



矿区排土场苜蓿地土壤生态化学计量特征

王东丽 张子倩 刘阳 赵晓亮 连昭 于百和 王东

Soil ecological stoichiometric characteristics of *Medicago sativa* land of mining area waste dumps

WANG Dongli, ZHANG Ziqian, LIU Yang, ZHAO Xiaoliang, LIAN Zhao, YU Baihe, WANG Dong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0605>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同恢复年限矿山排土场植物群落特征

Vegetation community characteristics of mine dumps under different recovery years

草业科学. 2019, 36(6): 1508 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0477>

巢湖湖滨带不同植被类型土壤碳氮磷生态化学计量学特征

Effect of vegetation type on the eco-stoichiometric characteristics of soils from around Chaohu Lake

草业科学. 2020, 37(8): 1448 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0633>

黄土高原不同种植年限苜蓿草地土壤与植物化学计量特征

Ecological stoichiometry characteristics of soil and plant of alfalfa with different growing years on the Loess Plateau

草业科学. 2019, 36(5): 1189 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0475>

黄土高原不同灌水量下春小麦土壤与植物碳氮磷含量及其化学计量比特征

Soil and plant carbon, nitrogen, and phosphorus content and their stoichiometry in spring wheat under different irrigation treatments in the Loess Plateau

草业科学. 2020, 37(9): 1803 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0538>

青海湖东沙化治理过程中土壤酶活性及养分含量特征

Soil nutrient content and the activities of soil enzymes during the desertification restoration process to the east of Qinghai Lake

草业科学. 2017, 11(7): 1408 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0319>

套种紫花苜蓿对玉米根际土壤碳、氮、磷及真菌群落的影响

Effects of alfalfa intercropping on soil carbon, nitrogen, and phosphorus and the fungal community in the rhizosphere of soils in silage maize

草业科学. 2020, 37(1): 20 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0247>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0605

王东丽, 张子倩, 刘阳, 赵晓亮, 连昭, 于百和, 王东. 矿区排土场苜蓿地土壤生态化学计量特征. 草业科学, 2022, 39(7): 1323-1332.

WANG D L, ZHANG Z Q, LIU Y, ZHAO X L, LIAN Z, YU B H, WANG D. Soil ecological stoichiometric characteristics of *Medicago sativa* land of mining area waste dumps. Pratacultural Science, 2022, 39(7): 1323-1332.

矿区排土场苜蓿地土壤生态化学计量特征

王东丽¹, 张子倩¹, 刘阳¹, 赵晓亮¹, 连昭¹, 于百和¹, 王东²

(1. 辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学矿业学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 紫花苜蓿(*Medicago sativa*)因其较强的适生性与抗逆性, 成为半干旱矿区排土场主要的生态重建植物, 但在排土场恢复过程中常出现提前衰退现象。为探明黄土区排土场苜蓿恢复过程中是否受土壤养分的限制, 选取不同恢复年限(2、4、6、10年)苜蓿地为研究对象, 以新排土为对照, 研究0~60 cm土壤中有机碳、全氮、全磷含量与化学计量特征及关系。结果表明: 土壤有机碳、全氮、全磷含量随恢复年限增加变化规律不一致, 分别在种植10、6和2年时最高, 在种植2、4和10年时最低; 随土层深度的变化, 土壤有机碳、全氮含量整体呈下降趋势。在苜蓿恢复过程中, C:N与C:P整体上呈“W”型的变化规律, 土壤N:P呈“V”型变化规律; 恢复6和10年时土壤C:P和N:P均随土层加深而下降。土壤有机碳含量与氮、磷含量之间均具有极显著正相关性($P < 0.01$), 矿区排土场土壤养分主要与土壤有机碳含量关系密切, 土壤全磷含量不受其他养分影响。在半干旱黄土区排土场, 苜蓿恢复模式具有一定的土壤肥力恢复作用, 恢复过程中不同程度地受氮、磷养分限制, 建议加强科学施肥管理或在恢复4至6年时及时利用。

关键词: 黄土区; 露天煤矿; 生态重建; 紫花苜蓿; 土壤碳氮磷; 养分限制; 土壤改良

文献标志码: A **文章编号:** 1001-0629(2022)07-1323-10

Soil ecological stoichiometric characteristics of *Medicago sativa* land of mining area waste dumps

WANG Dongli¹, ZHANG Ziqian¹, LIU Yang¹, ZHAO Xiaoliang¹, LIAN Zhao¹, YU Baihe¹, WANG Dong²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China;

2. College of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China)

Abstract: Planting of *Medicago sativa* has become the main ecological reconstruction model for the revegetation of waste dumps in semi-arid mining areas, owing to this plant's strong adaptability and stress resistance. However, populations have been found to undergo premature declines during the restoration process. To determine whether *M. sativa* restoration in loess areas is restricted by a deficiency in soil nutrients, we selected sites that had undergone 2, 4, 6, and 10 years of restoration, along with newly dumped soil used as a control, and examined the C, N, and P contents and stoichiometric characteristics of the 0~60 cm soil layer. The results showed that the soil C, N, and P contents underwent inconsistent changes with a prolongation of the restoration period, with contents being highest after 10, 6, and 2 years, and lowest after 2, 4, and 10 years, respectively. Within the vertical soil profile, the soil C and N content generally showed a decreasing trend with soil depth. As *M. sativa* restoration proceeded, the C:N and C:P ratios showed a general “W”-shaped trend, whereas the N:P ratio showed a “V”-shaped trend. Both soil C:P and N:P ratios decreased with an increase in soil depth after 6 and 10 years. There was a very significant positive correlation between soil organic carbon and N and P contents ($P < 0.01$). Nutrients in

收稿日期: 2021-10-06 接受日期: 2022-01-23

基金项目: 辽宁省自然资源科技创新项目“辽西矿区土壤改良与生物修复技术及应用研究”; 内蒙古自治区科技计划项目(201701024)

通信作者: 王东丽(1986-), 女, 山西怀仁人, 讲师, 博士, 主要从事生态环境修复研究。E-mail: starhome0522@163.com

soil of the mining area dumping ground were mainly closely related to soil organic carbon, whereas the total P content of soil was largely unaffected by other nutrients. In the semi-arid loess area, the mode of *M. sativa* restoration has a certain effect on restoring soil fertility. During the restoration process, plant growth is limited to varying extents by N and P deficiencies. Accordingly, to rectify this problem, we would recommend enhancing scientific fertilization management, or at least carrying out fertilization during the period between 4 to 6 years after commencing restoration.

Keywords: loess region; open-pit coal mine; ecological reconstruction; *Medicago sativa*; soil carbon, nitrogen and phosphorus; nutrient limitation; soil improvement

Corresponding author: WANG Dongli E-mail: starhome0522@163.com

紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 因具有较强的抗逆性与适生性, 强大的根系具有较好的土壤结构改良效益^[1] 与根瘤固氮作用^[2], 目前在半干旱矿区废弃地被广泛种植^[2-4]。然而, 半干旱黄土区矿区废弃地生境恶劣, 而且缺乏人为经营管理, 紫花苜蓿群落发展到一定阶段会提前衰退, 可持续发展及矿区的生态功能发挥受到威胁, 导致退化的影响因素及机制亟需明确。

生态化学计量学是探索生态过程中能量与多种化学元素之间平衡的学科, 是生态学领域研究和讨论的核心内容, 而生态系统中主要组成元素碳、氮、磷的化学计量学特征及其相关关系是生态学领域的研究热点^[5]。土壤作为陆地生态系统的重要组分, 与生物的生存和发展密切相关, 其碳、氮、磷元素是生物体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^[5-6]。此外, 氮和磷又是限制陆地植被生长的主要养分因子, 对调节凋落物分解速率和生态系统养分的平衡具有重要作用^[7]。因此, 研究土壤碳、氮、磷的化学计量特征, 对于揭示土壤养分的有效性和限制性以及元素的循环与平衡机制具有重要意义^[8]。

目前, 在生态化学计量方面的研究已取得一系列成果和进展, 涉及不同天然生态系统(高原、山地、草地等)不同尺度、生境、土地利用类型、植被类型与群落类型等的植物, 土壤, 枯落物等^[9-14]。对于矿区排土场类似人工重塑生态系统, 其植被恢复过程中生态化学计量研究对于植被恢复实践具有重要指导意义。然而, 近年来, 仅有少量研究集中于矿区不同植被恢复阶段或污染生境的植物、枯落物及土壤^[15], 而对于研究广泛分布的苜蓿恢复模式较少, 而且关于苜蓿的相关研究仅见于不同区域或不同栽培期的土壤养分变化特征^[16-19], 其在矿区恢

复过程中是否受到土壤养分的限制并未受到广泛重视, 利用生态化学计量理论探究其养分平衡机制的研究更少见。因此, 本研究选取黄土区矿区排土场不同恢复年限紫花苜蓿地为研究对象, 通过对土壤碳氮磷含量、生态化学计量特征及其在垂直剖面上演变特征进行研究, 明确种植紫花苜蓿恢复过程中土壤养分的限制性, 结合土壤养分与碳、氮、磷生态化学计量关系的分析, 探讨土壤养分在苜蓿恢复过程中的循环与平衡机制, 为半干旱矿区排土场苜蓿恢复模式提供经营管理依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

武家塔露天煤矿位于鄂尔多斯高原腹地、黄土高原和毛乌素沙地两个地貌单元之间的过渡地带($39^{\circ}15'16''\sim39^{\circ}17'50''N$, $110^{\circ}05'55''\sim110^{\circ}10'48''E$)。地形特征为西北高东南低, 基本呈斜坡状; 属半干旱半荒漠高原大陆性气候, 冬季严寒, 夏季炎热干燥, 温差大(-27.9~36.6 °C), 年均温6.8 °C, 无霜期152~169 d; 全年干旱多雨, 年均降水量390 mm, 主要在6月~9月以暴雨形式出现; 区域土壤类型为黄土、风沙土, 草甸土、栗钙土、砂土分布较分散; 主要植被类型为温带草原植被, 优势植被为旱生小叶灌木和耐寒抗旱半灌木、沙柳 (*Salix cheilophila*)、沙蒿 (*Artemisia desertorum*) 等。排土场平台复垦厚度约1 m, 采用刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、沙柳、沙棘 (*Hippophae rhamnoides*)、柠条 (*Caragana korshinskii*) 和紫花苜蓿等10多种种植恢复模式。复垦面积200 hm²以上, 其中苜蓿种植面积在50%以上^[4]。

1.2 样地选择

以武家塔4#排土场平台人工恢复年限分别为

2、4、6和10年的苜蓿地为研究对象,新排土为对照,覆土来源相同,且覆土的工艺一致,工艺均采用逐层覆压,总厚度为1 m,各样地未进行施肥与灌溉等管理措施,每年对苜蓿地进行刈割,达到10年时不进行刈割,具体样地信息如表1所列。

1.3 土壤样品采集与测定

在上述所选样地,按长边等分为3个取样区,在每个取样区随机选取3个样点,在每个样点附近采取多点混合采集法分层采集,一般设置6~10个点。采集土样时需先用工具将植被枯枝落叶层去掉,按照0—5、5—10、10—20、20—30、30—40、40—60 cm分层进行取样,每个采集点对应土层的土样混合为1个样品,再将土样带回到实验室。土样经实验室自然风干,挑去大块植物残体和石块等,根据杂物与土样的实际情况采用1.7 mm孔径的筛进行分离,再将土样过0.15 mm筛后装纸袋备用,用于测定土壤各项指标。

利用重铬酸钾氧化-外加热法测定土壤有机碳含量,火焰光度法测定速效钾含量,钼锑反比色法测定总磷和速效磷含量,凯氏定氮法测定土壤全氮含量,碱水解扩散法测定碱解氮含量,烘干法测定含水量^[20];分别使用PHS-P型pH计和DDB-303A型便携式电导率仪测定土壤pH和电导率。

1.4 数据分析处理

采用Excel 2018处理数据,采用Origin 2018制图;采用双因素方差(two-way ANOVA)分析不同恢复年限与不同土层深度对土壤养分含量及生态化学计量特征的影响,采用LSD法比较各指标在不同恢复年限苜蓿地的差异性,显著性水平设为0.05。

2 结果与分析

2.1 不同恢复年限土壤碳氮磷含量的变化特征

不同恢复年限苜蓿对土壤有机碳、全氮、全磷含量均产生极显著的影响($P < 0.01$) (表2),随恢复

表1 样地的基本信息
Table 1 Basic information on the sample sites

序号 Serial number	样地编号 Plot number	植被恢复模式 Vegetation restoration model	恢复年限 Restoration period/a	刈割次数 Cutting times	植被群落特征 Vegetation community characteristic
1	XPT	新排土 New waste dump	—	—	—
2	M ₂	2年苜蓿地 <i>M. sativa</i> land after 2 years of restoration	2	2	群落生长较好,平均高度为42.83 cm,盖度为60.5%,生物量可达108.02 kg·hm ⁻² ,主要的伴生种有阿尔泰狗娃花、猪毛菜。 The community grows well, the average height is 42.83 cm, the coverage is 60.5%, and the biomass can reach 108.02 kg·hm ⁻² . The main companion species include <i>Salsola collina</i> and <i>Heteropappus altaicus</i> .
3	M ₄	4年苜蓿地 <i>M. sativa</i> land after 4 years of restoration	4	2	群落生长好,平均高度为46.16 cm,盖度为47.83%,生物量可达56.24 kg·hm ⁻² ,主要的伴生种有阿尔泰狗娃花、猪毛菜。 The community grows well, the average height is 46.16 cm, the coverage is 47.83%, and the biomass can reach 56.24 kg·hm ⁻² . The main companion species are <i>S. collina</i> and <i>H. altaicus</i> .
4	M ₆	6年苜蓿地 <i>M. sativa</i> land after 6 years of restoration	6	1	群落生长好,平均高度为44.33 cm,盖度为30%,生物量可达65.48 kg·hm ⁻² ,伴生种以灰绿藜、狗尾草为主。 The community grows well, the average height is 44.33 cm, the coverage is 30%, and the biomass can reach 65.48 kg·hm ⁻² . The main companion species are <i>Chenopodium glaucum</i> and <i>Setaria viridis</i> .
5	M ₁₀	10年苜蓿地 <i>M. sativa</i> land after 10 years of restoration	10	0	群落生长较差,平均高度为40.5 cm,盖度为29.17%,生物量可达24.58 kg·hm ⁻² ,伴生种以猪毛蒿、糙隐子草为主。 The average height of the community is 40.5 cm, the coverage is 29.17%, and the biomass can reach 24.58 kg·hm ⁻² . The main companion species are <i>Kengia squarrosa</i> and <i>Artemisia scoparia</i> .

表2 恢复年限和土壤深度对土壤生态化学计量特征影响的双因素方差分析

Table 2 Two-way ANOVA analysis of the effects of restoration years and soil depth on soil ecostochiometric characteristics

处理 Parameter	自由度 Freedom	SOC		TN		TP		C:N		C:P		N:P	
		F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
恢复年限(R) Restoration years	4	6.03	<0.01	12.17	<0.01	42.10	<0.01	12.99	<0.01	31.33	<0.01	16.55	<0.01
土层深度(S) Soil depth	5	4.64	0.08	10.54	<0.01	0.86	0.52	5.54	<0.01	3.37	0.37	7.48	<0.01
R×S	20	9.20	<0.01	19.37	<0.01	1.57	0.10	2.74	<0.01	7.44	<0.01	7.59	<0.01

SOC, 土壤有机碳; TN, 土壤全氮; TP, 土壤全磷; C:N, 碳氮比; C:P, 碳磷比; N:P, 氮磷比; 下同。

SOC, organic carbon; TN, total nitrogen; TP, total phosphorus; C:N, ratio of carbon to nitrogen; C:P, ratio of carbon to phosphorus; N:P, ratio of nitrogen to phosphorus; this is applicable for the following figures and tables as well.

过程变化的趋势不同(图1)。土壤有机碳含量在0.36~6.72 g·kg⁻¹, 表现为在恢复4年时增加并维持稳定水平, 其中恢复2年时显著低于其他年限($P<0.05$), 在恢复10年时平均含量达到最高(3.53 g·kg⁻¹); 土壤全氮和全磷含量分别为0.09~0.58和0.04~0.21 g·kg⁻¹, 且均表现为随恢复年限增加呈“M”型波动变化, 其中土壤全氮平均含量在恢复6年时显著高于其他年限($P<0.05$), 而土壤全磷的平均含量在各恢复年限间均存在显著差异, 且在恢复2年时最高(0.17 g·kg⁻¹), 在恢复10年时最低(0.05 g·kg⁻¹)。

不同苜蓿恢复年限下土壤有机碳、全氮、全磷含量在垂直剖面上变化趋势各不相同(图2), 其中土壤全氮对土层深度的变化产生极显著的影响($P<0.01$)(表2), 各恢复年限下整体呈现随土层深度增加而降低的趋势, 恢复6年时各土层的含量均高于其他恢复年限; 各恢复年限下土壤有机碳在垂直土层变化不一致, 恢复6年和4年时在30~40 cm土层明显增加, 其他恢复年限下表现为随土层深度增加而降低的趋势; 各恢复年限下土壤全磷含量在各土层间呈波动性变化, 但含量变化不大, 在恢复2年时各土层含量均高于其他年限, 而在恢复4年时则反之。

2.2 不同年限土壤生态化学计量比的变化特征

不同恢复年限对土壤生态化学计量比的影响均极显著($P<0.01$)(表2), 但其变化各异(图3)。随苜蓿恢复年限的增加, 土壤C:N与C:P整体上呈“W”型的变化趋势, 即先减小后增大再减小再增大的趋势, 且均表现为在恢复4年和10年时显著高于其他年限($P<0.05$), 其中, 土壤C:N在恢复6年时平均值为最低(12.37), 而土壤C:P在恢复2年时平

均值最小(11.94); 土壤N:P的变化范围为0.56~6.78, 在恢复过程中呈“V”型变化规律, 在恢复2年时平均值最小(0.99), 在恢复10年时显著大于其他恢复阶段($P<0.05$)。

不同恢复年限苜蓿地土壤生态化学计量比在垂直剖面上变化趋势不同(图4), 土壤C:N和土壤N:P对土壤深度的响应均极显著($P<0.01$), 而土壤C:P则不显著($P>0.05$)(表2)。除恢复年限为10年的样地, 不同恢复年限苜蓿地土壤C:N在30~40 cm土层明显增加; 土壤C:P在恢复6年和10年时随土层深度增加呈减小趋势, 而在恢复4年时在10~20 cm和30~40 cm土层明显增加; 土壤N:P在恢复6年和10年时也表现为随土层深度增加整体上而变小, 特别是恢复10年时在各土层均大于其他恢复阶段。

2.3 土壤生态化学计量及其比值与土壤养分的关系

如表3所列, 除土壤全磷和碱解氮外, 土壤有机碳与土壤各养分以及化学计量比值都表现出极显著正相关性($P<0.01$), 说明大部分土壤养分与土壤有机碳密切相关; 除土壤全磷、C:P和碱解氮外, 土壤全氮也与土壤各养分及化学计量比值均呈现出极显著相关性($P<0.01$), 其中与C:N呈负相关关系; 土壤全磷则与各生态化学计量比极显著负相关($P<0.01$), 与速效磷显著正相关($P<0.05$); 土壤C:N除与N:P、速效磷和碱解氮无显著相关性外, 与土壤各养分及化学计量比值均呈显著相关关系($P<0.05$); 土壤C:P除与全氮、速效磷和碱解氮无显著相关性外, 与土壤各养分及化学计量比值均呈现出极显著相关性($P<0.01$); 土壤N:P除与C:N和碱解氮无显著相关性外, 与土壤各养分及化学计量比值均呈现出显著相关性($P<0.05$)。

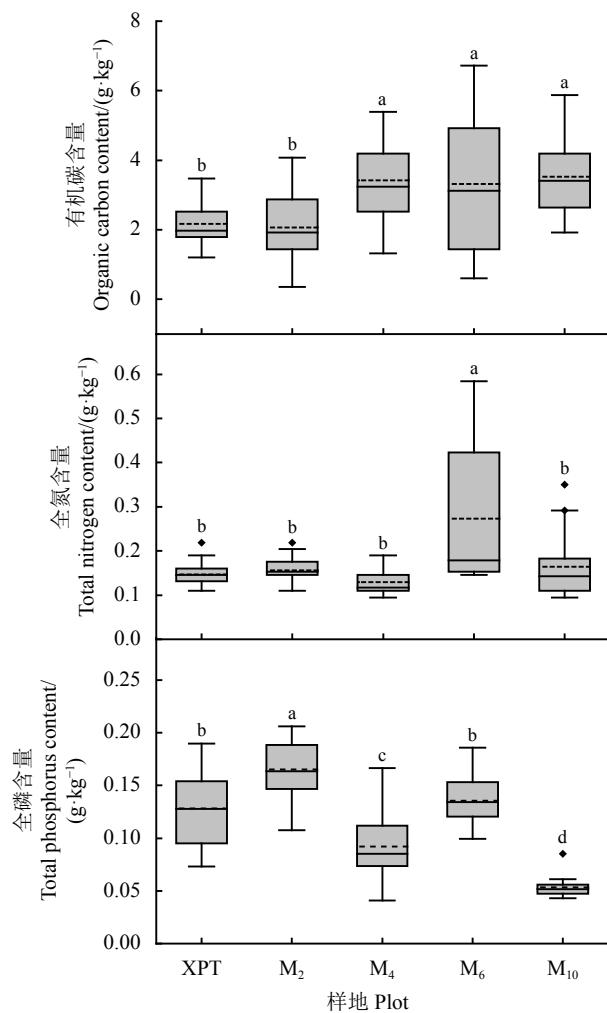


图1 不同苜蓿恢复年限下土壤碳氮磷含量变化特征

Figure 1 The change characteristics of soil C, N, and P contents at different stages of *Medicago sativa* restoration

不同小写字母表示不同苜蓿恢复年限间差异显著 ($P < 0.05$); 虚线表示不同土层间平均值, 实线表示中位数; XPT 为新排土, M₂、M₄、M₆、M₁₀ 分别表示苜蓿恢复 2、4、6、10 年; 下同。

Different lowercase letters indicate significant differences in soil C, N, and P contents between different years after the commencement of *M. sativa* restoration ($P < 0.05$); the dotted line represents the average value among different soil layers, and the solid line represents the median; XPT denotes the new waste dump; M₂, M₄, M₆, and M₁₀ represent 2, 4, 6, and 10 years of *M. sativa* restoration, respectively; this is applicable for the following figures and tables as well.

3 讨论

3.1 排土场苜蓿恢复过程中土壤碳氮磷含量的演变特征

土壤碳氮磷含量在不同生态系统及生态过程中的演变特征各异。本研究发现研究区土壤有机碳含量的变化介于 $0.36\sim6.72\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 明显低于黄土高原

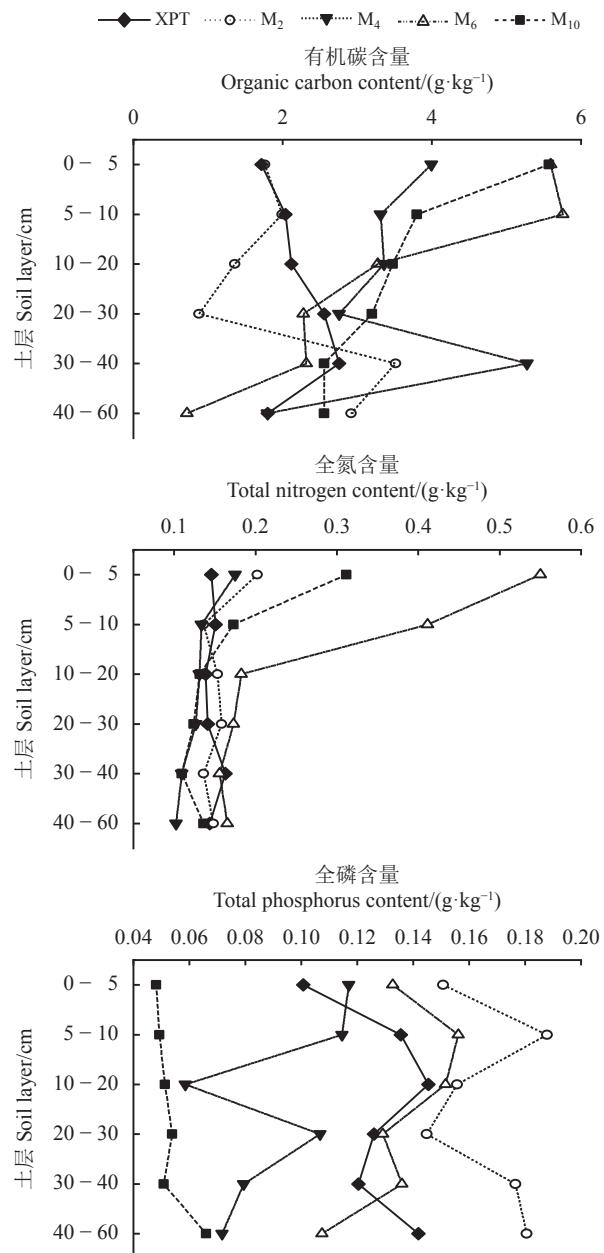


图2 不同苜蓿恢复年限下土壤碳氮磷含量在垂直剖面的变化特征

Figure 2 Variation characteristics of soil C, N, and P contents in the vertical soil profile at different stages of *Medicago sativa* restoration

云雾山封育苜蓿地^[3]、西辽河与贺兰山农牧场人工栽培苜蓿地的土壤有机碳含量^[3, 16-17], 表明排土场作为人工重塑生态系统, 利用种植苜蓿提升土壤有机碳的作用有限。另外, 研究区土壤有机碳含量在恢复 4 年时增加并维持稳定水平, 这是因为研究区苜蓿恢复 4 年时苜蓿生长达到旺盛状态, 丰富的生物量可为土壤提供充足的有机质, 同时植物根系微生物活跃, 加快了有机质的分解, 土壤有机碳含量随之增

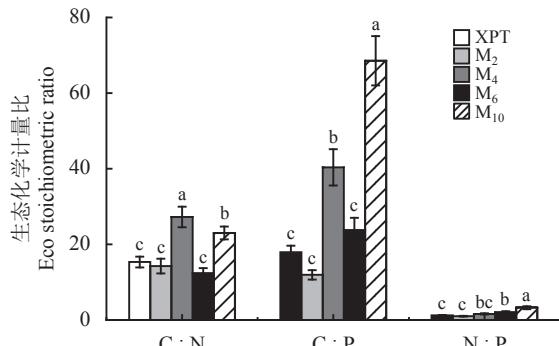


图3 不同苜蓿恢复年限下土壤生态化学计量比变化特征
Figure 3 Variation characteristics of soil ecostochiometry at different stages of *Medicago sativa* restoration

加；然而，研究区立地条件差，随着恢复年限的增加苜蓿群落生长减缓并退化，根系微生物作用减弱，有机质输入与分解均减少，加之分解作用的滞后性，导致土壤有机碳含量变化不大，因此在矿区排土场复垦地苜蓿恢复4年后土壤有机碳含量难以提高，建议通过人工科学经营管理防止退化，或轮作其他植物合理利用该阶段土壤。同时，研究发现各恢复阶段随着土壤垂直剖面深度的逐渐加深，土壤有机碳含量总体呈下降趋势，这与朱秋莲等^[8]研究发现随土壤垂直剖面深度的增加土壤有机碳含量呈减少的趋势的结果一致，这主要在于土壤中有机碳含量主要来源于枯落物，浅层土壤有机碳归还相较于深层多。

苜蓿根际土壤固氮能力对土壤中全氮含量的变化影响较大^[16]。本研究发现，排土场矿区苜蓿地恢复过程中随恢复年限的增加，土壤全氮表现出先增后减的变化，在种植6年时达到最大，此时对土壤的全氮含量地提高最显著($P < 0.05$)，与土壤有机碳含量相比存在滞后性；邹继承等^[17]研究发现，随着种植年限的增加，苜蓿根际土壤的固氮能力先增强后减弱，在3年时达到最大值，本研究与之不同，这可能是由于矿区排土场生境恶劣，苜蓿群落发展缓慢，在6年时生长状况最佳而在10年时减少是因为立地条件限制导致苜蓿群落提早退化，根系根瘤菌固氮能力减弱造成的。同时，矿区排土场土壤全氮含量受土壤垂直剖面深度的影响，随土壤垂直剖面深度的增加，土壤全氮含量呈减少的趋势，这种变化趋势与朱秋莲等^[8]研究的结果相似。

土壤中全磷的含量受土壤母质的影响较大，因而空间变异性较小^[21]，本研究发现研究区排土场苜蓿不同恢复阶段土壤全磷含量随土层深度增加无

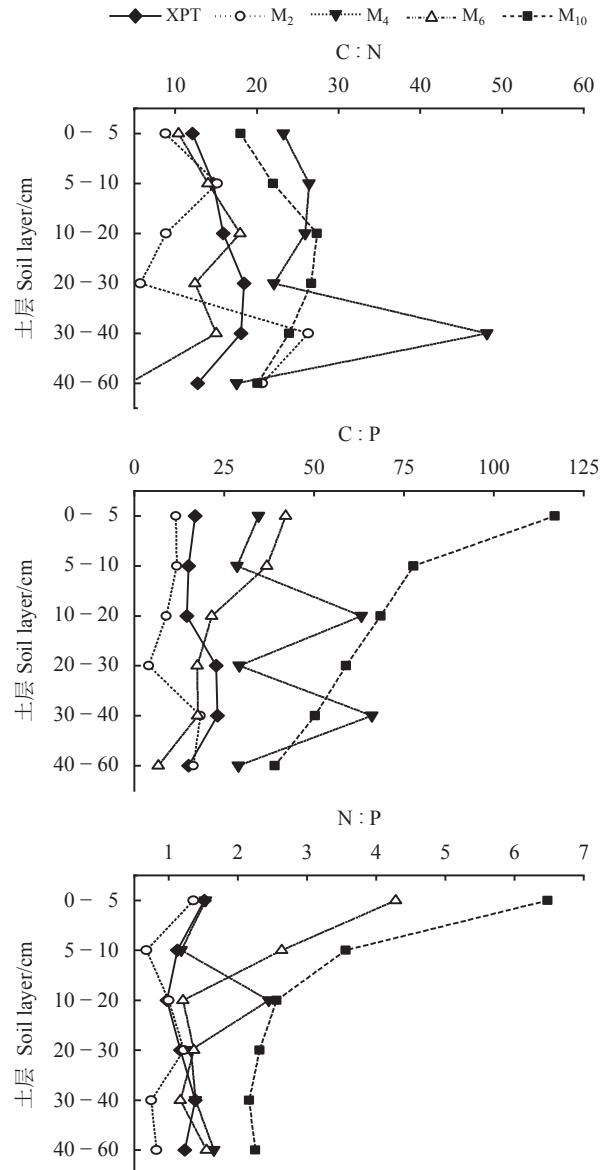


图4 不同苜蓿恢复年限下土壤生态化学计量比在垂直剖面的变化特征

Figure 4 Variation characteristics of soil ecostochiometric ratios in the vertical soil profile at different stages of *Medicago sativa* restoration

明显变化，证实了这一结论。葛选良等^[18]研究发现紫花苜蓿地土壤全磷含量随着种植年限的增长整体表现为先增大后减小的趋势；而本研究表明土壤全磷含量在种植4年时开始下降，与葛选良等^[18]的研究结论相同，但在6年时又升高，在10年时下降到最低值，具体原因还有待进一步研究。

3.2 排土场苜蓿恢复过程中土壤碳氮磷化学计量比的演变特征

C:N是代表土壤有机质组成和检验质量程度

表3 不同苜蓿恢复年限土壤生态化学计量与土壤养分的相关性

Table 3 The relationships between soil ecostochiometry and soil nutrients for different stages of *Medicago* restoration

土壤指标 Soil index	SOC	TN	TP	C : N	C : P	N : P	AP	AN	AK
SOC	1.000								
TN	0.523**	1.000							
TP	-0.154	0.137	1.000						
C : N	0.571**	-0.337**	-0.313**	1.000					
C : P	0.677**	0.187	-0.717**	0.514**	1.000				
N : P	0.540**	0.598**	-0.587**	-0.035	0.797**	1.000			
AP	0.447**	0.760**	0.217*	-0.164	0.017	0.274*	1.000		
AN	0.090	-0.048	0.022	0.131	0.214	0.114	-0.073	1.000	
AK	0.496**	0.840**	0.024	-0.239*	0.285**	0.602**	0.579**	0.020	1.000

AP, 速效磷; AN, 碱解氮; AK, 速效钾; *和**分别表示显著($P < 0.05$)和极显著相关($P < 0.01$)。

AP, available phosphorus; AN, alkali-hydrolyzed nitrogen; AK, available potassium; * and ** indicate significant correlations at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

的一个首要指标,影响着土壤中碳、氮循环^[19]。当土壤C:N低于11.3时,表明土壤有机质处于加速分解状态,土壤有机质处于矿化水平^[22]。本研究发现,不同年限土壤C:N均值均高于11.3,这与杨菁等^[16]对温带半干旱不同种植年份培育苜蓿草地土壤化学计量特征的研究成果相似,表明研究区土壤的有机质矿化程度一般。同为黄土区,但赵如梦等^[3]对黄土高原不同种植年限苜蓿草地土壤化学计量特征的分析结果表明土壤C:N均低于11.3,与本研究结果不同,再次验证矿区排土场的特殊性,这可能是由于两种生态系统下水热条件及土壤条件差异导致的。此外,本研究发现除恢复10年外,不同恢复年限土壤C:N在30~40 cm土层明显增加,这与王绍强和于贵瑞^[23]的研究结果不一致,可能由于该土层为研究区苜蓿根系的主要分布层,有机碳含量积累多,同时对氮的需求大。

C:P可标志土壤磷素的矿化能力,是衡量微生物矿化土壤有机质从环境中释放磷或吸收并保持磷的潜力的重要指标^[24]。较低的C:P是土壤磷高有效性的一个参考^[13,25],研究区土壤C:P均值为33.13,明显小于中国陆地平均值(52.70)^[26],但也不能确定该研究区土壤磷的有效性较好,本研究C:P较低主要与其有机碳含量普遍不高有关。研究发现,土壤C:P随恢复年限增加整体上呈“W”型的变化规律,在苜蓿恢复10年时达到最大值并且显著大于其他恢复阶段($P < 0.05$),这主要因为苜蓿恢复10年,土

壤中磷消耗太多,而补充相对较少,而且土壤有机碳还未下降,导致其土壤C:P很大。土壤C:P随土层深度增加整体上呈减少的变化趋势,表明磷的矿化速率受土层深度的影响,随土层深度增加磷的矿化速率减少。

土壤氮和磷是限制植物生长的重要因素,土壤N:P可作为养分限制类型的有效指标^[27]。生物固氮量随土壤中N:P降低而上升^[28],本研究中土壤N:P均值为1.84,明显小于中国陆地平均值(3.90)^[26],有助于土壤中的微生物发挥固氮作用。本研究表明土壤N:P随恢复年限增加整体上逐渐增大,这是因为苜蓿根系具有固氮能力,在一段生长周期内土壤中氮含量增加,而土壤磷含量补给有限,故土壤N:P整体上逐渐增大。研究发现,苜蓿恢复6年和10年时土壤N:P随土层深度增加整体上呈变小的变化趋势,而其他阶段没有明显的变化趋势,主要由于研究区苜蓿在恢复初期生长旺盛,对土壤氮的积累与消耗关系存在波动性,而在恢复一定年限后生长出现衰退,对土壤氮的消耗与积累均减弱且稳定,而表层由于前期积累多,故表现出随土壤垂直剖面深度的增加而变小。

3.3 排土场苜蓿恢复过程中土壤碳、氮、磷化学计量特征的关系

土壤碳、氮、磷含量之间密切相关,朱秋莲等^[8]与曾全超等^[24]对黄土高原地区的研究表明,碳、

氮、磷之间均呈显著的线性关系($P < 0.05$)。本研究发现,排土场土壤有机碳与全氮呈极显著正相关关系($P < 0.01$),但全磷与土壤有机碳和全氮之间均无显著关系,表明该区土壤全磷不受其他养分影响,主要由于土壤磷依赖于土壤母质风化和矿物风化。同时,研究区土壤有机碳和全氮含量均与土壤速效磷和速效钾存在极显著正相关关系,土壤全磷则只与速效磷显著相关,而碱解氮与土壤碳、氮、磷含量均无显著性,可见研究区大部分速效养分受全量养分影响,特别是受土壤有机碳和全氮的影响,但碱解氮含量不受其他养分的影响,可能由于苜蓿为固氮植物,其特殊氮循环机制导致的,这有待深入研究。

众多研究证明,土壤碳、氮、磷元素的化学计量比与两个元素值之间存在一定的相关性,但是显著性表现出明显不同^[29-31]。本研究发现,排土场土壤除全氮与C:P无相关性外,各化学计量比与土壤碳、氮、磷元素均具有极显著相关性,其中土壤C:N受土壤中有机碳影响更大,表明矿区排土场苜蓿恢复过程中土壤C:N主要受复垦地土壤中有机碳含

量的影响较大,而土壤C:P受土壤全磷影响更大,土壤N:P则受各元素的影响相差不大。然而,对于速效养分,化学计量比与速效钾具有显著关系,除N:P与速效磷显著相关外,各化学计量比与速效磷和碱解氮均无显著关系,表明这些速效养分不受化学计量比的影响。

4 结论

苜蓿恢复模式在一定时期内可有效恢复半干旱矿区排土场的土壤肥力水平,但存在一定的限制性。苜蓿恢复过程中,黄土区矿区排土场土壤有机碳、全氮、全磷含量发生显著变化,整体在恢复初期较低,在恢复中期显著升高,在恢复后期又降低,与苜蓿群落提早衰退有关。排土场苜蓿恢复过程中,不同程度地受氮、磷养分限制,是提前退化的原因之一,建议为防止类似区域苜蓿提前退化,考虑科学地开展施肥等管理,或者在恢复4年至6年时及时利用苜蓿改良土地。矿区排土场土壤养分主要与土壤有机碳密切相关,土壤全磷不受其他养分影响。

参考文献 References:

- [1] 杨吉华,王福义,张光灿,刘霞,于世高,高洪义,赵新明,高现平,冯凯.紫花苜蓿保持水土效益的研究.土壤侵蚀与水土保持学报,1997,3(2): 91-96.
YANG J H, WANG F Y, ZHANG G C, LIU X, YU S G, GAO H Y, ZHAO X M, GAO X P, FENG K. Study on benefits of alfalfa conservating soil and water. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1997, 3(2): 91-96.
- [2] 罗珠珠,牛伊宁,李玲玲,蔡立群,张仁陟,谢军红.陇中黄土高原不同种植年限苜蓿草地土壤水分及产量响应.草业学报,2015,24(1): 31-38.
LUO Z Z, NIU Y N, LI L L, CAI L Q, ZHANG R Z, XIE J H. Soil moisture and alfalfa productivity response from different years of growth on the Loess Plateau of central Gansu. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(1): 31-38.
- [3] 赵如梦,张炳学,王晓霞,韩凤朋.黄土高原不同种植年限苜蓿草地土壤与植物化学计量特征.草业科学,2019,36(5): 1189-1199.
ZHAO R M, ZHANG B X, WANG X X, HAN F P. Ecological stoichiometry characteristics of soil and plant of alfalfa with different growing years on the Loess Plateau. *Pratacultural Science*, 2019, 36(5): 1189-1199.
- [4] 王东丽,刘阳,郭莹莹,谢伟,郭建军,汤国水,赵晓亮,连昭,于百和.半干旱矿区排土场苜蓿恢复过程中土壤颗粒分形的演变特征.生态学报,2020,40(13): 4585-4593.
WANG D L, LIU Y, GUO Y Y, XIE W, GUO J J, TANG G S, ZHAO X L, LIAN Z, YU B H. The fractal characteristics of soil particles during the restoration of *Medicago sativa* in a semi-arid mining dump. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(13): 4585-4593.
- [5] ELSER J J, DOBBERTUHL D R, MACKAY N A, SCHAMPEL J H. Organism size, life history, and N:P stoichiometry. *BioScience*, 1996, 46(9): 674-684.
- [6] 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.
- [7] GÜSEWELL S, FREEMAN C. Enzyme activity during N- and P-limited decomposition of wetland plant litter. *Bulletin of the Geobotanical Institute*, 2003, 69: 95-106.

- [8] 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.
ZHU Q L, XING X Y, ZHANG H, AN S S. Soil ecological stoichiometry under different vegetation area on loess hilly gully region. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(15): 4674-4682.
- [9] 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): 5594-5602.
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 agricultural-pasture ecotone of Northern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(15): 5594-5602.
- [10] 张萍, 章广琦, 赵一娉, 彭守璋, 陈云明, 曹扬. 黄土丘陵区不同森林类型叶片-凋落物-土壤生态化学计量特征. *生态学报*, 2018, 38(14): 5087-5098.
ZHANG P, ZHANG G Q, ZHAO Y P, PENG S Z, CHEN Y M, CAO Y. Ecological stoichiometry characteristics of leaf-litter-soil interactions in different forest types in the loess hilly-gully region of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(14): 5087-5098.
- [11] 陈军强, 张蕊, 侯尧宸, 马丽娜, 丁路明, 龙瑞军, 尚占环. 亚高山草甸植物群落物种多样性与群落C、N、P生态化学计量的关系. *植物生态学报*, 2013, 37(11): 979-987.
CHEN J Q, ZHANG R, HOU Y C, MA L, DING L M, LONG R J, SHANG Z H. Relationships between species diversity and C, N and P ecological stoichiometry in plant communities of sub-alpine meadows. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37(11): 979-987.
- [12] 张向茹, 马露莎, 陈亚南, 杨佳佳, 安韶山. 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. *土壤学报*, 2013, 50(4): 818-825.
ZHANG X R, MA L S, CHEN Y N, YANG J J, AN S S. Ecological stoichiometry characteristics of *Robinia pseudoacacia* forest soil in different latitudes of Loess Plateau. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(4): 818-825.
- [13] 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.
ZENG Q C, LI X, DONG Y H, AN S S. Ecological stoichiometry of soils in the Yanhe Watershed in the Loess Plateau: The influence of different vegetation zones. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(11): 1881-1891.
- [14] 曾冬萍, 蒋利玲, 曾从盛, 王维奇, 王纯. 生态化学计量学特征及其应用研究进展. *生态学报*, 2013, 33(18): 5484-5492.
ZENG D P, JIANG L L, ZENG C S, WANG W Q, WANG C. Reviews on the ecological stoichiometry characteristics and its applications. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(18): 5484-5492.
- [15] 陈海滨, 陈志彪, 陈志强, 马秀丽. 不同治理年限的离子型稀土矿区土壤生态化学计量特征. *生态学报*, 2017, 37(1): 258-266.
CHEN H B, CHEN Z B, CHEN Z Q, MA X L. Ecological stoichiometry characteristics of ionic rare earth mining area soil in different management years. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(1): 258-266.
- [16] 杨菁, 谢应忠, 吴旭东, 徐坤. 不同种植年限人工苜蓿草地植物和土壤化学计量特征. *草业学报*, 2014, 23(2): 340-345.
YANG J, XIE Y Z, WU X D, XU K. Stoichiometry characteristics of plant and soil in alfalfa grassland with different growing years. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(2): 340-345.
- [17] 郜继承, 杨恒山, 张庆国, 宋春丽. 种植年限对紫花苜蓿人工草地土壤碳、氮含量及根际土壤固氮力的影响. *土壤通报*, 2010, 41(3): 603-607.
TAI J C, YANG H S, ZHANG Q G, SONG C L. Influence of planting years on nitrogen-fixing capacity of rhizosphere and contents of carbon and nitrogen in artificial pastures of alfalfa. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(3): 603-607.
- [18] 葛选良, 杨恒山, 郜继承, 王俊慧, 刘晶. 不同生长年限紫花苜蓿需磷规律及其土壤供磷能力的研究. *土壤通报*, 2009, 40(5): 1131-1134.
GE X L, YANG H S, TAI J C, WANG J H, LIU J. Patterns of phosphorus requirement and phosphorus supply capacity of alfalfa planed soils in different growing years. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(5): 1131-1134.
- [19] 杜威, 王紫泉, 和文祥, 高亚军, 曹卫东. 豆科绿肥对渭北旱塬土壤养分及生态化学计量学特征影响. *土壤学报*, 2017, 54(4): 999-1008.
DU W, WANG Z Q, HE W X, GAO Y J, CAO W D. Effect of leguminous green manure on soil nutrients and their ecological stoichiometry characteristics in Weibei rainfed highland. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(4): 999-1008.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000.

- BAO S D. Soil Agrochemical Analysis. The Third Edition. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [21] 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的化学计量特征. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 64-71.
- LIU X Z, ZHOU G Y, ZHANG D Q, LIU S Z, CHU G W, YA J H. N and P stoichiometry of plant and soil in lower subtropical forest successional series in southern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(1): 64-71.
- [22] 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2000: 36-37, 196-198.
- HUANG C Y. Soil Science. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 36-37, 196-198.
- [23] 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.
- WANG S Q, YU G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [24] 曾全超, 李鑫, 董扬红, 安韶山. 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. *自然资源学报*, 2015, 30(5): 870-879.
- ZENG Q C, LI X, DONG Y H, AN S S. Ecological stoichiometry characteristics and physical-chemical properties of soils at different latitudes on the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(5): 870-879.
- [25] 王维奇, 曾从盛, 钟春棋, 全川. 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.
- WANG W Q, ZENG C S, ZHONG C Q, TONG C. Effect of human disturbance on ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in the Minjiang River estuarine wetland. *Environmental Sciences*, 2010, 31(10): 2411-2416.
- [26] TIAN H Q, CHEN G S, ZHANG C, MELILLO J M, HALL C A S. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: A synthesis of observational data. *Biogeochemistry*, 2010, 98: 139-151.
- [27] 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.
- FAN S X. Ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen and phosphorus within kiwi fruit orchards of Meixian county in Shaanxi. *Agricultural Research in Arid Areas*, 2017, 35(4): 33-38.
- [28] 邬畏, 何兴东, 周启星. 生态系统氮磷比化学计量特征研究进展. *中国沙漠*, 2010, 30(2): 296-30.
- WU W, HE X D, ZHOU Q X. Review on N: P stoichiometry in eco-system. *Journal of Desert Research*, 2010, 30(2): 296-30.
- [29] 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.
- BAI X F, XU F L, WANG W L, ZHAO Y F, WANG L L, SUN P Y. Ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen and phosphorus in a *Larix principis-rupprechtii* plantation. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015, 13(6): 68-75.
- [30] 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.
- TAO Y, WU G L, LIU Y B, ZHANG Y M. Soil stoichiometry and their influencing factors in typical shrub communities in the Gurbantunggut Desert. *Journal of Desert Research*, 2017, 37(2): 305-314.
- [31] 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.
- TAO Y, LIU Y B, WU G L, ZHANG Y M. Regional-scale ecological stoichiometric characteristics and spatial distribution patterns of key elements in surface soils in the Junggar desert, China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(7): 13-23.

(责任编辑 王芳)



如有印装质量问题, 请将原杂志寄回本刊编辑部, 由本部负责调换。