

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0475

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.



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

赵如梦¹, 张炳学², 王晓霞¹, 韩凤朋^{1,2}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院 / 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;
2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为探讨植被种植过程中土壤-植被生态系统养分动态变化规律, 本研究以黄土高原多年生紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 为研究对象, 分析了不同生长年限 (种植 1、10、20 和 30 年) 苜蓿草地土壤与植物养分含量变化及生态化学计量学特征。结果显示, 1) 土壤有机 C 和全 N 含量随种植年限的增加呈先增大后减小的趋势; 在 0-200 cm 土层中, 土壤 C 和 N 的垂直分布具有一致性, 含量随着土层的加深而逐渐减少, 并在 30 cm 以下基本保持稳定; 土壤 P 的含量随着土层的加深基本保持稳定; 土壤 C : N, C : P 和 N : P 均随苜蓿种植年限的增长呈先增加后减少的趋势, 种植 10 年达到最大值。2) 苜蓿叶片 C、N、P 含量的变化规律与土壤养分变化规律相似, 种植 10 年达到最大值; 叶片 C : N、C : P、N : P 随种植年限的增加均先下降后回升。3) 土壤化学计量特征与植物化学计量特征无显著相关关系 ($P > 0.05$)。研究结果表明, 当苜蓿种植到 10 年之后, 应采取一定的管理措施来改善土壤质量以保证苜蓿正常生长。

关键词: 有机碳; 土壤养分; 紫花苜蓿; 草地; 碳氮比; 碳磷比; 氮磷比

中图分类号: S151.9⁺3 文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2019)05-1189-11

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

ZHAO Rumeng¹, ZHANG Bingxue², WANG Xiaoxia¹, HAN Fengpeng^{1,2}

(1. Colleges of Resources and Environmental Science, Northwest A & F University /

State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling 712100, Shaanxi, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: To investigate the changes in nutrients in soil-vegetation ecosystems, *Medicago sativa* at different ages (1, 10, 20, 30 years) was selected to analyze variations in the nutrient content and characteristics of eco-chemical stoichiometry. The results showed that: 1) the content of soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) first increased and then decreased as age increased, the vertical distribution of SOC and TN at a soil depth of 0-200 cm was consistent at all alfalfa grasslands, and the content of SOC and TN at a soil depth of 0-30 cm was higher than that at 30-200 cm. However, the content of soil total phosphorus (TP) was stable throughout the soil layer. The ratios of soil C : N, C : P, and N : P showed similar dynamic

收稿日期: 2018-08-15 接受日期: 2018-12-24

基金项目: 国家自然科学基金 (41471437); 国家重点研发计划 (2016YFA0600801、2017YFC0504504); 科技基础性工作专项 (2014FY210100); 中国科学院科技服务网络计划 (KFJ-STZ-ZDTP-012); 中国科学院“西部青年学者”(XAB2016A04)

第一作者: 赵如梦 (1993-), 女, 辽宁建平人, 在读硕士生, 主要从事土壤环境化学研究。E-mail: zhaorm0210@163.com

通信作者: 韩凤朋 (1980-), 男, 山东日照人, 副研究员, 博士, 主要从事土壤环境化学研究。E-mail: hanfp@ms.iswc.ac.cn

<http://cykx.lzu.edu.cn>

patterns to soil carbon and nitrogen. 2) The content of C, N, and P in the leaf was similar to that in soil, with maximum values observed at 10 years. The ratios of leaf C : N, C : P, and N : P first decreased and then increased. 3) There was no significant correlation between the stoichiometry characteristics of the soil and plant ($P > 0.05$). These results indicate that after 10 years, some management measures should be taken to improve the quality of soil and growth of alfalfa.

Keywords: organic carbon; soil nutrient; *Medicago sativa*; grassland; C : N; C : P; N : P

Corresponding author: HAN Fengpeng E-mail: hanfp@ms.iswc.ac.cn

黄土高原地区水土流失及土地沙化问题日益突出, 生态环境极其脆弱。紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 作为植被的主要物种之一, 由于其耐干旱、耐冷热、产量高及能够改良土壤已被认为是植被恢复的优良先锋植物^[1-2]。自退耕还林(草)工程实施以来, 紫花苜蓿在不同时期均有大面积种植。近年来, 由于生态化学计量学不仅可以表征土壤对植物生长的养分供应状况, 也可作为评价植物健康与否的重要指标^[3-4], 因此受到了越来越多专家学者的关注。人们利用生态化学计量学对植物的研究主要集中在树木上, 而对紫花苜蓿这种优质多年生豆科牧草的研究相对较少^[5], 已有的研究主要集中在不同施肥措施及10年以内时间序列生态化学计量特征研究。例如, 李新乐^[6]连续6年研究灌水和施磷肥下土壤C、N、P和紫花苜蓿C、N、P生态化学计量变化特征, 发现随着磷肥用量的增加, 土壤和苜蓿植株的N:P、C:P均下降, 土壤C:N则升高, 但施磷肥对苜蓿C:N没有影响; Wang等^[7]在黄土高原地区研究发现, 苜蓿绿叶和枯叶中的N、P含量随苜蓿年龄增加呈先增加后降低的趋势, N:P随苜蓿年龄增加呈先降低后增加的趋势; 杨菁等^[8]测定并分析了不同种植年限(种植1、3、4、5及8年)苜蓿叶片, 茎秆及0-20 cm土壤中C、N、P含量及其化学计量比, 其研究表明, 苜蓿叶片N:P及C:P与叶片P含量显著负相关($P < 0.05$), 与叶片N含量无显著相关性($P > 0.05$), 土壤P与茎的C、N、P及化学计量比均有一定相关性。

为了更好地研究不同种植年限下土壤-植物生态化学计量特征, 本研究在前人研究的基础上, 以黄土高原地区多年生栽培苜蓿草地(1、10、20、30年)为研究对象, 分析土壤-植物C、N、P含量, 明确不同年限苜蓿草地土壤-植物叶片生态化学计量特征, 为黄土高原紫花苜蓿种植及可持续

利用管理机制提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于神木县神木侵蚀与环境试验站, 属于沙漠丘陵地区, 地理位置为38°47' N、110°21' E, 平均海拔为1 209.95 m, 样地坡度为20°~23°。该区属于温带大陆性气候, 寒暑剧烈, 气候干燥, 四季长短不等, 年降水量为436.7 mm, 年均无霜期为168 d, 年平均温度为8.5 °C。土壤类型以黄绵土和风沙土为主, 间有淡栗钙土和黑垆土并存。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择

研究样地的选择主要通过查阅苜蓿相关文献资料以及走访相关部门和当地农户, 确定不同生长年限的栽培苜蓿草地, 综合考虑海拔、坡度以及基本土壤状况相对接近的立地条件, 从中遴选出合适的样地, 以保证样地间具有良好的可比性。选择4个不同生长年限(1、10、20、30年)的紫花苜蓿‘中苜一号’于2015年7月进行试验, 样地大小为2 m × 6 m, 间隔10 m, 每个年限重复3次, 所选地块均未施肥, 其中生长1和10年苜蓿草地为相邻地块。试验样地基本概况如表1所列。

表1 试验样地基本概况
Table 1 Basic properties of test plots

生长年限 Planting year/a	经度 Longitude	纬度 Latitude	坡度 Slope	海拔 Altitude/m
1	110°21'45.6" E	38°47'39.0" N	20°	1 192.5
10	110°21'45.6" E	38°47'39.0" N	20°	1 192.5
20	110°21'54.8" E	38°47'27.6" N	21°	1 235.1
30	110°21'47.1" E	38°47'36.1" N	23°	1 219.7

1.2.2 土壤与植物样品的采集和测定

在每个样地中随机选取 3 个 1 m × 1 m 样方，采用五点混合法，随机选取 5 个采样点，利用直径 7 cm 的土钻采集 0–200 cm 土样。其中 0–100 cm 以 10 cm 为一层，100–200 cm 以 20 cm 为一层，进行分层采样。土壤样品自然风干，剔除植物根系等杂物，采用四分法取适量土壤样品，分别过 0.25、1 mm 筛，用于养分含量的测定。同时，植物取样点与土壤取样点一一对应，每个样地分别设置东、西、南、北、中 5 个位置共选取 8~10 株生长良好的苜蓿，采集每株植物健康部位的成熟叶片，然后将所采下的叶片混匀后装入牛皮纸袋，带回实验室在 65 °C 下烘干、粉碎后进行叶片 C、N、P 含量的测定。

土壤和植物有机 C 含量采用 H₂SO₄-KCr₂O₇ 氧化-外加加热法测定；土壤和植物全 N 含量采用半微量凯氏定氮法测定；土壤全 P 含量采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法测定；植物全 P 含量采用 H₂SO₄-H₂O₂ 溶液消解，钒钼黄比色法测定^[9]。

1.3 数据处理

本研究中土壤与植物 C、N、P 比均采用元素质量比，所有试验数据利用 Origin 8.0 进行作图，用 SPSS 22.0(SPSS Inc., Chicago, IL, USA) 中单因素方差分析 (one-way ANOVA) 以及最小显著性检验法 (LSD)，检验了不同年限间土壤和植物 C、N、P 含量及其化学计量比之间的差异，并对各个指标

之间采用 Pearson 相关系数法进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同种植年限苜蓿草地土壤 C、N、P 化学计量特征

研究区不同种植年限苜蓿草地土壤有机 C 含量变化范围为 0.73~4.95 g·kg⁻¹，种植 10 年时最高，30 年时最低，种植 10 与 30 年之间存在显著性差异 ($P < 0.05$)，但种植 1 与 20 年间差异不显著 ($P > 0.05$)。全 N 含量变化由高到低依次为 10 年 > 1 年 ≈ 20 年 > 30 年，种植 1 与 20 年之间无显著性差异 ($P > 0.05$)，10 与 30 年之间存在显著性差异 ($P < 0.05$)。全 P 含量变化范围为 0.42~0.59 g·kg⁻¹，种植 10 年时最高，种植 20 年时最低，种植 10 年与种植 20、30 年间均存在显著差异 ($P < 0.05$) (表 2)。

从整体来看，土壤 C : N 在不同种植年限之间的差异较大，其中种植 10 年最大，种植 20 年最小，种植 10 年和种植 20 年之间差异显著 ($P < 0.05$)。土壤 C : P 与 N : P 在不同种植年限之间的差异较小。LSD 分析表明，种植 1、10、20 及 30 年间差异不显著 ($P > 0.05$)，C : P 在种植 10 年时达到最大值，N : P 在种植 10 与 20 年接近一致。

2.2 不同种植年限苜蓿草地 0–200 cm 土壤 C、N、P 剖面分布

不同种植年限苜蓿草地土壤剖面有机 C 含量、

表 2 不同种植年限苜蓿草地土壤 C、N、P 化学计量特征
Table 2 Stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in different years

种植年限 Planting year/a	有机碳 Organic carbon/(g·kg ⁻¹)	全氮 TN/(g·kg ⁻¹)	全磷 TP/(g·kg ⁻¹)	碳氮比 C : N	碳磷比 C : P	氮磷比 N : P
1	1.52 ± 0.22ab	0.19 ± 0.02ab	0.50 ± 0.00b	7.89 ± 0.45ab	3.08 ± 0.45a	0.38 ± 0.04a
10	1.86 ± 0.30a	0.21 ± 0.03a	0.52 ± 0.01a	8.53 ± 0.28a	3.66 ± 0.59a	0.42 ± 0.06a
20	1.41 ± 0.19ab	0.19 ± 0.02ab	0.44 ± 0.00c	7.30 ± 0.27b	3.16 ± 0.40a	0.42 ± 0.04a
30	1.13 ± 0.12b	0.15 ± 0.01b	0.48 ± 0.01bc	7.70 ± 0.33ab	2.39 ± 0.27a	0.31 ± 0.03a
平均值 Mean	1.48 ± 0.11	0.18 ± 0.01	0.48 ± 0.01	7.86 ± 0.18	3.07 ± 0.22	0.38 ± 0.02
最大值 Max.	4.95	0.48	0.59	11.06	9.52	0.94
最小值 Min.	0.73	0.11	0.42	5.21	1.31	0.19
F	4.72	4.54	12.67	2.28	2.51	2.48
变异系数 CV/%	58.03	43.33	8.56	17.32	56.64	43.31

同列不同字母表示不同种植年限间差异显著 ($P < 0.05$)，表 3 同。

Different lowercase letters within the same column indicate significant difference at the 0.05 level; TN, total nitrogen; TP, total phosphorus; similarly for Table 3.

全 N 含量主要集中在 0–30 cm，较其他各土层明显偏高，且随着种植年限的增加呈波动式降低趋势(图 1)，在 0–30 cm 表层，土壤含 C 量依次表现为种植 10 年 > 1 年 ≈ 20 年 > 30 年。不同种植年限土壤全 N 含量变化与土壤有机 C 含量变化趋势相同。而随着土层深度的增加，不同年限间土壤全 P 含量波动范围较小。

不同种植年限土壤 C : N 随土层深度的增加在一定范围内波动(图 1)，波动范围为 5.21~11.06。方差分析表明，同一种植年限 0–10、10–20、20–30 cm 与其他各土层均存在显著差异 ($P < 0.05$)，30–200 cm 土层间无明显差异 ($P > 0.05$)。C : P、N : P 与土壤有机 C、全 N 变化趋势相似，随土层深度的增加逐渐减少，在 0–30 cm 土层，土壤 C : P 表现为种植 10 年 > 1 年 ≈ 20 年 > 30 年；土壤 N : P 表

现为种植 10 年 > 20 年 ≈ 30 年 > 1 年。

2.3 不同种植年限苜蓿叶片 C、N、P 化学计量学特征

不同种植年限之间苜蓿叶片 C 含量具有显著差异 ($P < 0.05$)(表 3)，种植 1 年的苜蓿 C 含量最低，种植 10 年最高。叶片 N 含量由高到低依次为 10 年 > 30 年 > 20 年 > 1 年，20 与 30 年之间无显著差异 ($P > 0.05$)，但与 1、10 年之间差异显著 ($P < 0.05$)。叶片 P 含量范围为 1.54~2.08 g·kg⁻¹，种植 10 年时最高，种植 1 年时最低，10 与 1 年和 20 年间存在显著差异 ($P < 0.05$)，10 与 30 年间无明显差异 ($P > 0.05$)。

不同种植年限苜蓿叶片化学计量特征不同，C : N 随种植年限的增加表现为先降低后增加的趋势；叶片 C : P 表现为 1 年 > 20 年 > 10 年 > 30 年；

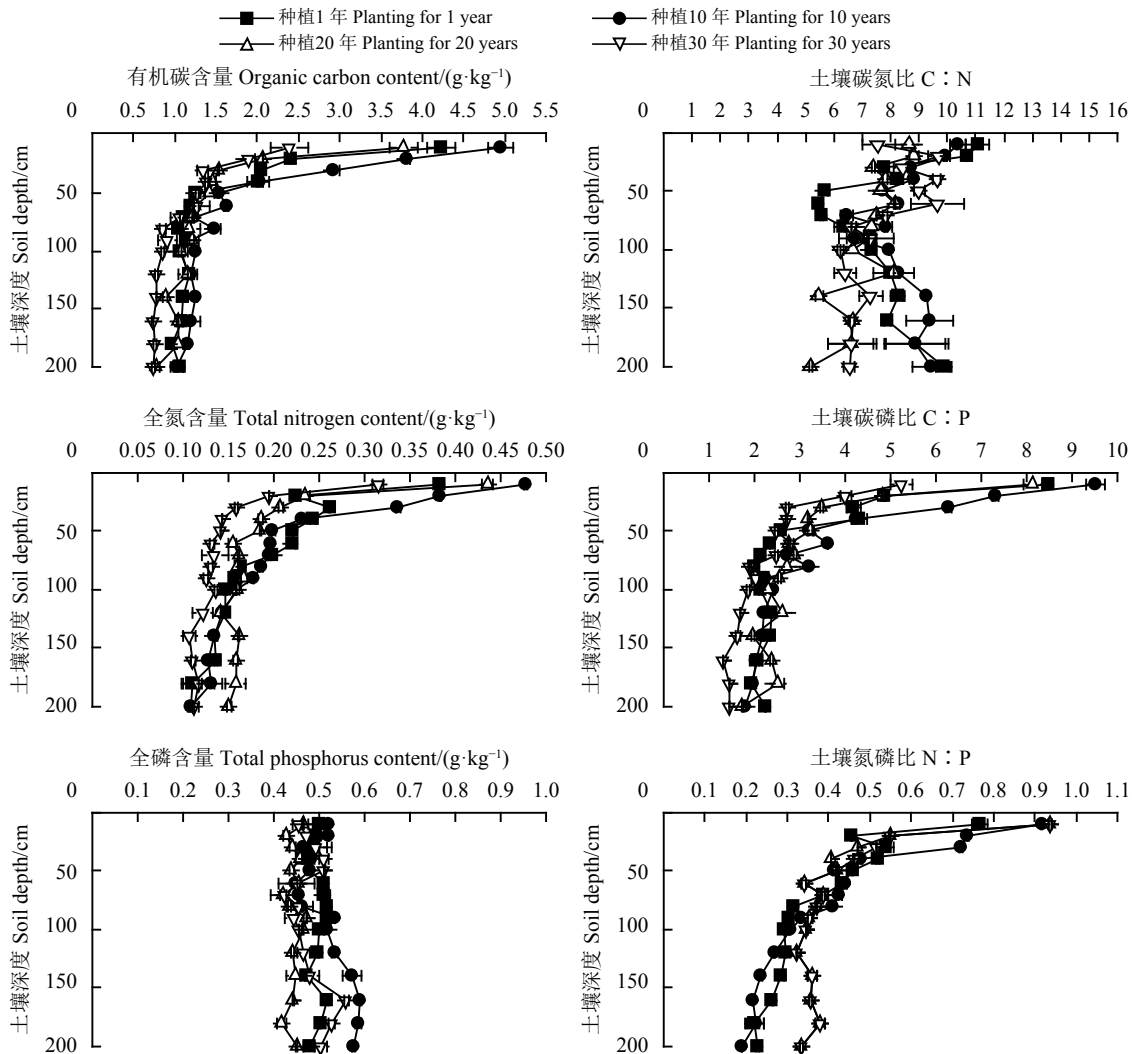


图 1 不同种植年限苜蓿草地 0–200 cm 土壤 C、N、P 及 C : N、C : P、N : P 剖面分布
 Figure 1 Distribution of soil C, N, and P and C : N, C : P, and N : P in alfalfa grasslands in different years

表 3 不同种植年限苜蓿叶片 C、N、P 化学计量特征
Table 3 Stoichiometric characteristics of leaf carbon, nitrogen, and phosphorus in different years

种植年限 Planting year/a	有机碳 Organic carbon/(g·kg ⁻¹)	全氮 TN/(g·kg ⁻¹)	全磷 TP/(g·kg ⁻¹)	碳氮比 C:N	碳磷比 C:P	氮磷比 N:P
1	385.83 ± 0.62d	30.75 ± 0.64c	1.58 ± 0.04b	12.55 ± 0.24a	244.41 ± 5.73a	19.47 ± 0.08b
10	411.02 ± 0.04a	38.73 ± 0.07a	2.03 ± 0.01a	10.61 ± 0.02b	202.37 ± 1.23b	19.07 ± 0.08b
20	394.91 ± 0.21c	35.05 ± 0.43b	1.70 ± 0.06b	11.27 ± 0.13b	233.02 ± 7.77a	20.68 ± 0.45a
30	406.25 ± 0.13b	36.01 ± 0.65b	2.02 ± 0.06a	11.28 ± 0.20b	201.63 ± 6.41b	17.86 ± 0.25c
平均值 Mean	399.50 ± 3.72	35.14 ± 1.10	1.83 ± 0.08	11.43 ± 0.27	220.36 ± 7.44	19.27 ± 0.39
最大值 Max.	411.05	38.80	2.08	12.79	250.14	21.13
最小值 Min.	385.21	30.11	1.54	10.59	195.09	17.61
<i>F</i>	1 146.41	43.01	22.54	22.75	13.88	19.32
变异系数 CV/%	2.63	8.87	11.86	6.77	9.55	5.76

而叶片 N:P 的变化范围为 17.61~21.13, 表现为 20 年 > 1 年 > 10 年 > 30 年。

2.4 土壤与植物叶片 C、N、P 含量相关性分析

土壤 C 与土壤 N、土壤 C:N、土壤 C:P、土壤 N:P 极显著正相关 ($P < 0.01$) (表 4); 土壤 N 与土壤 C:P、土壤 N:P 极显著正相关 ($P < 0.01$); 土壤 C:N 与土壤 C:P 极显著正相关 ($P < 0.01$); 土壤 C:P 与土壤 N:P 极显著正相关 ($P < 0.01$); 叶片 C 与叶片 N、P 极显著正相关 ($P < 0.01$); 与叶片 C:N、C:P 极显著负相关 ($P < 0.01$); 叶片 N 与叶片 P 极显著正相关 ($P < 0.01$), 与叶片 C:N 极显著负相关 ($P < 0.01$); 叶片 P 与叶片 C:N、C:P 极显著负相关 ($P < 0.01$); 叶片 C:N 与叶片 C:P 显著正相关 ($P < 0.05$); 土壤 C、N、P 含量与植物叶片 C、N、P 含量无明显相关性 ($P > 0.05$)。

3 讨论

3.1 不同种植年限对土壤 C、N、P 化学计量特征的影响

研究表明, 随生长年限的增加, 土壤中 C 含量呈先增加后减少变化趋势, 种植 10 年时最高, 表明种植苜蓿对土壤 C 的累积作用有时间阈值, 超过一定的时间, 将不再累积。土壤全 N 含量与土壤有机 C 含量变化趋势相同, 由高到低依次为 10 年 > 1 年 ≈ 20 年 > 30 年。研究表明, 紫花苜蓿对土壤有机质及全 N 含量的影响受种植年限长短

的作用较大, 紫花苜蓿种植年限越长, 对土壤有机质及全 N 含量的提高越明显, 但这种正效应只有达到一定的种植年限后才明显^[10-12]。这是由于苜蓿生长初期固氮能力低, 其生长发育需要消耗大量的土壤养分, 随着苜蓿生长年限的延长和生长发育的进行, 苜蓿根部形成大量的根瘤菌, 固氮功能增强, 能将空气中的氮素固定到土壤中, 同时根系产生一些有机分泌物和部分腐烂根系, 可增加土壤中的有机养分^[13], 但苜蓿生长年限不宜过长, 因为生长年限过长, 紫花苜蓿生长缓慢, 覆盖度降低, 进入土壤的凋落物减少, 将不利于土壤养分的积累^[14-15]。另外土壤有机 C 和全 N 含量随土层深度的增加而降低, 在 0-30 cm 表层土壤中有机 C 和全 N 含量均高于下层土壤, 具有明显的“表聚现象”, 这与前人的研究结果一致^[16-20]。随着紫花苜蓿的不断生长, 表层土壤有机 C 和全 N 不仅受地表土壤通气性、结构性、枯枝落叶、动物残体及粪便等的影响^[21-22], 还受生长年限的影响, 由于生长年限过长, 紫花苜蓿对土壤的归还量仅能维持较浅土层, 到 30-40 cm 乃至更深土层时已无多余有机物质积累, 加上紫花苜蓿生长需要, 还需消耗一部分有机物质, 使得有机物质分解较快, 因此土壤养分在表层大量积累^[15]。

由于 P 是一种沉积性矿物, 在土壤中的迁移率较低, 因此全 P 在整个空间中分布较为均匀^[15,23], 本研究结果符合这一规律, 土壤全 P 随土层深度的

表4 土壤与植物叶片C、N、P含量的相关性分析
Table 4 Correlation analysis of soil and plant leaves for C, N, P contents

项目 Item	土壤 Soil						植物 Plant						
	有机碳 OC	全氮 TN	全磷 TP	碳氮比 C:N	碳磷比 C:P	氮磷比 N:P	有机碳 OC	全氮 TN	全磷 TP	碳氮比 C:N	碳磷比 C:P	氮磷比 N:P	
土壤 Soil	有机碳 OC	1.00	0.95**	0.02	0.59**	0.99**	0.13	0.17	0.10	-0.09	0.14	0.33	
	全氮 TN		1.00	-0.08	-0.34**	0.96**	0.24	0.31	0.24	-0.20	0.09	0.39	
	全磷 TP			1.00	0.26*	-0.11	-0.24	0.22	0.12	0.22	-0.05	-0.13	-0.17
	碳氮比 C:N				1.00	0.56**	0.29*	-0.32	-0.40	-0.40	0.34	0.26	0.01
	碳磷比 C:P					1.00	0.95**	0.08	0.14	0.05	-0.06	0.22	0.43
	氮磷比 N:P						1.00	0.18	0.29	0.20	-0.18	0.16	0.48
植物 Plant	有机碳 OC						1.00	0.94**	0.95**	-0.89**	-0.94**	-0.52	
	全氮 TN							1.00	0.86**	-0.96**	-0.83*	-0.25	
	全磷 TP								1.00	-0.75*	-0.89**	-0.59	
	碳氮比 C:N									1.00	0.81*	0.16	
	碳磷比 C:P										1.00	0.71*	
	氮磷比 N:P											1.00	

*表示显著相关($P < 0.05$), **表示极显著相关($P < 0.01$)。

* and ** indicate significant correlations at 0.05 and 0.01 levels, respectively. OC, organic carbon; TP, total phosphorus; TN, total nitrogen.

增加无明显变化, 空间变异性低于有机C和全N, 但不同年限间土壤全P存在差异。分析原因有如下两方面: 1) 由于N和P存在相互协同作用, 苜蓿生长至10年之后N的不断下降导致了P含量缺乏。2) 苜蓿根瘤菌不断将土壤有机P和无机P转化为有效P供给苜蓿生长, 造成了P亏缺^[24]。另外苜蓿作为一种大量需P的作物^[25], 随着种植年限的增加, 土壤全P含量呈先升后降的趋势^[26-27], 也有研究表明连续种植苜蓿年份越长, 土壤全P含量越低^[28], 而陈志怡和李金月^[29]对不同生长年限对紫花苜蓿产量及土壤养分的影响的研究表明, 各生长年限紫花苜蓿草地土壤全P和有效P含量差异并不显著($P > 0.05$), 这种差异可能与试验处理、土壤类型、采样时间和采样部位有关^[30]。

土壤C:N反映了C、N之间的平衡关系, 是土壤有机质组成和质量程度的一个重要指标^[31]。C:N在5.6~11.3时, 促进有机N的矿化, 能显著增加微生物体C, 当这一数值显著低于11.3时, 土壤有机质处于加速分解状态, 土壤有机N处于矿化水平^[32-33]。本研究发现, 不同年限C:N均低于11.3, 表明本研究区土壤有机质的矿化分解加速,

这与姜红梅^[34]对半干旱黄土高原苜蓿草地土壤C:N的研究结果相似。但杨菁等^[8]丰富对不同种植年限栽培苜蓿草地土壤化学计量特征的研究结果表明, 土壤C:N均高于11.3, 这是由于不同区域的气候及土壤条件差异造成的。而同一年限土壤C:N随土层深度的增加没有明显的变化, 主要是因为土壤C和N的垂直分布具有一致性。Tian等^[35]在对全国土壤C:N:P的研究中指出, 虽然C、N含量具有明显的空间变异性, 但C:N相对稳定, 本研究结果验证了这一规律, 反映了C、N作为结构性成分, 二者的积累和损耗过程紧密相关, 且比值稳定^[36]。

土壤C:P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潜力的一个重要指标^[37-38]。低C:P有利于促进土壤中有效P的增加; 而C:P较高则会导致微生物在分解有机质的过程中受到P限制, 使得与植物存在对土壤无机P的竞争, 不利于植物的生长^[39]。当C:P < 200时将会出现土壤微生物碳的短暂增加和有机磷的净矿化, 当C:P > 200时微生物碳大幅增加, 微生物竞争土壤中的速效磷, 出现有机磷的净固持现象^[40]。本研究区土

壤 C:P 整体上均小于 200, 这表明该区土壤 P 的净矿化率较高, 微生物分解有机质过程中受 P 限制的可能性较小, 土壤 P 表现出较高的有效性。而不同年限苜蓿草地土壤 C:P 表现为 10 年 (3.66) > 20 年 (3.16) > 1 年 (3.08) > 30 年 (2.39)。这表明, 随着苜蓿生长后期土壤微生物将加大土壤有效 P 的供应。另外本研究中土壤 N:P 均值大小依次为 10 年 \approx 20 年 > 1 年 > 30 年, 由于苜蓿作为豆科植物之一能够进行生物固氮作用, 随着生长年限的增加, 在一定生长时期内, 土壤中 N 含量增加, 而土壤 P 的来源较单一, 且在土壤中分布较均匀, 因此 10 年生苜蓿草地土壤 N:P 最大。

3.2 不同种植年限对植物叶片 C、N、P 化学计量特征的影响

植物叶片元素特征与自身结构特点和生长节律有密切关系, 随种植年限的增加, 苜蓿叶片 C、N、P 含量在不同生长年限间的差异较大, 均在 10 年达到最大值。这可能是由于苜蓿生长初期, 生长速度极迅速, 叶片生物量迅速增加, 光合作用较强, 使得糖类在叶片中得到了有效的积累^[41]。但 10 年之后苜蓿生长逐渐进入衰败期, 叶片生物量不断减少, 因此呈现该趋势。苜蓿生长环境的差异可能导致不同的研究有不同的发现, 如在黄土高原雨养农区, 不同时间尺度苜蓿草地叶片有机 C 含量随种植年限的增加呈增加的趋势, 但增加不显著, 叶片全 N 含量随年限的增加基本呈无显著变化, 而叶片全 P 含量随年限呈显著降低的趋势^[42], 这与杨恒山等^[43]对不同生长年限紫花苜蓿 P 的积累与分配规律的研究结果相同; 葛选良等^[26]与杨菁等^[8]认为苜蓿叶片 P 含量随种植年限的增加呈先升后降的趋势。众多研究表明, 苜蓿生长年限会对苜蓿叶片养分含量产生一定的影响, 这是由于不同研究区特殊的地理位置、气候条件或植物吸收差异等因素^[44], 导致随着苜蓿生长年限的增加, 土壤养分的供应量和植物对土壤养分的需求量存在一定的差异。

叶片 C:N:P 化学计量比随种植年限的变化呈现出不同规律。有研究发现, 叶片 C:N 随年龄增加无显著变化, 叶片 C:P 受自身有机 C、全 P

含量的影响表现随年龄增加的趋势^[42]。不同地区, 苜蓿叶片的 N:P 随年龄增加呈先降低后增加的趋势^[7,45]。本研究中苜蓿叶片 C:N、C:P、N:P 随种植年限的增加呈先降低后增加的趋势。叶片 C:N 降低至 10 年之后无显著变化, 这说明苜蓿生长至一定程度之后, 同化 N 素与固定 C 素会趋于一种稳定的状态^[42]。N:P 作为判断环境对植物生长的养分供应状况的指标, Braakhekke^[46]指出, 当 N:P < 14 时, 植物生长主要受 N 限制, 当 N:P > 16 时, 主要受 P 限制。本研究结果表明, 平均 N:P 从 30 年的 17.68 到 20 年的 20.86 不等, 表明在不同种植年限中苜蓿生长主要受到 P 的限制, 这与国内很多研究表明植物叶片 P 含量偏低的规律一致^[47]。

3.3 土壤 C、N、P 含量与植物叶片化学计量学的相关关系

土壤性质的变化直接影响植物的生长、发育及演替过程^[8], 植物的变化也改变着土壤的特征, 因此探讨植物多样性与土壤营养元素定量关系具有重要意义。本研究表明, 土壤养分与植物叶片养分之间没有明显相关关系, 这与祁建等^[48]研究了辽东栎 (*Quercus liaotungensis*) 叶片特性沿海拔梯度的变化中发现叶养分与土壤养分之间没有明显的相关关系这一结论类似。这说明不同年限土壤与植物叶片的化学计量特征变化规律并不同步, 土壤与叶片之间无显著相关关系, 表明二者之间并不是简单的线性关系, 植物对土壤中营养元素的吸收和利用是一个极其复杂的过程^[49], 因此需要进行更具针对性的试验研究来探讨土壤与植物叶片化学计量特征受生物与非生物因素及管理措施的影响。

4 结论

本研究以黄土高原多年生紫花苜蓿为研究对象, 分析了不同生长年限 (种植 1、10、20、30 年) 苜蓿草地土壤与植物养分含量变化及生态化学计量学特征。结果表明, 1) 随着种植年限的增加, 土壤 C、N、P 含量先上升后降低, 在种植 10 年时最高。不同年限苜蓿草地土壤有机 C 和全 N 含量的垂直分布具有一致性, 表层含量明显高于下

层, 在 0-30 cm 含量逐渐减少, 30 cm 以下趋于稳定, 全 P 在整个空间中的分布较为均匀, 其空间变异性低于有机 C 和全 N。2) 在 1-30 年的生长期, 随着种植时间的增加, 研究区苜蓿叶片 C、N、P 含量先上升后下降, 叶片 C : N、C : P、N : P 均先

下降后回升, N : P > 16 表明, 黄土高原地区苜蓿生长主要受 P 限制, 在种植到 10 年之后, 应适当增施 P 肥, 以保证植株的良好生长, 促进土壤与植物中营养物质的良性循环。本研究为黄土高原紫花苜蓿种植及可持续利用管理机制提供了依据。

参考文献 References:

- [1] 杨玉海, 蒋平安. 不同种植年限苜蓿地土壤理化特性研究. *水土保持学报*, 2005, 19(2): 110-113.
YANG Y H, JIANG P A. Studies on soil properties of lucerne with different cultivating ages. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(2): 110-113.
- [2] 杨晓晖, 王葆芳, 江泽平. 乌兰布和沙漠东北缘三种豆科绿肥植物生物量和养分含量及其对土壤肥力的影响. *生态学杂志*, 2005, 24(10): 1134-1138.
YANG X H, WANG B F, JIANG Z P. Biomass and nutrient concentrations of three green manure leguminous plants and their effects on soil nutrients at northeastern edge of Ulanbuhe Desert. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(10): 1134-1138.
- [3] 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.
- [4] 马志良, 杨万勤, 吴福忠, 高顺. 遮荫对紫花苜蓿地上生物量和化学计量特征的影响. *应用生态学报*, 2014, 25(11): 3139-3144.
MA Z L, YANG W Q, WU F Z, GAO S. Effects of shading on the aboveground biomass and stoichiometry characteristics of *Medicago sativa*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(11): 3139-3144.
- [5] 王惠, 苗福泓, 孙娟, 刘洪庆, 杨国锋. 鲁东南地区不同年龄紫花苜蓿 N、P 生态化学计量特征研究. *草业学报*, 2017, 26(8): 216-222.
WANG H, MIAO F H, SUN J, LIU H Q, YANG G F. Nitrogen and phosphorus ecological stoichiometry in different-aged alfalfa stands in southeast Shandong. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(8): 216-222.
- [6] 李新乐. 连续多年灌水施磷肥对紫花苜蓿产量和土壤环境的影响. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 2014.
LI X L. Effects of irrigation and phosphorus fertilizer application for consecutive years on alfalfa yield and soil environment. Master Thesis. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Dissertation, 2014.
- [7] WANG Z N, LU J Y, YANG H M, ZHANG Z, LUO C L, ZHAO Y X. Resorption of nitrogen, phosphorus and potassium from leaves of lucerne stands of different ages. *Plant & Soil*, 2014, 383(1/2): 301-312.
- [8] 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.
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-97, 264-270.
BAO S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 25-97, 264-270.
- [10] 邵继承, 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.
- [11] 罗珠珠, 李玲玲, 牛伊宁, 蔡立群, 张仁陟, 谢军红. 土壤团聚体稳定性及有机碳组分对苜蓿种植年限的响应. *草业学报*, 2016, 25(10): 40-47.
LUO Z Z, LI L L, NIU Y N, CAI L Q, ZHANG R Z, XIE J H. Response of soil aggregate stability and soil organic carbon fractions to different growth years of alfalfa. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(10): 40-47.

- [12] 金凤霞. 苜蓿种植年限对其生产力及土壤质量的影响. 银川: 宁夏大学硕士学位论文, 2014.
JIN F X. The effect of alfalfa planting years on its productivity and soil quality. Master Thesis. Yinchuan: Ningxia University, 2014.
- [13] 张少民, 郝明德, 李寒暝, 白灯莎·买买提艾力. 人工苜蓿草地土壤理化性状变化. 新疆农业科学, 2007, 44(S3): 122-125.
ZHANG S H, HAO M D, LI H M, Baidengsha-maimaitiaili. Change of soil physical and chemical properties in alfalfa field. Xinjiang Agricultural Sciences, 2007, 44(S3): 122-125.
- [14] 周恒, 时永杰, 胡宇, 陈璐, 路远, 田福平. 不同生长年限紫花苜蓿草地土壤团聚体有机碳分布特征. 中国土壤与肥料, 2017(1): 1-6.
ZHOU H, SHI Y J, HU Y, CHEN L, LU Y, TIAN F P. Distribution characteristics of organic carbon fraction in soil aggregates of grassland with different alfalfa growing ages. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2017(1): 1-6.
- [15] 周恒. 不同生长年限紫花苜蓿草地土壤有机碳及其组分变化特征. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 2016.
ZHOU H. Variation characteristics of organic carbon and its fractions in soil of alfalfa grassland with different growing years. Master Thesis. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Dissertation, 2016.
- [16] 单贵莲. 内蒙古锡林郭勒典型草原恢复演替研究与健康评价. 北京: 中国农业科学院博士学位论文, 2009.
SHAN G L. Study on restoration succession and health evaluation of typical steppe in Xilingol, Inner Mongolia. PhD Thesis. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009.
- [17] 任璐璐, 张炳学, 韩凤朋, 张兴昌. 黄土高原不同年限刺槐土壤化学计量特征分析. 水土保持学报, 2017, 31(2): 339-344.
REN L L, ZHANG B X, HAN F P, ZHANG X C. Ecological stoichiometric characteristics of soils in *Robinia pseudoacacia* forests of different ages on the Loess Plateau. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(2): 339-344.
- [18] 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. 生态学报, 2007, 27(2): 603-612.
WEI X R, SHAO M A. The distribution of soil nutrients on sloping land in the gully region watershed of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(2): 603-612.
- [19] 党亚爱, 李世清, 王国栋, 邵明安. 黄土高原典型土壤全氮和微生物氮剖面分布特征研究. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(6): 1020-1027.
DANG Y A, LI S Q, WANG G D, SHAO M A. Distribution characteristics of soil total nitrogen and soil microbial biomass nitrogen for the typical types of soils on the Loess Plateau. *Plant Nutrition and Fertilizer science*, 2007, 13(6): 1020-1027.
- [20] 贺亮, 苏印泉, 季志平, 辛占良. 黄土高原沟壑区刺槐、油松人工林的碳储量及其分布特征研究. 西北林学院学报, 2007, 22(4): 49-53.
HE L, SU Y Q, JI Z P, XIN Z L. Studies on the carbon storage and distributive character of *robinia* and *pinus* in Loess Plateau gully area. *Journal of Northwest Forestry University*, 2007, 22(4): 49-53.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 周国新. 会同杉木林生态系统 C : N : P 生态化学计量的季节动态特征. 长沙: 中南林业科技大学硕士学位论文, 2015.
ZHOU G X. Seasonal dynamics of C : N : P ecological stoichiometry of Chinese fir in Huitong. Master Thesis. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2015.
- [24] 姚新春, 师尚礼. 寒区旱区间歇性干旱对接种根瘤菌苜蓿草地土壤养分动态的影响. 土壤通报, 2007, 38(3): 457-462.
YAO X C, SHI S L. Effect of intermittent drought on soil nutrients of alfalfa grassland inoculated with *Rhizobium* in a cold and drought region. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(3): 457-462.

- [25] 李新乐, 侯向阳, 穆怀彬, 李西良, 郭丰辉. 连续6年施磷肥对土壤磷素积累、形态转化及有效性的影响. 草业学报, 2015, 24(8): 218-224.
LI X L, HOU X Y, MU H B, LI X L, GUO F H. P fertilization effects on the accumulation, transformation and availability of soil phosphorus. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(8): 218-224.
- [26] 葛选良, 杨恒山, 邵继承, 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 supplying capacity of alfalfa plained soils in different growing years. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(5): 1131-1134.
- [27] 邵继承. 种植年限对紫花苜蓿地土壤理化特性及其微生物影响的研究. 通辽: 内蒙古民族大学硕士学位论文, 2008.
TAI J C. Study on effects of planting years on alfalfa soil physical-chemical characteristics and microorganisms. Master Thesis. Tongliao: Inner Mongolia University for Nationalities, 2008.
- [28] 何晓雁, 郝明德, 李丽霞, 郭胜安. 黄土高原轮作系统苜蓿土壤磷素变化特征. 草地学报, 2014, 22(5): 1056-1062.
HE X Y, HAO M D, LI L X, GUO S A. Soil phosphorus variation of alfalfa rotation system in the Loess Plateau. Acta Agrictir Sinica, 2014, 22(5): 1056-1062.
- [29] 陈志怡, 李金月. 不同生长年限对紫花苜蓿产量及土壤养分的影响. 山东农业大学学报(自然科学版), 2015(2): 214-220.
CHEN Z Y, LI J Y. Effects of growth years on the yield of *Medicago sativa* L. and soil nutrient. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2015(2): 214-220.
- [30] 闻志彬. 种植紫花苜蓿对土壤理化性状的影响. 杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2008.
WEN Z B. The influence of planting alfalfa on the physico-chemical characteristics of soil. Master Thesis. Yangling: Northwest A&F University, 2008.
- [31] 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. Effects of legume green manure on soil nutrient and ecological stoichiometry of Weibei dryland. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(4): 999-1008.
- [32] 陈文新. 土壤和环境微生物学. 北京: 中国农业大学出版社, 1990: 125-126.
CHEN W X. Soil and Environmental Microbiology. Beijing: China Agricultural University Press, 1990: 125-126.
- [33] 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 Agriculture Press, 2000: 36-37, 196-198.
- [34] 姜红梅. 半干旱黄土高原不同土地利用下土壤有机碳、养分及水分的动态变化. 兰州: 兰州大学博士学位论文, 2006.
JIANG H M. Dynamics of soil organic carbon, fertility and water in different land uses from the semi-arid Loess Plateau, China. PhD Thesis. Lanzhou: Lanzhou University, 2006.
- [35] TIAN H Q, CHEN G S, ZHANG C, MELIILLO 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(1/3): 139-151.
- [36] AGREN G I. Stoichiometry and nutrition of plant growth in natural communities. Annual Review of Ecology Evolution & Systematics, 2008, 39(39): 153-170.
- [37] 敖伊敏. 不同围封年限下典型草原土壤生态化学计量特征研究. 呼和浩特: 内蒙古师范大学硕士学位论文, 2012.
AO Y M. Study on soil ecological stoichiometry of enclosing life in typical steppe. Master Thesis. Huhhot: Inner Mongolia Normal University, 2012.
- [38] 曾全超, 李鑫, 董扬红, 李娅芸, 程曼, 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, LI Y Y, CHENG M, AN S S. Characteristics of soil properties and zonal variation of ecological stoichiometry in the Loess Plateau of Shanxi Province. Journal of Natural Resources, 2015, 30(5): 870-879.

- [39] 王建林, 钟志明, 王忠红, 陈宝雄, 张宪洲, 沈振西, 胡兴祥, 大次卓嘎. 青藏高原高寒草原生态系统土壤碳磷比的分布特征. 草业学报, 2013, 24(12): 3399-3406.
WANG J L, ZHONG Z M, WANG Z H, CHEN B X, ZHANG X Z, SHEN Z X, HU X X, Dacizhuoga. Soil N/P ratio distribution characteristics of alpine grassland ecosystem in Qinghai Tibet Plateau. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(12): 3399-3406.
- [40] 徐沙, 龚吉蕊, 张梓榆, 刘敏, 王忆慧, 罗亲普. 不同利用方式下草地优势植物的生态化学计量特征. 草业学报, 2014, 23(6): 45-53.
XU S, GONG J R, ZHANG Z Y, LIU M, WANG Y H, LUO Q P. The ecological stoichiometry of dominant species in different land uses type of grassland. Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23(6): 45-53.
- [41] 赵亚芳, 徐福利, 王渭玲, 王国兴, 陈钦程, 赵海燕, 马亚娟. 华北落叶松针叶碳、氮、磷含量及化学计量比的季节变化. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5): 1328-1335.
ZHAO Y F, XU F L, WANG W L, WANG X G, CHEN Q C, ZHAO H Y, MA Y J. Seasonal variations of leaf C, N, P contents and stoichiometry of *Larix principis-rupprechtii*. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2015, 21(5): 1328-1335.
- [42] 王振南. 黄土高原雨养农区不同时间尺度苜蓿草地 C、N、P 生态化学计量特征研究. 兰州: 兰州大学博士学位论文, 2016.
WANG Z N. Study on ecological stoichiometry of C, N and P at temporal scales in lucerne grasslands on the rainfed Loess Plateau. PhD Thesis. Lanzhou: Lanzhou University, 2016.
- [43] 杨恒山, 葛选良, 王俊慧, 张丽妍. 不同生长年限紫花苜蓿磷的积累与分配规律. 草业科学, 2010, 27(2): 89-92.
YANG H S, GE X L, WANG J H, ZHANG L Y. Phosphorus accumulation and distribution in different age alfalfa. Pratacultural Science, 2010, 27(2): 89-92.
- [44] 王振南, 杨惠敏. 植物碳氮磷生态化学计量对非生物因子的响应. 草业科学, 2013, 30(6): 927-934.
WANG Z N, YANG H M. Response of ecological stoichiometry of carbon, nitrogen and phosphorus in plants to abiotic environmental factors. Pratacultural Science, 2013, 30(6): 927-934.
- [45] ZHANG X, WANG Z N, YANG H M. Soil nitrogen, phosphorus and potassium: Which is the bottleneck element during lucerne growth? Lanzhou: Proceedings of the 4th International Symposium for Farming Systems Design, 2013: 19-22.
- [46] BRAKHEKKE W G. The resource balance hypothesis of plant species diversity in grassland. *Journal of Vegetation Science*, 1999, 10(2): 187-200.
- [47] GUSEWELL S. N : P ratios in terrestrial plants: Variation and functional significance. *New Phytologist*, 2004, 164(2): 243-266.
- [48] 祁建, 马克明, 张育新. 辽东栎 (*Quercus liaotungensis*) 叶特性沿海拔梯度的变化及其环境解释. *生态学报*, 2007, 27(3): 930-937.
QI J, MA K M, ZHANG Y X. The altitudinal variation of leaf traits of *Quercus liaotungensis* and associated environmental explanations. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3): 930-937.
- [49] 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. *环境科学*, 2016, 37(3): 1128-1138.
ZHANG H D, RU H L, JIAO F, XUE C Y, GUO M L. C, N, P, K stoichiometric characteristic of leaves, root and soil in different abandoned years in Loess Plateau. *Environmental Science*, 2016, 37(3): 1128-1138.

(责任编辑 王芳)