这主要是因为草地的 SOC 含量比农耕地高,而农耕地由于在农业生产过程中磷肥的施用,在一定程度上增加了土壤 P 含量,进而使草地的 C:P 值高于农耕地。

土壤 N 和 P 是限制植物生长的重要元素,也是植物赖以生存的物质基础和环境条件。土壤 C:P 值可以用作 N 饱和的诊断指标,用于确定养分限制的阈值^[41]。本研究中土壤 C:P 的均值为 0.84,低于中国陆地平均值(3.90)^[33]和毛乌素沙地人工柠条林(2.46—11.45)^[36],但与准噶尔荒漠(0.498)^[32]、塔里木盆地北缘绿洲(0.40)^[37]及古尔班通古特沙漠(0.434)^[38]等其他干旱半干旱区相近,表明土壤 C:P 主要受 N 控制,也进一步验证了研究区土壤 N 极缺乏。4 个不同样地的 C:P 值存在极显著差异($P<0.01$),草地的 C:P 值显著高于农耕地,这主要是因为草地的 N 含量高于农耕地,而 P 含量低于农耕地。土壤 C、N、P 化学计量结果表明研究区土壤 C、N、P 元素的缺乏程度表现为 $N>P>C$ 。此外, $C:N<30$ 、 $C:P<14$,表明 C、N 元素主要决定研究区土壤 C、N、P 化学计量特征及过程。

3.3 土壤养分含量及化学计量特征的关系

研究表明,土壤养分元素之间通常是密切相关、相互耦合的。众多研究对养分指标之间的相关关系大都选择 Pearson 相关性分析,而没有进行最优拟合,事实上,土壤养分指标之间并非为简单的线性拟合关系。陶冶等人对古尔班通古特荒漠灌木群落土壤的研究结果认为,土壤养分之间具有非线性耦合关系,需要用非

线性模型才能真正体现它们之间的关系^[38]。因此,本研究选择线性和非线性模型相结合来探讨土壤养分之间的关系。通过对 5 项养分指标两两之间进行最优拟合发现,SOC 与 TN、AN 存在极显著线性相关关系($P < 0.01$),TP 和 AP 存在极显著线性相关关系($P < 0.01$),TN 和 TP、AP 之间为显著的二次函数关系($P = 0.03$);而 SOC 与 TP、AP,AN 与 TP、AP 关系不显著(P 分别为 0.31、0.21、0.36、0.41)。大量的研究表明,土壤 C、N、P 元素的化学计量比值与 2 个元素值之间具有一定的相关关系,但显著性存在差别^[19,31-32,34-38,41]。对研究区土壤 C、N、P 元素化学计量值与相对应的 2 个元素进行最优拟合发现,C:N 与 SOC 之间为极显著线性相关关系($P < 0.01$),与 TN 的最优拟合关系可以用二次函数关系表示,但是未达到显著水平($P = 0.38$),C:P 与 SOC 和 TP 之间均为极显著线性相关关系($P < 0.01$),C:P 与 TN 和 TP 之间均为极显著线性相关关系($P < 0.01$)。此外,从相关系数可以发现,C:N 和 C:P 主要受控于 SOC 含量,C:P 主要受控于 N 含量,这与陶冶等人的研究结果相一致^[31-32],研究区土壤 C、N、P 化学计量特征主要受控于 C、N 元素。

综上所述,土地利用方式导致土壤养分含量及其生态化学计量特征均存在一定差异,草地对研究区土壤质量的改善具有明显作用,有助于 SOC 和 N 的积累,提高了土壤 C、N 含量及土壤 C、N、P 化学计量比值。而农耕地由于强烈的土壤风蚀,土壤中的细粒物质被风蚀,粗粒和砾石残留在地表,造成了土壤粗化,使得土壤保水保肥能力下降;此外,春季翻耕和秋季农作物收获,造成土壤养分含量下降^[15]。因此,建议今后应对该区域草地加大保护力度,有计划有步骤地组织生态退耕工作。

本研究仅对阴山北麓农牧交错带 4 种不同利用类型土地浅层(0—25cm)土壤养分特征和化学计量特征进行了初步研究,对于全面评价该区域土壤养分状况与化学计量特征还存在一定的欠缺。今后还需要加大样本数量,选择更多的采样地,对深层次土壤养分进行分析,并结合不同样地的植物茎、叶、花、果实、种子、根系及枯落物中 C、N 和 P 的比例关系开展进一步研究。

参考文献 (References):

- [1] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, Fagan W F, Markow T A, Cotner J B, Harrison J F, Hobbie S E, Odell G M, Weider L W. Biological stoichiometry from genes to ecosystems. *Ecology Letters*, 2000, 3(6): 540-550.
- [2] 曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索. *植物生态学报*, 2005, 29(6): 1007-1019.
- [3] Sterner R W, Elser J J. *Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to the Biosphere*. Princeton: Princeton University Press, 2002.
- [4] Chadwick O A, Derry L A, Vitousek P M, Huebert B J, Hedin L O. Changing sources of nutrients during four million years of ecosystem development. *Nature*, 1999, 397(6719): 491-497.
- [5] 贺金生, 韩兴国. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 2-6.
- [6] 李从娟, 雷加强, 徐新文, 唐清亮, 高培, 王永东. 塔克拉玛干沙漠腹地人工植被及土壤 C N P 的化学计量特征. *生态学报*, 2013, 33(18): 5760-5767.
- [7] Vitousek P M, Porder S, Houlton B Z, Chadwick O A. Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions. *Ecological Applications*, 2010, 20(1): 5-15.
- [8] Gusewell S, Freeman C. Enzyme activity during N-and P-limited decomposition of wetland plant litter. *Bulletin of the Geobotanical Institute ETH*, 2003, 69: 95-106.
- [9] 朱秋莲, 邢肖毅, 张宏, 安韶山. 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征. *生态学报*, 2013, 33(15): 4674-4682.
- [10] 陈智. 阴山北麓农牧交错区地表土壤抗风蚀能力测试研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2006.
- [11] 赵彩霞. 阴山北麓农牧交错带防治风蚀沙化的恢复生态学研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- [12] 李晓丽. 阴山北麓土壤风蚀的影响因素及运动特性的试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007.
- [13] 孙悦超, 麻硕士, 陈智, 赵永来, 孙宇瑞. 阴山北麓干旱半干旱区地表土壤风蚀测试与分析. *农业工程学报*, 2007, 23(12): 1-5.
- [14] 孙悦超, 陈智, 赵永来, 苏洁, 潘坤, 冬梅. 阴山北麓农牧交错区草地土壤风蚀测试. *农业机械学报*, 2013, 44(6): 143-147.
- [15] 高天明, 张瑞强, 黄建国. 开垦对阴山北麓农牧交错区草原坡地的破坏作用. *中国农业科技导报*, 2014, 16(1): 125-130.
- [16] 高君亮, 罗凤敏, 高永, 原伟杰, 王淮亮, 党晓宏. 阴山北麓不同土地利用类型土壤养分特征分析与评价. *草业学报*, 2016, 25(4): 230-238.
- [17] 鲍士旦. *土壤农化分析(第三版)*. 北京: 中国农业出版社, 2000.

- [18] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术. 北京: 农业出版社, 1992.
- [19] 白小芳, 徐福利, 王渭玲, 赵亚芳, 王玲玲, 孙鹏跃. 华北落叶松人工林土壤碳氮磷生态化学计量特征. 中国水土保持科学, 2015, 13(6): 68-75.
- [20] Clemmensen K E, Bahr A, Ovaskainen O, Dahlberg A, Ekblad A, Wallander H, Stenlid J, Finlay R D, Wardle D A, Lindahl B D. Roots and associated fungi drive long-term carbon sequestration in boreal forest. *Science*, 2013, 339(6127): 1615-1618.
- [21] 信忠保, 余新晓, 张满良, 李庆云, 李海光. 黄土高原丘陵沟壑区不同土地利用的土壤养分特征. 干旱区研究, 2012, 29(3): 379-384.
- [22] 施陈银, 马礼. 北方农牧交错带不同土地利用对土壤养分的影响——以张家口市塞北管理区为例. 河北师范大学学报: 自然科学版, 2009, 33(6): 815-819.
- [23] 刘全友, 童依平. 北方农牧交错带土地利用类型对土壤养分分布的影响. 应用生态学报, 2005, 16(10): 1849-1852.
- [24] Palviainen M, Finér L, Kurka A M, Mannerkoski H, Piirainen S, Starr M. Release of potassium, calcium, iron and aluminium from Norway spruce, Scots pine and silver birch logging residues. *Plant and Soil*, 2004, 259(1/2): 123-136.
- [25] Kooijman A M, Jongejans J, Sevink J. Parent material effects on Mediterranean woodland ecosystems in NE Spain. *CATENA*, 2005, 59(1): 55-68.
- [26] 王辽宏, 邱莉萍, 高海龙, 张兴昌. 农牧交错带本氏针茅坡地土壤-植物系统磷素分布特征. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(5): 1192-1199.
- [27] 曾全超, 李鑫, 董扬红, 安韶山. 黄土高原延河流域不同植被类型下土壤生态化学计量学特征. 自然资源学报, 2016, 31(11): 1881-1891.
- [28] 邹丽娜, 周志宇, 颜淑云, 秦彧. 玛曲高寒草地土壤养分对不同利用方式的响应. 中国草地学报, 2009, 31(6): 80-87.
- [29] 马琨, 马斌, 何宪平, 罗登科, 徐志有, 牟彦荣. 宁夏南部山区不同土地类型土壤养分的分布特征研究. 农业科学研究, 2006, 27(2): 1-5, 14-14.
- [30] 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. 生态学报, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [31] 陶冶, 吴甘霖, 刘耀斌, 张元明. 古尔班通古特沙漠典型灌木群落土壤化学计量特征及其影响因素. 中国沙漠, 2017, 37(2): 305-314.
- [32] 陶冶, 刘耀斌, 吴甘霖, 张元明. 准噶尔荒漠区域尺度浅层土壤化学计量特征及其空间分布格局. 草业学报, 2016, 25(7): 13-23.
- [33] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, Melillo J M, Hall C A S. Pattern and variation of C:C:P ratios in China's soils: A synthesis of observational data. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/3): 139-151.
- [34] 尹秋龙, 寇萌, 焦菊英, 岳明. 黄土丘陵沟壑区不同植物群落的土壤养分及其化学计量特征. 水土保持通报, 2017, 37(1): 62-66.
- [35] 赵晓单, 曾全超, 安韶山, 方瑛, 马任甜. 黄土高原不同封育年限草地土壤与植物根系的生态化学计量特征. 土壤学报, 2016, 53(6): 1541-1511.
- [36] 潘军, 宋乃平, 吴旭东, 杨新国, 陈林, 曲文杰, 翟德苹. 荒漠草原不同种植年限人工柠条林土壤碳氮磷化学计量特征. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2015, 41(2): 160-168.
- [37] 李红林, 贡璐, 朱美玲, 刘曾媛, 解丽娜, 洪毅. 塔里木盆地北缘绿洲土壤化学计量特征. 土壤学报, 2015, 52(6): 1345-1355.
- [38] 陶冶, 张元明. 古尔班通古特沙漠4种草本植物叶片与土壤的化学计量特征. 应用生态学报, 2015, 26(3): 659-665.
- [39] 刘雨, 郑粉莉, 安韶山, 和文祥, 郭曼, 吕春华. 燕沟流域土壤微生物学性质对植被恢复过程的响应. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4): 824-832.
- [40] 王维奇, 曾从盛, 钟春棋, 仝川. 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. 环境科学, 2010, 31(10): 2411-2416.
- [41] 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. 干旱地区农业研究, 2017, 35(4): 33-38.
- [42] Zhang K, Su Y Z, Wang T, Liu T N. Soil properties and herbaceous characteristics in an age sequence of *Haloxylon ammodendron* plantations in an oasis-desert ecotone of northwestern China. *Journal of Arid Land*, 2016, 8(6): 960-972.
- [43] 罗由林, 李启权, 王昌全, 辛志远, 王永豪, 宋安军, 万傲然, 唐科. 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. 土壤, 2016, 48(4): 726-733.
- [44] 李占斌, 周波, 马田田, 柯浩成, 徐国策, 张祎, 于坤霞, 成玉婷. 黄土丘陵区生态治理对土壤碳氮磷及其化学计量特征的影响. 水土保持学报, 2017, 31(6): 312-318.