

不同恢复年限人工草地土壤碳氮磷含量及其生态化学计量特征*

欧延升 汪霞** 李佳 贾海霞 赵云飞 黄政 洪苗苗

兰州大学资源环境学院, 西部环境教育部重点实验室, 甘肃省环境污染预警与控制重点实验室 兰州 730000

摘要 应用对比分析和空间代替时间的方法, 以黄土高原丘陵沟壑区罗玉沟流域不同恢复年限的人工草地土壤为研究对象, 分析土壤碳氮磷含量及其生态化学计量特征的变化, 探讨它们与土壤理化性质之间的关系。结果表明, 随着恢复年限的增加, 人工草地土壤有机碳、全氮和全磷含量均增加, 恢复至8年以后有机碳含量保持平稳。人工草地土壤C/N呈先增后减的趋势, 变化范围为10.66-13.62, 与全国土壤C/N平均水平持平; 土壤C/P和N/P呈先增后减再增的趋势, 变化范围分别为9.19-13.18和0.82-1.17, 均低于全国水平。土壤有机碳、全氮和全磷与土壤含水率、容重、孔隙度和pH值之间呈显著的相关关系 ($P < 0.01$), 土壤有机碳、全氮和全磷含量间具有显著的正相关性 ($P < 0.01$)。C/N与全氮含量存在显著负相关关系, 与有机碳含量不存在相关性, 说明C/N受氮素影响较大; C/P与有机碳含量呈显著正相关 ($P < 0.01$), 与全磷含量不相关, 则说明C/P主要受碳素限制; 而N/P与全氮、全磷含量均达到显著正相关 ($P < 0.01$), 说明N/P由氮素、磷素共同决定。由此可知, 氮和磷是该地区主要的限制营养元素; 本研究结果可为当地通过合理利用草地恢复方式改善土壤质量和维护草地健康提供理论参考。(图2 表4 参53)

关键词 恢复年限; 人工草地; 碳氮磷; 生态化学计量学

CLC S812.2

Content and ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in artificial grassland under different restoration years*

OU Yansheng, WANG Xia**, LI Jia, JIA Haixia, ZHAO Yunfei, HUANG Zheng & HONG Miaomiao

Key Laboratory of Environmental Pollution Prediction and Control of Gansu Province, Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract Using the methods of comparative analysis and substituting temporal serial with spatial serial, we investigated the artificial grassland soil with different recovery years in Luoyugou watershed in the hilly gully region of loess plateau. In particular, we analyzed the content of carbon, nitrogen, and phosphorus and their ecological stoichiometric characteristics and discussed their relationships with soil physical and chemical properties. The results showed that with the increase of restoration years, the content of organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus in artificial grassland increased, and the organic carbon content remained stable after eight years. The soil C/N ratio in artificial grassland first showed an increasing trend and then a decreasing trend, and the variation range was 10.66–13.62, which was equal to the national soil C/N average level. The soil C/P and N/P ratios showed an increasing-decreasing-increasing trend, and the ranges of variation were 9.19–13.18 and 0.82–1.17, respectively, which was lower than the corresponding national level. A significant correlation was observed between soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus and soil moisture content, density, porosity, pH. A significant positive correlation was observed between soil organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus ($P < 0.01$). The C/N ratio had a significant negative correlation with total nitrogen, but not with organic carbon ($P < 0.01$), indicating that it was significantly affected by the total nitrogen content. The C/P ratio was positively correlated with organic carbon, but not with total phosphorus ($P < 0.01$), indicating that it was mainly controlled by the organic carbon content. The N/P ratio was positively correlated with total nitrogen and total phosphorus ($P < 0.01$), indicating that it was significantly affected by total N and P content. Therefore, N and P were found to be the main restricted nutrients in this area. Planting artificial grassland not only changes soil structure and nutrient content, but also plays an active role in maintaining soil and water, regulating climate, and so on. It can be used as one of the effective measures for grassland ecological restoration in the Luoyugou Basin.

Keywords restoration years; artificial grassland; carbon, nitrogen, and phosphorus; ecological stoichiometry

收稿日期 Received: 2018-05-04 接受日期 Accepted: 2018-06-19

*国家自然科学基金项目(41572332)、甘肃省重点研发计划项目(17YF1FA131)和国家科技基础资源调查专项(2017FY100900)资助 Supported by the National Nature Science Foundation of China (41572332), the Key Research and Development Program of Gansu Province (17YF1FA131), and the Special Program for Basic Resources Survey of the Ministry of Science and Technology, China (2017FY100900)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: wangxia@lzu.edu.cn)

生态化学计量学是一门综合了生物学、化学和物理学等多门学科的基本原理,用于研究生物系统能量平衡和多重化学元素(主要是碳、氮、磷)平衡的科学^[1-2]。探究土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征是近几年来生态学领域的研究热点^[3-5],主要是因为碳(C)是植物必需的生命元素,氮(N)、磷(P)是植物生长必不可少的矿质性营养元素和关键的限制性养分^[6-7],三者密切相关。土壤是植物生长赖以生存的重要基质和环境条件,土壤富集了岩石风化的过程中和植被凋落物被微生物分解后的养分,这些养分供地表植被的正常生长利用。土壤养分供给、植物养分需求与归还通过动态交换维持着一个平衡的元素比值^[2]。基于生态化学计量学的理论研究土壤中关键养分元素的含量及其比例关系,对揭示土壤中养分的可获得性与认识土壤碳、氮、磷元素循环和平衡机制具有重要意义^[8]。

植被恢复作用有效增加了土壤地表凋落物和地下根系残体及分泌物的输入量,使土壤的综合理化性质得到了显著的改善^[9]。人工草地恢复是植被恢复措施之一,由于草本植物生长迅速,能在短时间内提高植被覆盖度,增加地表粗糙度,防止风沙流对地表侵蚀,治理地表裸露地区的生态环境,同时对于改善土壤质量具有重要影响^[10]。罗玉沟流域地形破碎,地表植被稀疏,降雨集中,暴雨多,强度大,容易造成土壤侵蚀,是黄土高原水土流失较严重的区域^[11]。当地政府通过植树种草等措施遏制水土流失的发生,许多学者也在该流域内开展了大量关于水土保持措施^[12]、土地利用变化^[13-14]和次降雨特征^[15]等对土壤侵蚀作用机制的研究,但目前有关植被恢复对土壤质量状况的研究鲜有报道。针对人工草地恢复对土壤性状的影响,王学霞等^[16]、饶丽仙^[17]和Liu等^[18]分别在三江源地区、云雾山自然保护区和黄土高原王东沟流域得到了相关的研究成果,但由于不同区域因气候、土壤母质、植被类型、人为干扰等因素导致土壤性质具有时空差异性^[19],因此对罗玉沟流域开展不同恢复年限人工草地土壤性状的研究是十分必要的。本研究以黄土高原沟壑区罗玉沟流域不同恢复年限的人工草地土壤为研究对象,应用对比分析和空间代替时间的方法,分析不同恢复年限的草地土壤碳氮磷含量及其生态化学计量特征,以期在当地通过合理利用草地恢复方式改善土壤质量和维护草地健康提供理论参考。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

罗玉沟流域(105°30'-105°44'E, 34°35'-34°39'N)位于甘肃省天水市秦州区北郊,属于典型的黄土丘陵沟壑区第三副区。该流域地处温带半湿润与半干旱气候的过渡地带,气候温和,四季分明,全年平均气温为10.7℃,最热月(7月)平均气温为22.8℃,最冷月(1月)平均气温为10.0℃;夏、秋季降雨集中,冬、春季干旱少雨,全年平均降雨量531.1 mm,且多集中于5-10月,占全年降雨量的80%以上;全年日照时长2 100 h,其中春、夏两季分别占全年日照量的26.6%、30.6%;全年无霜期184 d^[11-13]。流域内土壤类型复杂,既有地带性土壤,也有耕作性土壤,主要土壤类型为褐土、黑垆土和红黏土,这

些土壤类型分布广,约占流域总面积的88.65%。该流域草本植物有20科76种,以豆科、禾本科、菊科、蔷薇科居多,如紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、沙打旺(*Astragalus adsurgens*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、草木樨(*Melilotus suaveolens*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、白蒿(*Herba Artemisiae Sieversianae*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、白茅(*Imperata cylindrica*)、苔草(*Carex* spp.)等^[11]。

1.2 研究方法

运用对比分析和空间代替时间的方法,通过走访调查、查证资料等方式确定流域内人工草地恢复的时间年限,以保证样地间具有较好的可比性。综合考虑海拔、坡度、坡向等地形因子后,分别遴选出5块立地条件相似、恢复年限不同(1年、5年、8年、10年和15年)的人工草地(主要种植紫花苜蓿)为研究对象,同时选择3块天然草地为对照。2017年7月,在各恢复年限的草地内随机选取5个采样点,每个采样点设置1 m × 1 m的样方,样方内按“S”形法用直径为10 cm的土钻采集5个40 cm深的土样,采集土层深度依次为0-10 cm、10-20 cm、20-30 cm和30-40 cm,对同一个样方内相同土层的5次重复土样混合后取约1 kg的样品装入自封袋内带回实验室。土样自然风干,经研磨后过0.15 mm筛,保存备用。

1.3 样品测定

采用烘干法测定土壤含水率,环刀法测定土壤容重,根据公式(1)计算土壤总孔隙度,利用pH酸度计(PHS-3E)测定土壤pH值($m_K:m_{\pm}=2.5:1$),土壤有机碳(SOC)含量采用重铬酸钾-外加热法测定,土壤全氮(STN)、全磷(STP)含量分别经H₂SO₄-K₂SO₄-CuSO₄-Se和H₂SO₄-HClO₄催化消煮后由全自动化学分析仪(Smart Chem 200)测定。

$$\text{土壤总孔隙度} = (1 - \text{土壤容重} / \text{土壤比重}) \times 100\% \quad (1)$$

1.4 数据分析

数据分析采用SPSS 19.0软件中的单因素方差分析(One-way ANOVA)、皮尔森(Pearson)相关分析等方法,数据制图在Origin Pro 8.1软件上进行。

2 结果与讨论

2.1 不同恢复年限人工草地土壤理化性质的差异

表1为不同恢复年限人工草地和天然草地土壤含水率、容重、总孔隙度和土壤pH值的变化情况。就不同类型草地而言,天然草地土壤含水率显著高于人工草地($P < 0.05$),比恢复1年的人工草地含水率高114.6%。天然草地由于植被覆盖度较高,土壤水分蒸发量小,土壤含水量保持在一个较高的水平。人工草地土壤含水率呈先减后增的趋势,其中在5-8年这个恢复时期内增幅最快,增幅达80%以上。这是因为处于恢复初期的人工草地由于地表植被覆盖度较低,土壤水分因蒸腾作用而被消耗,同时草本植物为保证正常生长需要从土壤中吸收部分水分,因此土壤含水率较低。草本植物生长到一定年限后,地表植被覆盖度增加,有效地降低了地表的蒸发作用,增强了土壤的保水能力。土壤容重是衡量土质疏松度的指标之一,它影响到土壤孔隙度大小的分配,进而影响到土壤水肥气热等条件以及植被根系在土壤中的穿插^[20]。由表1可知,随着恢复年限的增长,土壤容重由1.32 g/cm³减小到

1.18 g/cm³, 总孔隙度由46.73%增大到53.35%, 恢复时间达8年以上时, 土壤容重及总孔隙度大小差异不大 ($P > 0.05$). 草本植物的须根系在生长过程中广泛分布和不断伸长使得土壤颗粒粉碎, 容重减小, 孔隙增多, 总孔隙度增大, 增强了土壤的通气透水性能. 如表1所示, 恢复年限少于10年的土壤pH值的差异性较恢复年限达10年以上的显著 ($P < 0.05$), 这与彭文英等研究得出的经植被恢复的土壤pH值在恢复前10年减少相对明显的结论^[21]一致. 经过多年的植被恢复后, 土壤pH值会略有减小, 究其原因是当草本植物在生长到一定阶段时, 草根会不断向土壤中输送养分, 为土壤微生物的活动提供了生存条件, 加快了其对腐殖质的分解, 产生了较多的有机酸, 从而使土壤pH值降低.

2.2 不同恢复年限人工草地土壤碳氮磷含量的差异

碳、氮和磷是保证植物正常生长发育的重要生源元素^[22]. 不同样地土壤有机碳、全氮和全磷含量见表2. 天然草地土壤有机碳、全氮和全磷含量显著高于人工草地 ($P < 0.05$), 这是由于天然草地生产力水平高, 受干扰程度较小, 土壤养分含量相对稳定. 在人工草地植被持续恢复过程中, 土壤养分的富集为草本植物的正常生长提供了支持. 大量研究表明, 植被恢复过程中土壤养分和有机质含量都会因植被的新陈代谢作用而有所提高^[23-24]. 与恢复1年的人工草地相比, 恢复15年的草地土壤有机碳、全氮和全磷含量分别增加了99.3%、110.8%和48.9%. 土壤中的有机碳主要来源于植被地上部分的凋落物和地下部分的根系分泌物及细根周转产生的碎屑^[25]. 恢复1-5年阶段由于表层凋落物较少, 土壤有机碳的平均含量为4.99 g/kg. 随着人工草地植被恢复时间的推移, 植被生产力得到恢复和提升, 地上凋落物、地下死亡根系和分泌物质的量也随之增加, 有利于有机碳积累增长, 恢复年限达8年以上时, 草地土壤有机碳平均含量为7.77 g/kg, 各年限间有机碳含量差异不显著 ($P > 0.05$), 处于相对稳定的水平. 土壤中的氮素作为植物生长发育必不可少的矿质营

养元素, 一部分来自于动植物残体分解与合成所形成的有机质, 另一部分则由生物固氮作用产生, 其输出的途径主要是有机质经微生物分解后被植物吸收利用^[26]. 恢复年限低于5年的人工草地土壤全氮平均含量为0.40 g/kg, 8-10年阶段为0.63 g/kg, 当恢复年限达15年时含氮量处于最高值, 与恢复初期相比增加了近1倍. 恢复初期草本植物生长发育未成熟, 需从土壤中消耗部分氮素, 导致土壤全氮含量较低. 随着草本植物生长, 腐解的凋落物产生的有机质经微生物作用向土壤补充了氮素, 使得土壤中全氮含量增加^[23]. 地表凋落物作为植物与土壤之间物质、能量交换的枢纽^[27], 是土壤养分归还的有效途径, 植被凋落物的归还量在很大程度上决定着土壤中碳、氮的含量, 因此凋落物的输入量是影响土壤碳、氮含量的主要因子. 地表凋落物的归还和岩石的风化作用是土壤中磷元素的主要来源途径^[28], 其含量受成土母质、气候、生物等因素影响. 恢复1-5年的草地土壤全磷含量差异不大 ($P > 0.05$), 含量值介于0.45-0.48 g/kg之间, 恢复8年全磷含量为0.55 g/kg, 与1-5年阶段存在显著性差异 ($P < 0.05$), 恢复10-15年阶段全磷平均含量为0.64 g/kg. 有研究显示, 随着植被生长年限的增加, 土壤中全磷含量会呈现先升后降的趋势^[29-30], 与本研究得出的土壤全磷含量随着恢复年限增加而增加的结果不一致, 这可能是在土壤C/P较低的情况下, 微生物分解有机质的过程中释放养分, 促使了土壤中磷素增加的缘故. 土壤中有机碳、全氮和全磷的含量随年限的增加所呈现出的变化趋势表明, 在草地植被恢复初期, 草本植物快速生长需要从土壤中不断地吸取营养养分, 且植被覆盖度较低, 产生的植被凋落物较少, 归还土壤养分的能力较弱, 土壤养分输出量大于输入量. 随着恢复年限的增加, 草地生产力提高, 植被生物量增加, 植被覆盖度升高, 植被凋落物增多, 归还土壤养分的能力增强, 土壤养分含量增加^[23].

如图1所示, 各土层间的有机碳、全氮和全磷含量随着恢复年限的增加而增加, 这是因为地表表层草本植物的生长代

表1 不同样地土壤理化性质特征

Table 1 Soil physical and chemical characteristics in different sampling plots

样地类型 Sample type	含水率 (r/%) Moisture content	容重 ($\rho/\text{g cm}^{-3}$) Bulk density	总孔隙度 (r/%) Total porosity	pH值 pH value
1年人工草地 1-year artificial grassland	12.16 ± 2.15 d	1.32 ± 0.07 a	46.73 ± 3.69 c	7.56 ± 0.18 a
5年人工草地 5-year artificial grassland	10.34 ± 1.46 d	1.27 ± 0.04 ab	48.81 ± 2.46 bc	7.33 ± 0.14 b
8年人工草地 8-year artificial grassland	18.98 ± 2.03 c	1.21 ± 0.06 bc	52.31 ± 2.90 ab	7.18 ± 0.14 bc
10年人工草地 10-year artificial grassland	20.93 ± 1.60 bc	1.18 ± 0.05 bc	52.98 ± 1.27 a	7.00 ± 0.20 cd
15年人工草地 15-year artificial grassland	23.34 ± 2.06 b	1.18 ± 0.10 bc	53.35 ± 4.11 a	6.95 ± 0.14 d
天然草地 Natural grassland	26.10 ± 2.28 a	1.12 ± 0.06 c	56.03 ± 2.89 a	7.04 ± 0.13 cd

不同小写字母表示不同样地的差异性 ($P < 0.05$).

Different lowercase letters indicate the difference between different plot types ($P < 0.05$).

表2 不同样地土壤有机碳 (SOC)、全氮 (STN)、全磷 (STP) 含量

Table 2 The contents of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (STN), total phosphorus (STP) in different sampling plots

样地类型 Plot type	SOC (w/g kg^{-1})	STN (w/g kg^{-1})	STP (w/g kg^{-1})
1年人工草地 1-year artificial grassland	4.16 ± 0.49 d	0.37 ± 0.05 d	0.45 ± 0.03 d
5年人工草地 5-year artificial grassland	5.82 ± 0.26 c	0.43 ± 0.05 d	0.48 ± 0.06 d
8年人工草地 8-year artificial grassland	7.24 ± 0.17 b	0.61 ± 0.05 c	0.55 ± 0.02 c
10年人工草地 10-year artificial grassland	7.42 ± 0.49 b	0.65 ± 0.06 c	0.61 ± 0.05 b
15年人工草地 15-year artificial grassland	8.29 ± 0.75 b	0.78 ± 0.05 b	0.67 ± 0.04 b
天然草地 Natural grassland	10.34 ± 0.71 a	0.96 ± 0.05 a	0.74 ± 0.02 a

不同小写字母表示不同样地的差异性 ($P < 0.05$).

Different lowercase letters indicate the difference between different plot types ($P < 0.05$).

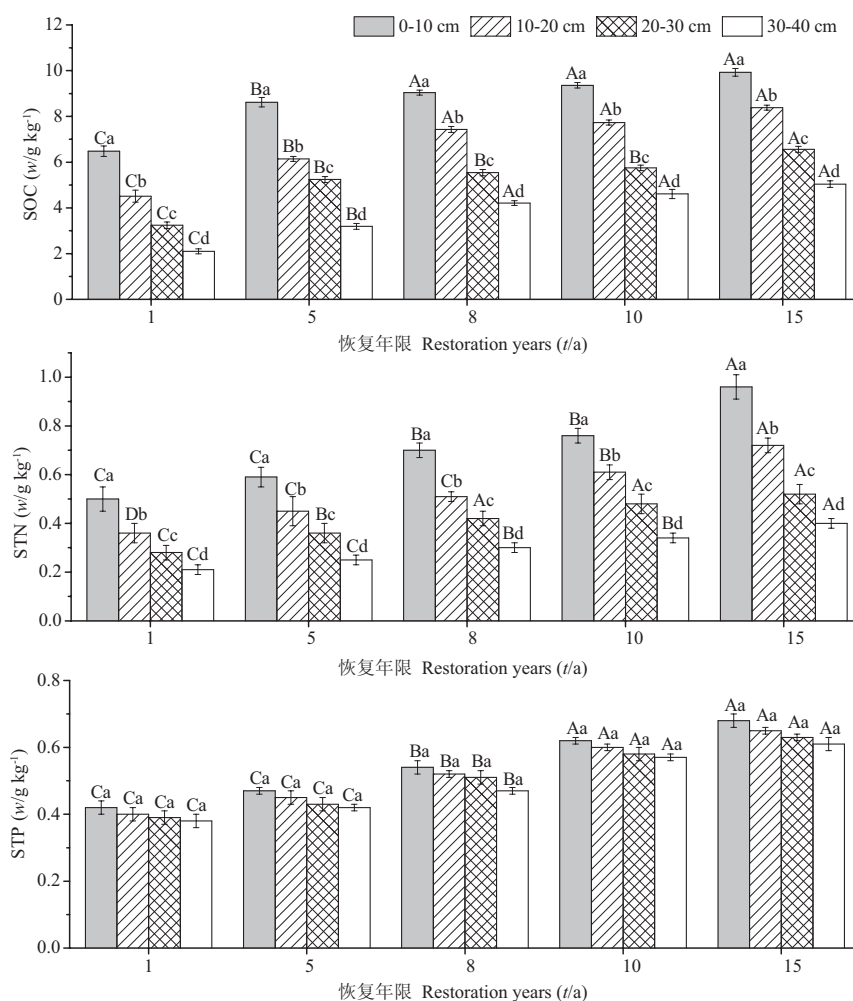


图1 人工草地不同土层深度土壤有机碳 (SOC)、全氮 (STN)、全磷 (STP) 含量. 不同大写字母表示不同恢复年限的差异性 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示不同土层深度的差异性 ($P < 0.05$).

Fig. 1 The contents of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (STN) and total phosphorus (STP) in different soil depth of artificial grassland. Different capital letters indicate significant differences between different restoration years ($P < 0.05$); different lowercase letters indicate significant differences between different soil depths ($P < 0.05$).

谢能力越来越旺盛,凋落物的分解作用与有机质的积累作用越来越强所致^[31]. 同一植被恢复阶段,土壤有机碳、全氮含量呈上高下低的特征,且表层显著高于底层 ($P < 0.05$),这是由于土壤碳、氮的来源主要以植被凋落物为主,堆积在地表表面的植被凋落物在微生物的分解作用下形成了大量的有机物质,由于地表表面是输入有机物质的最初界面,因此土壤有机碳、全氮首先在表层土壤中富集,随着土层深度的加深,有机物质向下的输入量逐渐减少,导致了土壤碳、氮含量随深度的增加而减少. 也有研究者指出,植物根系是影响土壤有机碳的垂直分布的直接原因^[32],根系的分泌物、腐解的死根是底层土壤有机碳的唯一来源. 磷素是一种在土壤中有较低迁移率的沉积性矿物元素^[33],因此在不同土层之间磷素的差异不明显 ($P > 0.05$).

2.3 不同恢复年限人工草地土壤碳氮磷化学计量特征的差异

土壤碳、氮和磷化学计量比是衡量土壤有机质组成和预测有机质分解速率的重要指标^[2],反映了土壤释放氮、磷

矿化元素的能力. 表3为不同样地土壤碳、氮和磷化学计量特征. 土壤C/N是衡量土壤氮素矿化能力的指标,既可反映土壤微生物的活动能力,又可指示植被凋落物及根系残体对土壤碳、氮元素的积累^[34-35],土壤有机碳的累积有利于土壤氮素有效性的增加. 土壤C/N越小,越有利于氮矿化及养分释放,从而进一步促进植被对氮素的吸收. 本研究中,随着恢复年限的增长,人工草地土壤C/N呈先增后减的趋势,其变化范围为10.66-13.62,平均值为11.80,最大值出现在5年恢复阶段. 人工草地的C/N值(11.80)低于全球平均值(13.33)^[36],但处于中国土壤C/N平均值(10-12)之间^[36-37]. Tian等对全国土壤C/N研究时发现,虽然碳、氮含量在空间上具有较大的变异性,但C/N保持相对稳定,这反映了二者同时作为结构性成分时紧密相关^[36],且在累积和消耗的过程中维持着相对稳定的比值^[38]. 土壤C/P是反映土壤微生物在矿化作用下释放磷素或者从土壤环境中吸收固定磷素潜力的重要指标^[39]. 本研究中土壤C/P的变化范围为9.19-13.18,呈先增后减再增的趋势,最大值出现在8年恢复阶段,平均值为11.86,低于我

国陆地土壤的平均水平 (52.70)^[36]. C/P较低时表明有机质分解时释放的养分较多, 磷的有效性较高, 除了被植物生长吸收外, 也有部分磷素残留在土壤中. 土壤N/P是判断当前氮、磷限制性作用的重要指标之一, 用于确定养分限制的阈值^[40]. 本研究的人工草地土壤N/P的变化范围为0.82-1.17, 最大值出现在15年恢复阶段, 平均值为1.02, 远低于全球不同生态系统土壤N/P 的平均水平 (13)^[41]和全国土壤N/P 的平均水平

(9.3)^[42]. 由于磷素在土壤中的含量相对稳定, 较低的N/P反映了人工恢复草地土壤氮素匮乏, 草本植物生长主要受氮素限制. 天然草地除C/N比低于人工草地外, C/P、N/P均显著高于人工草地 ($P < 0.05$). 除了恢复5年的人工草地外, 天然草地C/N与其他恢复年限的人工草地差异不显著 ($P > 0.05$).

如图2所示, 不同恢复年限土壤C/P、N/P均随着土层加深而降低, 且存在显著的差异性 ($P < 0.05$), 这是由于土壤

表3 不同样地土壤化学计量特征
Table 3 Soil stoichiometric characteristics in different sampling plots

样地类型 Sample type	C/N	C/P	N/P
1年人工草地 1-year artificial grassland	11.33 ± 1.75 b	9.19 ± 0.60 c	0.82 ± 0.10 c
5年人工草地 5-year artificial grassland	13.62 ± 1.67 a	12.32 ± 1.65 b	0.92 ± 0.20 c
8年人工草地 8-year artificial grassland	11.84 ± 0.91 ab	13.18 ± 0.60 ab	1.12 ± 0.05 b
10年人工草地 10-year artificial grassland	11.56 ± 1.68 b	12.19 ± 1.75 b	1.06 ± 0.07 b
15年人工草地 15-year artificial grassland	10.66 ± 0.73 b	12.41 ± 0.66 ab	1.17 ± 0.04 ab
天然草地 Natural grassland	10.86 ± 1.24 b	14.03 ± 1.28 a	1.30 ± 0.07 a

不同小写字母表示不同样地的差异性 ($P < 0.05$).
Different lowercase letters indicate the difference between different plot types ($P < 0.05$).

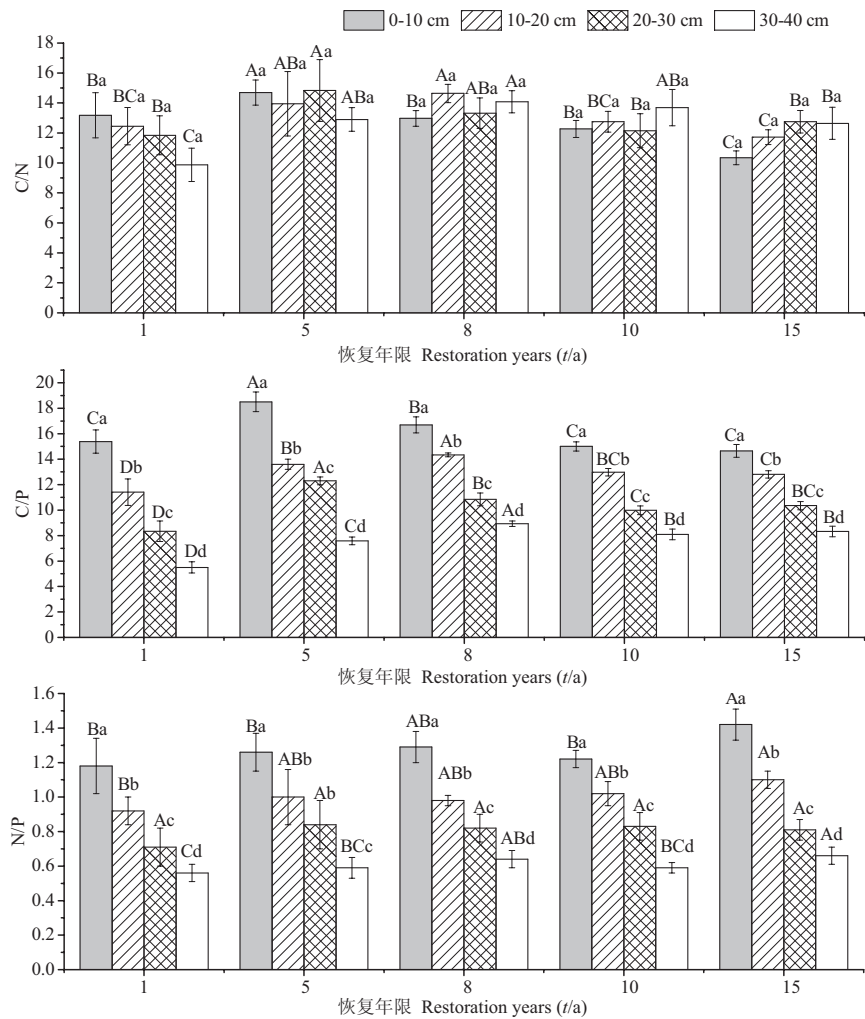


图2 人工草地不同土层深度土壤化学计量特征. 不同大写字母表示不同恢复年限的差异性 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示不同土层深度的差异性 ($P < 0.05$).

Fig. 2 Soil stoichiometric characteristics in different soil depth of artificial grassland. Different capital letters indicate significant differences between different restoration years ($P < 0.05$); different lowercase letters indicate significant differences between different soil depths ($P < 0.05$).

有机碳、全氮含量随土层深度的增加而不断减小,而全磷含量较为稳定的原因导致的。土壤C/N在各土层间无明显差异 ($P > 0.05$),与朱秋莲等的研究结果^[39]一致,这说明不同恢复阶段草地土壤在各土层深度的C/N变化不大,验证了不同生态系统土壤C/N相对稳定的结果^[41, 43],这也与化学计量学的基本原则相符合,即有机物质的形成除了需要一定数量的氮和其他营养成分之外,还需要与其相应的相对固定比率的碳^[44]。

2.4 不同恢复年限人工草地土壤碳氮磷及其化学计量特征与理化性质的相关性

利用Pearson相关分析法对土壤理化性质、土壤碳氮磷含量及其化学计量比进行相关性分析,分析结果如表4所示。土壤有机碳、全氮和全磷与土壤理化性质之间具有显著的相关性 ($P < 0.01$),这与在生物地球化学循环中土壤与植物之间存在着必然联系有关^[16],植物根系不断吸收土壤中的养分满足自身生长需要,日益成熟的植物根系在土壤中伸长使土壤容重、总孔隙度等理化性质得到改善,良好的通气透水条件有利于草本植被的生长发育。同时,草本植被的地上凋落物和地下根系分泌物反馈作用于土壤,引起了土壤中养分含量的变化,进而促进了土壤动物和微生物的活动,改善了地表土壤的状况。其中,含水率与土壤有机碳、全氮和全磷间的相关系数最大,这与李红林等^[45]、肖烨等^[46]、王长庭等^[47]的研究结果一致。这是因为土壤水分含量多,能抑制有机碳和有机氮的矿化,促进有机碳、氮的累积^[47-48]。土壤有机碳含量与全氮、全磷含量间存在显著的正相关性 ($P < 0.01$),其中有机碳与全氮的相关系数达0.900,说明两者具有极高的耦合关系,朱秋莲等^[39]、曾全超等^[49]、李金芬等^[50]也得出相似的结论,Paul认为任何生态系统中氮素的流动都依赖于碳素的流动^[1],土壤中的氮素多以有机氮的形式存在于有机质中^[51],土壤有机碳含量能够显著影响土壤氮素的矿化潜力^[52],因此土壤有机碳、全氮之间具有高度的相关性和大致的规律性。土壤全氮、全磷之间也存在显著相关性 ($P < 0.01$)。土壤化学计量比是反映土壤养分限制性的重要指标^[2],由表4可知,C/N与全氮含量存在显著负相关关系 ($P < 0.05$),与有机碳含量不存在相关性 ($P > 0.05$),说明C/N受氮素影响较大;C/P与土壤有机碳含量呈显著正相关 ($P < 0.01$),与全磷含量不相关 ($P > 0.05$),则说明C/P主要受碳素限制;而N/P与全氮、全磷含量均达到显著正相关 ($P < 0.01$),说明N/P由氮素、磷素共同决定。

3 结论

经过多年的人工草地恢复后,草地土壤物理结构和养分状况得到了改善,土壤含水率大幅增加,土壤容重减小,总孔隙度增大,土壤pH值在恢复前10年变化显著,土壤有机碳、全氮和全磷含量均随恢复时间的推移而增加。根据土壤有机碳、全氮和全磷含量与土壤生态化学计量比的相关性分析结果可知,氮和磷是该地区主要的限制营养元素,建议当地在草地恢复过程中适量施加有机肥料以提高土壤中营养元素的含量,确保草本植物健康生长和草地恢复效果。

通过建植人工草地不仅能让土壤结构和养分含量发生变化,在保持水土、调节气候等方面也起到了积极的作用,可作为罗玉沟流域草地生态恢复的有效措施之一。但是,土壤恢复需要经历一个长期的、复杂的过程,仅靠单一的草地恢复措施来提高植被覆盖难以使草地生态系统的生态功能得到快速地、全面地恢复^[53]。因此,建议当地可采取草灌结合、草木结合等方式培肥土壤,提高植物生产力。本研究仅对5个不同恢复年限草地中表层土壤碳氮磷含量变化及其化学计量特征进行了初步研究,对于全面评价罗玉沟流域不同恢复年限人工草地的生境状况,除了需要精确恢复年限的时间和缩小恢复年限的跨度外,还需要结合草本植物及其凋落物中碳、氮和磷等元素的含量与比例关系开展进一步研究。

参考文献 [References]

- Paul E. Nitrogen Cycling in Terrestrial Ecosystems [J]. *Environ Biogeochem*, 1976, 1: 225-243
- 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 [Wang SQ, Yu GR. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, 28 (8): 3937-3947]
- Zeng QC, Liu Y, Fang Y, Ma RT, Lal R, An SS, Huang YM. Impact of vegetation restoration on plants and soil C:N:P stoichiometry on the Yunwu Mountain Reserve of China [J]. *Ecol Eng*, 2017, 109: 92-100
- Niu SQ, Ren LN, Song LJ, Duan YY, Huang T, Han XH, Hao WF. Plant stoichiometry characteristics and relationships with soil nutrients in *Robinia pseudoacacia* communities of different planting ages [J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, 37 (6): 355-362
- 贺合亮, 阳小成, 王东, 孙誉育, 尹春英, 李婷, 黎云祥, 周国英, 张林, 刘庆. 青藏高原东部窄叶鲜卑花灌丛土壤C、N、P生态化学计量学特征[J]. *应用与环境生物学报*, 2015, 21 (6): 1128-1135 [He HL, Yang XC, Wang D, Sun YY, Yin CY, Li T, Li YX, Zhou GY, Zhang L,

表4 土壤碳氮磷及其化学计量特征与理化性质相关分析

Table 4 The correlation analysis between carbon, nitrogen, phosphorus and its chemical characteristics and physic-chemical properties

指标 Index	含水率 Moisture content	容重 Bulk density	总孔隙度 Total porosity	pH	SOC	TN	TP
SOC	0.848**	-0.597**	0.638**	-0.776**	1		
TN	0.889**	-0.588**	0.636**	-0.760**	0.900**	1	
TP	0.830**	-0.646**	0.655**	-0.731**	0.835**	0.888**	1
C/N	-0.379	0.147	-0.184	0.177	-0.092	-0.504*	-0.317
C/P	0.444*	-0.292	0.343	-0.493*	0.727**	0.481*	0.237
N/P	0.716**	-0.406*	0.478*	-0.611**	0.758**	0.856**	0.530**

** $P < 0.01$; * $P < 0.05$; SOC: 土壤有机碳; STN: 土壤总氮; STP: 土壤总磷。
SOC: Soil organic carbon; STN: Soil total nitrogen; STP: Soil total phosphorus.

- Liu Q. Ecological stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus of *Sibiraea angustata* shrub in eastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2015, **21** (6): 1128-1135]
- 6 Elser JJ, Bracken ME, Cleland EE, Gruner DS, Harpole WS, Hillebrand H, Ngai JT, Seabloom EW, Shurin JB, Smith JE. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems [J]. *Ecol Lett*, 2007, **10** (12): 1135-1142
 - 7 侯阁, 孙建, 朱军涛, 罗广祥, 王金牛. 羌塘高原高寒草地植物地上地下碳氮生态化学计量特征及其影响因素[J]. 应用与环境生物学报, 2018, **24** (2): 187-194 [Hou G, Sun J, Zhu JT, Luo GX, Wang JN. Carbon: nitrogen ecological stoichiometry of the alpine steppe between the aboveground and belowground parts of plants and relevant impact factors in the Qiangtang Plateau [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2018, **24** (2): 187-194]
 - 8 程滨, 赵永军, 张文广, 安树青. 生态化学计量学研究进展[J]. 生态学报, 2010, **30** (6): 1628-1637 [Cheng B, Zhao YJ, Zhang WG, An SQ. The research advances and prospect of ecological stoichiometry [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, **30** (6): 1628-1637]
 - 9 李裕元, 邵明安, 陈洪松, 霍竹, 郑纪勇. 水蚀风蚀交错带植被恢复对土壤物理性质的影响[J]. 生态学报, 2010, **30** (16): 4303-4316 [Li YY, Shao MA, Chen HS, Huo Z, Zheng JY. Impacts of vegetation recovery on soil physical properties in the cross area of wind-water erosion [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, **30** (16): 4306-4316]
 - 10 Wang CT, Wang GX, Liu W, Wang Y, Hu L, Ma L. Effects of establishing an artificial grassland on vegetation characteristics and soil quality in a degraded meadow [J]. *Isr J Ecol Evol*, 2013, **59** (3): 141-153
 - 11 马金辉. 天水罗裕沟流域土壤侵蚀时空格局模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2007 [Ma JH. The modeling of temporal-spatial pattern of soil erosion in Luoyugou watershed, Tianshui, China [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2007]
 - 12 Wang DD, Yu XX, Zhang JJ, Jia GD, Zhang HB, Liu ZQ, Hou GR. The impacts of *Robinia pseudoacacia* litter cover and roots on soil erosion in the Loess Plateau, China [J]. *Chem Ecol*, 2017, **33** (6): 528-542
 - 13 Han YN, Niu JZ, Xin ZB, Zhang W, Zhang TL, Wang XL, Zhang YS. Optimization of land use pattern reduces surface runoff and sediment loss in a Hilly-Gully watershed at the Loess Plateau, China [J]. *For Syst*, 2016, **25** (1): 1-14
 - 14 赵阳, 余新晓. 黄土丘陵沟壑区典型流域气候和土地利用变化对径流泥沙产量的影响[J]. 北京林业大学学报, 2013, **35** (3): 39-45 [Zhao Y, Yu XX. Effects of climate variation and land use change on runoff-sediment yield in typical watershed of Loess Hilly-Gully region [J]. *J Beijing For Univ*, 2013, **35** (3): 39-45]
 - 15 安乐平, 秦瑞杰, 康廷祥, 韩冀. 黄土丘陵沟壑区罗玉沟流域水沙特性分析[J]. 中国水土保持, 2014 (12): 36-39 [An LP, Qin RJ, Kang TX, Han. Characteristic of runoff and sediment of Luoyugou Watershed of Gullied Rolling Loess area [J]. *Soil Water Conserv China*, 2014 (12): 36-39]
 - 16 王学霞, 董世魁, 李媛媛, 李小艳, 温璐, 吴嫫. 三江源区草地退化与人工恢复对土壤理化性状的影响[J]. 水土保持学报, 2012, **26** (4): 113-117, 122 [Wang XX, Dong SK, Li YY, Li XY, Wen L, Wu Y. Effects of grassland degradation and artificial restoration on soil physicochemical properties in Three-river headwater [J]. *J Soil Water Conserv*, 2012, **26** (4): 113-117, 122]
 - 17 饶丽仙. 宁夏典型草原区退耕草地优势植物及土壤C、N、P生态化学计量学特征研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2017 [Rao LX. Research of the dominant plants and soil C, N, P ecologic stoichiometry characteristics on the grassland from cultivated land in a typical steppe in Ningxia [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2017]
 - 18 Liu Y, Dang ZQ, Tian FP, Wang D, Wu GL. Soil organic carbon and inorganic carbon accumulation along a 30-year grassland restoration chronosequence in semi-arid region (China) [J]. *Land Deg Dev*, 2017, **28**: 189-198
 - 19 Liu JH, Wu JJ, Su HB, Gao ZH, Wu ZT. Effects of grazing exclusion in Xilin Gol grassland differ between regions [J]. *Ecol Eng*, 2017, **99**: 271-281
 - 20 张学权. 不同植被恢复土壤容重和孔隙度特征分析[J]. 成都大学学报 (自然科学版), 2017, **36** (3): 325-327 [Zhang XQ. Analysis of soil bulk density and porosity in different vegetation restoration [J]. *J Chengdu Univ*, 2017, **36** (3): 325-327]
 - 21 彭文英, 张科利, 杨勤科. 黄土坡面土壤性质随退耕时间的动态变化研究[J]. 干旱区资源与环境, 2006, **20** (5): 153-158 [Peng WY, Zhang KL, Yang QK. Research on soil property dynamics in retired farmland in the loess sloping land [J]. *J Arid Land Resour Environ*, 2006, **20** (5): 153-158]
 - 22 王维奇, 曾从盛, 钟春棋, 全川. 人类干扰对闽江河口湿地碳、氮、磷生态化学计量学特征的影响[J]. 环境科学, 2010, **31** (10): 2411-2416 [Wang WQ, Zeng CS, Zhong CQ, Tong C. Effect of human disturbance on ecological stoichiometry characteristics of soil Carbon, Nitrogen and Phosphorus in Minjiang River estuarine wetland [J]. *Environ Sci*, 2010, **31** (10): 2411-2416]
 - 23 薛超玉, 焦峰, 张海东, 汝海丽. 黄土丘陵区弃耕地恢复过程中土壤与植物恢复特征[J]. 草业科学, 2016, **33** (3): 368-376 [Xue CY, Jiao F, Zhang HD, Ru HL. The characteristics of plant species and soil quality in the restoration process of the Loess Hilly Region [J]. *Pratac Sci*, 2016, **33** (3): 368-376]
 - 24 巩杰, 陈利顶, 傅伯杰, 李延梅, 黄志霖, 黄奕龙, 彭鸿嘉. 黄土丘陵区小流域土地利用和植被恢复对土壤质量的影响[J]. 应用生态学报, 2004, **15** (12): 2292-2296 [Gong J, Chen LD, Fu BJ, Li YM, Huang ZL, Huang YL, Peng HJ. Effects of land use and vegetation restoration on soil quality in a small catchment of the Loess Plateau [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2004, **15** (12): 2292-2296]
 - 25 张剑, 汪思龙, 王清奎, 刘燕新. 不同森林植被下土壤活性有机碳含量及其季节变化[J]. 中国生态农业学报, 2009, **17** (1): 41-47 [Zhang J, Wang SL, Wang QK, Liu YX. Content and seasonal change in soil labile organic carbon under different forest covers [J]. *Chin J Ecol Agric*, 2009, **17** (1): 41-47]
 - 26 Deng L, Shanguan ZP. Afforestation drives soil carbon and nitrogen changes in China [J]. *Land Degrad Dev*, 2017, **28**: 151-165
 - 27 Cross WF, Benstead JP, Forest PC, Thomas SA. Ecological stoichiometry in fresh water benthic systems: recent progress and perspectives [J]. *Freshwater Biol*, 2005, **50** (11): 1895-1912
 - 28 刘兴诏, 周国逸, 张德强, 刘世忠, 褚国伟, 闫俊华. 南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中N、P的化学计量学特征[J]. 植物生态学报, 2010, **34** (1): 64-71 [Liu XZ, Zhou GY, Zhang DQ, Liu SZ, Chu GW, Yan JH. N and P stoichiometry of plant and soil in lower subtropical forest successional series in southern China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2010, **34** (1): 64-71]
 - 29 李炜, 郑子成, 李廷轩. 不同植茶年限土壤团聚体碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 应用生态学报, 2015, **26** (1): 9-16 [Li W, Zheng ZC, Li TX. Ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen and phosphorus

- within soil aggregates in tea plantations with different ages [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2015, **26** (1): 9-16]
- 30 邵继承, 张丽妍, 杨恒山. 种植年限对紫花苜蓿栽培草地草产量及土壤氮、磷、钾含量的影响[J]. 草业科学, 2009, **26** (12): 82-86 [Tai JC, Zhang LY, Yang HS. Effect of different planting years on the yield of alfalfa and content of N, P, K in soil [J]. *Pratac Sci*, 2009, **26** (12): 82-86]
 - 31 张海东, 汝海丽, 焦峰, 薛超玉, 郭美丽. 黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落与土壤C、N、P、K 化学计量学特征[J]. 环境科学, 2016, **37** (3): 1128-1138 [Zhang HD, Ru HL, Jiao F, Xue CY, Guo ML. C, N, P, K stoichiometric characteristic of leaves, root and soil in different abandoned years in Loess Plateau [J]. *Environ Sci*, 2016, **37** (3): 1128-1138]
 - 32 Jobbágy EG, Jackson RB. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation [J]. *Ecol Appl*, 2002, **10** (2): 423-436
 - 33 邱扬, 傅伯杰, 王军, 陈利顶. 黄土高原小流域土壤养分的时空变异及其影响因子[J]. 自然科学进展, 2004, **14** (3): 294-299 [Qiu Y, Fu BJ, Wang J, Chen LD. Spatial and temporal variation of soil nutrients in small watershed of loess plateau and its influencing factors [J]. *Prog Nat Sci*, 2004, **14** (3): 294-299]
 - 34 王振, 王子煜, 韩清芳, 李文静, 韩丽娜, 丁瑞霞, 贾志宽, 杨宝平. 黄土高原苜蓿草地土壤碳、氮变化特征研究[J]. 草地学报, 2013, **21** (6): 1073-1079 [Wang Z, Wang ZY, Han QF, Li WJ, Han LN, Ding RX, Jia ZK, Yang BP. Soil carbon and nitrogen variation characteristics of Alfalfa grassland in Loess Plateau Area [J]. *Acta Agrestia Sin*, 2013, **21** (6): 1074-1079]
 - 35 张良侠, 樊江文, 张文彦, 唐风沛. 京津风沙源治理工程对草地土壤有机碳库的影响——以内蒙古锡林郭勒盟为例[J]. 应用生态学报, 2014, **25** (2): 374-380 [Zhang LX, Fan JW, Zhang WY, Tang FP. Impact of the Beijing and Tianjin Sand Source Control Project on the grassland soil organic carbon storage: a case study of Xilingol League, Inner Mongolia, China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2014, **25** (2): 374-380]
 - 36 Tian HQ, Chen GS, Zhang C, Melillo JM, Hall CAS. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data [J]. *Biogeochemistry*, 2010, **98** (1-3): 139-151
 - 37 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000 [Huang CY. Soil Science [M]. Beijing: Chines Agricultural Press, 2000]
 - 38 Ågren GI. Stoichiometry and nutrition of plant growth in natural communities [J]. *Annu Rev Ecol Evol Syst*, 2008, **39** (39): 153-170
 - 39 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[J]. 生态学报, 2013, **33** (15): 4674-4682 [Zhu QL, Xing XY, Zhang H, An SS. Soil ecological stoichiometry under different vegetation area on loess hilly-gully region [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33** (15): 4674-4682]
 - 40 Güsewell S, Koerselman W, Verhoeven JTA. Biomass N:P ratios as indicators of nutrient limitation for plant populations in wetlands [J]. *Ecol Appl*, 2003, **13** (2): 372-384
 - 41 Cleveland CC, Liptzin D. C:N:P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? [J]. *Biogeochemistry*, 2007, **85** (3): 235-252
 - 42 Yuan ZY, Chen HY, Reich PB. Global-scale latitudinal patterns of plant fine-root nitrogen and phosphorus [J]. *Nat Commun*, 2011, **2** (1): 344
 - 43 Yang YH, Fang JY, Guo DL, Ji CJ, Ma WH. Vertical patterns of soil carbon, nitrogen and carbon: Nitrogen stoichiometry in Tibetan grasslands [J]. *Biogeosci Disc*, 2010, **7**: 1-24
 - 44 Sterner RW, Elser JJ. Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to the Biosphere [M]. Princeton: Princeton University Press, 2002
 - 45 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[J]. 土壤学报, 2015, **52** (6): 1345-1355 [Li HL, Gong L, Zhu ML, Liu ZY, Xie LN, Hong Y. Stoichiometric characteristics of soil in an oasis on northern edge of Tarim Basin, China [J]. *Acta Pedol Sin*, 2015, **52** (6): 1345-1355]
 - 46 肖焱, 黄志刚, 武海涛, 吕宪国. 三江平原4种典型湿地土壤碳氮分布差异和微生物特征[J]. 应用生态学报, 2014, **25** (10): 2847-2854 [Xiao Y, Huang ZG, Wu HT, Lü XG. Carbon and nitrogen distributions and microbial characteristics in the soils of four types of wetlands in Sanjiang Plain, Northeast China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2014, **25** (10): 2847-2854]
 - 47 王长庭, 龙瑞军, 王启基, 景增春, 尚占环, 丁路明. 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 [Wang CT, Long RJ, Wang QJ, Jing ZC, Shang ZH, Ding LM. 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 Pratac Sin*, 2005, **14** (4): 15-20]
 - 48 王华静, 宁龙梅, 徐留兴, 黄慧, 杜鹃. 川西北高寒地区土壤有机碳含量垂直分布特征[J]. 土壤通报, 2012, **43** (1): 76-80 [Wang HJ, Ning LM, Xu LX, Huang H, Du J. Vertical distribution characteristics of soil organic carbon content in an Alpine-cold Zone of northwest Sichuan [J]. *Chin J Soil Sci*, 2012, **43** (1): 76-80]
 - 49 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[J]. 自然资源学报, 2016, **31** (11): 1881-1891 [Zeng QC, Li X, Dong YH, An SS. Ecological stoichiometry of soils in the Yanhe Watershed in the Loess Plateau: the influence of different vegetation zones [J]. *J Nat Resour*, 2016, **31** (11): 1881-1891]
 - 50 李金芬, 程积民, 刘伟, 古晓林. 黄土高原云雾山草地土壤有机碳、全氮分布特征[J]. 草地学报, 2010, **18** (5): 661-668 [Li JF, Cheng JM, Liu W, Gu XL. Distribution of soil organic carbon and total nitrogen of grassland in Yunwu Mountain of Loess Plateau [J]. *Acta Agrestia Sin*, 2010, **18** (5): 661-668]
 - 51 罗由林, 李启权, 王昌全, 辛志远, 王永豪, 宋安军, 万傲然, 唐科. 近30a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 [Luo YL, Li QQ, Wang CQ, Xin ZY, Wang YH, Song AJ, Wan AR, Tang K. Last 30a changes of C, N and P ecological stoichiometry of different land use types in hilly area of Mid-Sichuan Basin, Southwest China [J]. *Soils*, 2016, **48** (4): 726-733]
 - 52 曹广民, 张金霞, 鲍新奎, 周党卫. 高寒草甸生态系统磷素循环[J]. 生态学报, 1999, **19** (4): 514-518 [Cao GM, Zhang JX, Bao XK, Zhou DW. The phosphorus cycling in an Alpine Meadow Ecosystem [J]. *Acta Ecol Sin*, 1999, **19** (4): 514-518]
 - 53 金生英, 严林, 马玉寿, 陈生翠, 陈伶俐, 马洪福, 李琳琳. 三江源区人工草地中小型土壤动物群落特征及季节变化[J]. 草地学报, 2014, **22** (5): 954-960 [Jin SY, Yan L, Ma YS, Chen SC, Chen LL, Ma HF, Li LL. Seasonal dynamics of meso-micro soil fauna communities in the artificial grassland of Three-river Source Region in Qinghai, China [J]. *Acta Agrestia Sin*, 2014, **22** (5): 954-960]