

DOI:10.12171/j.1000-1522.20200149

黄土高原高寒区不同人工林土壤 养分及生态化学计量特征

刘若莎 王冬梅

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要:【目的】通过分析黄土高原高寒区不同人工林和不同土层的土壤养分和生态化学计量变化,旨在阐明不同人工林土壤养分和化学计量特征,揭示土壤养分和化学计量随土层深度的变化规律。【方法】以青海黄土高原高寒区退耕的人工林地(包括青海云杉、华北落叶松、青杨、白桦)为研究对象,以自然退耕的草地和农田为对照,测定了6种植被类型在0~20 cm、20~40 cm和40~60 cm土壤层的C、N、P含量及生态化学计量比。【结果】(1)黄土高原高寒区不同人工林的土壤C、N含量差异显著($P < 0.05$),P含量部分差异显著;人工林地各土层的C、N含量显著高于草地和农田,且青杨林在0~20 cm表土层的有机碳、全氮含量最高,分别为25.82、2.17 g/kg。(2)黄土高原高寒区不同人工林的土壤生态化学计量有显著差异($P < 0.05$);0~60 cm土层中人工林地的C:N显著低于农田,C:P和N:P高于草地和农田($P < 0.05$);青杨在0~20 cm表土层的生态化学计量比其他人工林类型高,C:N、C:P和N:P分别为11.99、43.27和3.64。(3)相关性分析表明,研究区土壤的有机碳与全氮相关性最紧密($P < 0.01$),全氮与土壤C:N和N:P相关性最紧密($P < 0.01$),有机碳与土壤C:P相关性最紧密($P < 0.01$)。说明研究区土壤C、N对不同人工林的响应具有一致性,土壤的C:N和N:P主要受全氮的影响,C:P主要受有机碳的影响。(4)在0~60 cm土层中,黄土高原高寒区不同植被类型的土壤C、N、P含量均随土壤深度的增加而降低。研究区土壤的生态化学计量除青杨随土壤深度的增加而下降外,其他退耕植被无显著变化趋势。说明人工林对表层土壤养分的改良效果最好。【结论】不同人工林的土壤养分及生态化学计量有显著差异,且青杨林表层土壤的养分含量和化学计量最高;土壤养分随土壤深度的增加而降低,土壤生态化学计量随土壤深度变化不显著。

关键词: 黄土高原高寒区;人工林;土壤养分;生态化学计量

中图分类号: S718.55⁺1.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2021)01-0088-08

引文格式: 刘若莎,王冬梅.黄土高原高寒区不同人工林土壤养分及生态化学计量特征[J].北京林业大学学报,2021,43(1):88-95. Liu Ruosha, Wang Dongmei. Soil nutrients and ecostochiometric characteristics of different plantations in the alpine region of the Loess Plateau[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(1): 88-95.

Soil nutrients and ecostochiometric characteristics of different plantations in the alpine region of the Loess Plateau

Liu Ruosha Wang Dongmei

(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] By analyzing the changes of soil nutrients and ecostochiometry in different plantations and varied soil layers in the alpine region of the Loess Plateau, this paper aims to clarify the soil nutrients and stoichiometric characteristics under different plantations, and to reveal the laws of soil nutrients and stoichiometric changes with soil depth. [Method] In this paper, plantations (including *Picea crassifolia*, *Larix principis-rupprechtii*, *Populus cathayana*, *Betula platyphylla*) in the alpine region of the Loess Plateau in Qinghai Province, northwestern China were taken as the research objects, and the grassland of natural

收稿日期: 2020-05-18 修回日期: 2020-12-04

基金项目: 国家重点研发计划重点专项课题(2017YFC0504604)。

第一作者: 刘若莎。主要研究方向: 林业生态工程。Email: 2267664943@qq.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路35号北京林业大学水土保持学院。

责任作者: 王冬梅, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 水土保持、林业生态工程。Email: dmwang@126.com 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

conversion and cropland were taken as control. C, N and P contents and stoichiometry ratios of six vegetation types in 0–20 cm, 20–40 cm and 40–60 cm soil layers were determined. [Result] (1) The soil C and N contents of different plantations in the alpine region of the Loess Plateau were significantly different ($P < 0.05$), and the difference of soil P content was partially significant. The C and N contents in each soil layer of plantations were significantly higher than those of grassland and cropland, and the organic carbon and total nitrogen contents in 0–20 cm topsoil of *Populus cathayana* were the highest, which were 25.82 and 2.17 g/kg, respectively. (2) The soil ecostochiometry of different plantations in the alpine region of the Loess Plateau was significantly different ($P < 0.05$). The C:N of plantations in 0–60 cm soil layer was significantly lower than cropland, while the C:P and N:P were higher than those of grassland and cropland ($P < 0.05$). The ecostochiometry of *Populus cathayana* in 0–20 cm topsoil was higher than other plantation types, with C:N, C:P and N:P being 11.99, 43.27 and 3.64, respectively. (3) Correlation analysis showed that the organic carbon in the study area had the closest correlation with total nitrogen ($P < 0.01$), the total nitrogen had the closest correlation with soil C:N and N:P ($P < 0.01$), and the organic carbon had the closest correlation with soil C:P ($P < 0.01$). This indicated that the responses of soil C and N in the study area to different plantations were consistent. The soil C:N and N:P were mainly affected by total nitrogen, and the C:P was mainly affected by organic carbon. (4) In the 0–60 cm soil layer, the soil C, N and P contents of different vegetation types decreased with the increase of soil depth in the alpine region of the Loess Plateau. The soil ecostochiometry of the vegetation in the study area had no significant changing trend except for *Populus cathayana*, which decreased with the increase of soil depth. This indicated that plantations had the best improvement effect on the surface soil nutrients. [Conclusion] Soil nutrients and ecostochiometry are significantly different in varied plantations, and the nutrient content and stoichiometry of *Populus cathayana* in topsoil are the highest. Soil nutrients decrease with the increase of soil depth, while soil ecostochiometry does not change significantly with soil depth.

Key words: alpine region of the Loess Plateau; plantation; soil nutrient; ecostochiometry

土壤是陆地生态系统重要的 C、N 储蓄库, 为植物的生长发育提供了养分基础^[1-2]。土壤的生态化学计量是反映土壤养分的重要指标, 土壤的 C:N 和 C:P 分别反映了土壤有机质的分解速率和磷的有效性, N:P 可确定养分限制的阈值^[3-4]。土壤化学计量比可以直接影响植物对这些元素的吸收和利用, 甚至改变植物的整体生物量配置和生态策略^[5]。因此, 研究土壤 C、N、P 化学计量比, 有助于了解陆地生态系统的生物地球化学过程、养分循环和区域营养限制^[6]。

退耕还林是我国的一项重要生态环境保护措施^[7], 其在防治水土流失、改善土壤理化性质、提高土壤养分含量和恢复生态环境方面具有重要作用^[8]。目前许多学者对退耕后的人工林地土壤理化性质进行了大量研究, 但由于研究区域、退耕年限、立地条件的不同, 退耕后土壤养分的积累情况也不相同^[9-10]。而不同人工林因其生物学特性的差异, 对养分的吸收和利用有所不同, 也会导致土壤养分的差异^[11]。例如, 陈鹏等^[12]对油松(*Pinus tabulaeformis*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、小叶杨(*Populus simonii*)和针茅(*Stipa capillata*)等退耕植被的土壤进行研

究, 得出柠条林对土壤颗粒分布及土壤 C、N 和 P 养分含量的改良效果最佳。梁爱华等^[13]表明退耕后土壤 C、N 积累速率表现为林地 > 灌木 > 草地。Li 等^[14]和 Fu 等^[15]发现退耕林地的土壤有机碳(SOC)、总氮(TN)和总磷(TP)的含量和蓄积量高于草地。但目前这些研究多集中在不同退耕植被对土壤养分含量和物理性质方面的影响, 对土壤生态化学计量方面研究较少。因此, 探讨退耕后不同人工林地土壤生态化学计量变化可为今后植被类型的合理选择和植被恢复方向提供理论指导, 这对脆弱生态系统的可持续恢复有重要意义。

青海黄土高寒地区属于高寒生态系统, 其气候条件独特, 土壤养分贫乏, 生态系统高度脆弱^[16]。为了改善当地生态环境, 促进生态系统的恢复, 中国政府于 1999 年开始实施“退耕还林”工程恢复当地植被^[17]。退耕后一些学者对植被恢复过程的土壤、凋落物、植被等均有研究^[18-20], 但对不同人工林的土壤生态化学计量对比研究较少, 对人工林的土壤养分恢复现状认识不足。因此, 本文以青海黄土高寒地区退耕 20 年的 4 种人工林地地为研究对象, 以自然退耕的草地和农田为对照, 测定各植被类型的土壤 C、

N、P 含量及其化学计量,分析黄土高寒地区不同人工林土壤 C、N、P 含量及化学计量特征,并揭示土壤 C、N、P 含量及化学计量比随土层深度的变化规律,以期为区域植被建设提供理论依据。

1 研究区概况

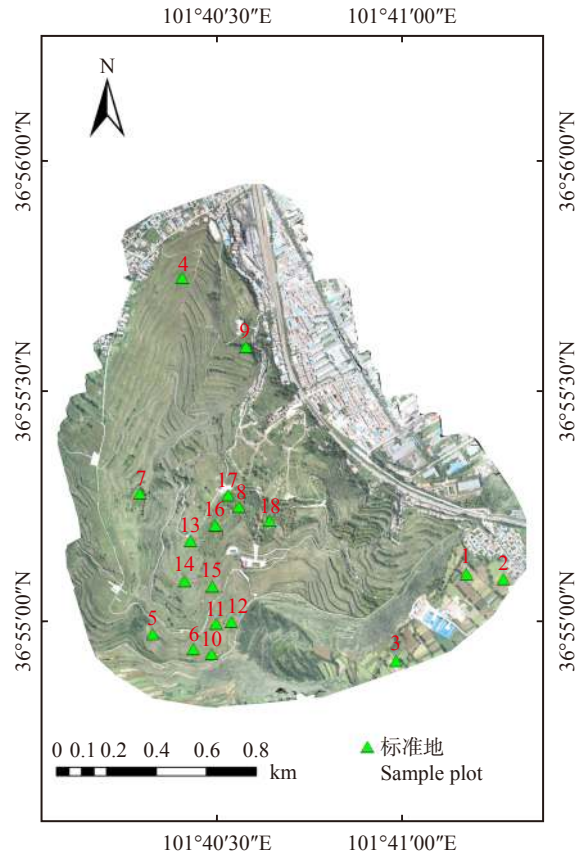
研究区位于青海省东北部的大通县,地处祁连山南麓,地理坐标为 $36^{\circ}43' \sim 37^{\circ}23' \text{N}$, $100^{\circ}51' \sim 101^{\circ}56' \text{E}$,海拔在 2 280 ~ 4 622 m 之间,属半干旱半湿润的大陆性气候^[21]。境内山多川少,地形复杂,水土流失严重。该区由于海拔较高,气候垂直变化明显,全年日照时间 2 605 h,年均气温为 2.8 $^{\circ}\text{C}$,无霜期占全年三分之一,年降水量年在 450 ~ 820 mm 之间,75% 的年降水量集中在 7—9 月,土壤以黄土母质上发育的山地棕壤为主^[22]。试验地位于青海省大通县閤门滩小流域,该区自 1999 年以来,为控制当地水土流失问题,实施退耕还林工程恢复当地植被,植被类型主要是寒温性常绿针叶林及落叶阔叶林类,主要树种有青海云杉(*Picea crassifolia*)、祁连圆柏(*Sabina przewalskii*)、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)、青杨(*Populus cathayana*)、白桦(*Betula platyphylla*)等,主要灌木种有沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、枸杞(*Lycium chinense*)、小蘗(*Berberis circumsterrata*)等,主要草本物种有紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、问荆(*Equisetum arvense*)、珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)等。研究区主要农用地类型为坡耕地,主要作物为小麦,坡耕地常规施肥,林草地无施肥管理^[23]。

2 研究方法

2.1 样地设置与土样采集

在试验地选择退耕 20 年的 4 种人工林地(青海云杉林、白桦林、华北落叶松林、青杨林)进行野外试验,并以自然退耕的草地和小麦田为对照。对研究区 6 种植被类型分别设置 3 个 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 标准地,各重复样本之间的距离至少为 100 m,以消除场地的空间异质性。研究区共设置 18 个标准地用于调查各标准地的海拔、坡度、坡向、坡位、林龄以及植被的种类、数量、株高和覆盖度等基本信息。所选标准地的地形、气候等相似,标准地调查的位置和基本情况见图 1 和表 1。

将每个标准地均匀地分成 4 个 $10 \times 10 \text{ m}^2$ 的样方,在每个样方中心设置一个土壤采样点,在各个土壤采样点用直径为 5 cm 的土钻分别取 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm 土层样品各 50 g(每个表层土壤样品都在去除凋落物后采集,采样点距离树木至



1、2、3 代表小麦田;4、5、6 代表草地;7、8、9 代表青杨;10、11、12 代表白桦;13、14、15 代表青海云杉;16、17、18 代表华北落叶松。1, 2 and 3 represent wheat field; 4, 5 and 6 represent grassland; 7, 8 and 9 represent *Populus cathayana*; 10, 11 and 12 represent *Betula platyphylla*; 13, 14 and 15 represent *Picea crassifolia*; 16, 17 and 18 represent *Larix principis-rupprechtii*.

图 1 研究区各植被类型的标准地点位

Fig. 1 Location of sample plots for each vegetation type in the study area

少 80 cm),将每个标准地 4 个采样点的每层采集的土壤样品分别混合成一个样本,并取 100 g 左右带回实验室,放置在通风良好的地方自然干燥,粉碎、过筛后,用于土壤 C、N、P 含量的测定。

有机质采用重铬酸钾外加热法测定,全氮采用凯氏定氮法测定,全磷采用 NaOH 碱溶-钼锑抗比色法测定^[24]。

2.2 数据处理与分析

所有变量均采用平均值和标准差描述,使用 Excel 2013 对数据进行统计整理。采用 SPSS 24.0 对数据进行多重比较(LSD)和单因素方差分析(One-way ANOVA),检验不同植被类型各个指标的差异显著性。用 Pearson 法进行相关性分析,使用 Origin 8.5 进行绘图。

3 结果与分析

3.1 不同植被类型和土壤深度的土壤 C、N、P 含量特征
由图 2 可得,在 0 ~ 60 cm 土层中,人工林地、草

表 1 黄土高寒区各采样点基本信息

Tab. 1 Basic information of sampling points in the alpine region of the Loess Plateau

植被类型 Vegetation type	坡向 Slope aspect	采样点编号 Sampling point No.	经度 Longitude	纬度 Latitude	坡度 Gradient/(°)	海拔 Altitude/m	平均胸径 Mean DBH/cm	平均树高 Mean plant height/m	枯落物层厚度 Litter thickness/cm
小麦田 Wheat field	半阴坡 Semi-shady slope	1	101°41'10"E	36°55'04"N	8	2 485			
		2	101°41'16"E	36°55'04"N	10	2 478			
		3	101°40'59"E	36°54'52"N	12	2 500			
		4	101°40'24"E	36°55'40"N	9	2 511			0.4
草地 Grassland	阴坡 Shady slope	5	101°40'20"E	36°54'57"N	13	2 580			1.6
		6	101°40'26"E	36°54'56"N	15	2 588			0.5
		7	101°40'19"E	36°55'16"N	18	2 589	9.9	7.2	2.5
青杨 <i>Populus cathayana</i>	阴坡 Shady slope	8	101°40'35"E	36°55'14"N	17	2 500	7.6	5.8	5.5
		9	101°40'36"E	36°55'34"N	19	2 462	8.1	6.8	4.5
		10	101°40'30"E	36°54'55"N	8	2 596	4.2	2.4	0.5
白桦 <i>Betula platyphylla</i>	阴坡 Shady slope	11	101°40'31"E	36°55'01"N	10	2 517	3.9	1.7	0.7
		12	101°40'33"E	36°55'02"N	9	2 528	3.9	1.9	0.5
		13	101°40'26"E	36°55'9"N	10	2 509	5.4	3.4	0.8
青海云杉 <i>Picea crassifolia</i>	阴坡 Shady slope	14	101°40'25"E	36°55'5"N	15	2 519	5.2	2.7	0.8
		15	101°40'30"E	36°55'03"N	18	2 550	4.5	2.1	0.8
华北落叶松 <i>Larix principis-rupprechtii</i>	阴坡 Shady slope	16	101°40'30"E	36°55'11"N	16	2 525	7.9	6.9	3.8
		17	101°40'33"E	36°55'15"N	18	2 501	7.1	6.5	2.5
		18	101°40'39"E	36°55'12"N	17	2 530	7.5	6.8	3.0

地和小麦田的土壤有机碳含量分别在 10.59 ~ 25.82 g/kg、7.32 ~ 13.67 g/kg 和 8.44 ~ 12.86 g/kg 之间; 人工林地各层土壤的有机碳含量均显著高于草地和小麦田 ($P < 0.05$); 在各人工林类型中, 青杨在 0 ~ 20 cm 土层的有机碳含量显著高于其他人工林类型, 青杨和青海云杉分别在 20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 土层显著低于其他人工林类型 ($P < 0.05$)。在 0 ~ 60 cm 土层中, 人工林地、草地和小麦田的土壤全氮含量分别在 0.92 ~ 2.17 g/kg、0.84 ~ 1.36 g/kg 和 0.43 ~ 0.81 g/kg 之间; 0 ~ 60 cm 土壤的全氮含量均表现为人工林地 > 草地 > 小麦田; 在各人工林类型中, 青杨在 0 ~ 20 cm 土层的全氮含量显著高于其他人工林类型, 华北落叶松在 40 ~ 60 cm 土层显著低于其他人工林类型 ($P < 0.05$)。在 0 ~ 60 cm 土层中, 人工林地、草地和小麦田的土壤全磷含量分别在 0.34 ~ 0.83 g/kg、0.57 ~ 0.80 g/kg 和 0.51 ~ 0.74 g/kg 之间, 各土地利用类型间的全磷含量差异部分显著, 且无明显规律; 在各人工林类型中, 青海云杉和白桦在 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层的全磷含量显著高于华北落叶松和青杨, 华北落叶松在 40 ~ 60 cm 土层显著低于其他人工林类型 ($P < 0.05$)。

由图 2 可知, 人工林地、草地和小麦田在 0 ~ 60 cm 土壤层中的有机碳、全氮、全磷含量均表现为

0 ~ 20 cm > 20 ~ 40 cm > 40 ~ 60 cm, 0 ~ 40 cm 土层差异较显著, 说明各植被类型在 0 ~ 60 cm 土层中的有机碳、全氮、全磷含量均随土壤深度的增加而下降。

多重比较的结果表明, 0 ~ 60 cm 土层中人工林地各层土壤的 C、N 含量较草地和小麦田高, 青杨在 0 ~ 20 cm 表土层的有机碳、全氮含量最高。

3.2 不同植被类型和土壤深度的土壤生态化学计量特征

由图 3 可得, 在 0 ~ 60 cm 土层中, 人工林地、草地和小麦田的土壤 C:N 分别在 8.27 ~ 13.10、8.28 ~ 10.07 和 16.24 ~ 19.96 之间; 人工林地各层土壤的 C:N 均显著低于小麦田 ($P < 0.05$); 在各人工林类型中, 青杨在 0 ~ 20 cm 土层的 C:N 最高, 华北落叶松在 20 ~ 60 cm 土层的 C:N 最高 ($P < 0.05$)。在 0 ~ 60 cm 土层中, 人工林地、草地和小麦田的土壤 C:P 分别在 18.05 ~ 43.27、12.89 ~ 17.07 和 15.53 ~ 18.95 之间; 各层土壤的 C:P 均表现为人工林地 > 小麦田 > 草地, 且差异性显著 ($P < 0.05$); 在各人工林类型中, 青杨在各土层的 C:P 最高, 但在 20 ~ 40 cm 土层中与华北落叶松差异不显著。在 0 ~ 60 cm 土层中, 人工林地、草地和小麦田的土壤 N:P 分别在 1.96 ~ 3.64、1.48 ~ 1.70 和 0.79 ~ 1.09 之间; 各层土壤的 N:P 均表现为人工林地 > 草地 > 小麦田, 且差

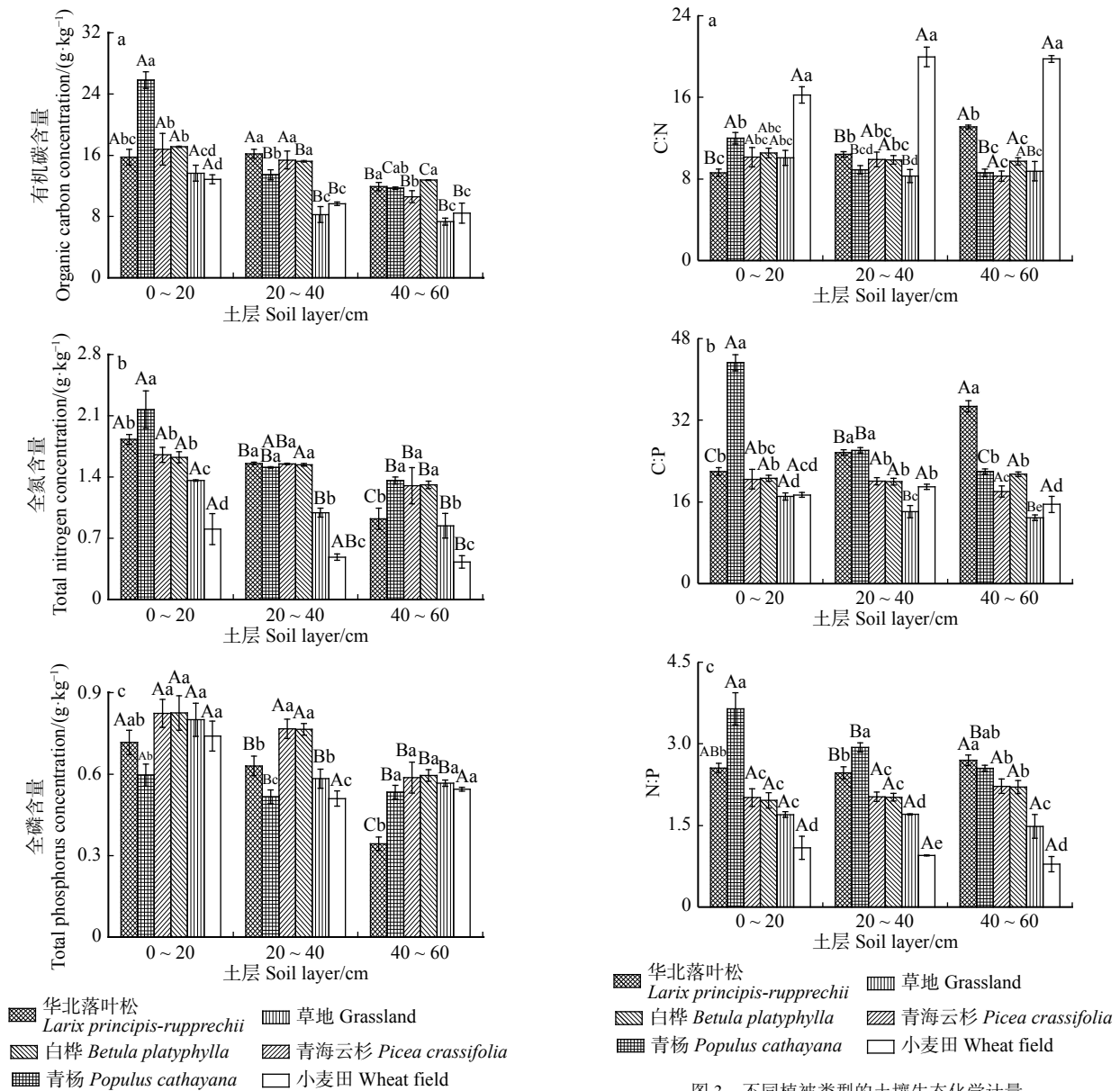


图3 不同植被类型的土壤生态化学计量

Fig. 3 Soil ecstoichiometry of different vegetation types

数据为平均值 \pm 标准差。不同大写字母表示不同土壤深度间差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示不同植被类型间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Data mean \pm SD. Different capital letters indicate significant differences in varied soil depths ($P < 0.05$). Different lowercase letters indicate significant differences among varied vegetation types ($P < 0.05$). Same as below.

图2 不同植被类型的各层土壤 C、N、P 含量

Fig. 2 Contents of C, N and P in each soil layer under different vegetation types

异性显著 ($P < 0.05$); 在各人工林类型中, 0~40 cm 土层的 N:P 表现为青杨 > 华北落叶松 > 青海云杉 > 白桦, 40~60 cm 土层的 N:P 表现为华北落叶松 > 青杨 > 青海云杉 > 白桦, 且青海云杉与白桦在各土层间的差异不显著。

由图3可知, 华北落叶松土壤的 C:N 和 C:P 表现为 40~60 cm > 20~40 cm > 0~20 cm, 青杨的 C:N、C:P 和 N:P 均表现为 0~20 cm > 20~40 cm > 40~60 cm, 草地的 C:P 表现为 0~20 cm > 20~

40 cm > 40~60 cm, 差异显著 ($P < 0.05$); 以上结果说明在 0~60 cm 土层中, 华北落叶松土壤的 C:N 和 C:P 均随土壤深度的增加而升高, 青杨的 C:N、C:P、N:P 和草地的 C:P 随土壤深度的增加而下降, 其他植被类型的生态化学计量随土壤深度的变化均无显著变化趋势。

多重比较的结果表明, 0~60 cm 土层中人工林地的 C:N 低于小麦田, C:P 和 N:P 高于草地和小麦田; 青杨在 0~20 cm 表土层的生态化学计量比较其他人工林类型高。

3.3 土壤 C、N、P 含量与生态化学计量比的相关性

相关性分析结果表明(表2), 在 0~60 cm 土层的不同植被类型之间, 有机碳、全氮和全磷之间存在极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 且有机碳与全氮的相关性最高。在土壤养分与生态化学计量之间, 有机

表 2 土壤 (0~60 cm) C、N、P 含量及其生态化学计量比的相关性分析
Tab. 2 Correlation analysis of soil (0-60 cm) C, N, P content and its ecostochiometry

项目 Item	有机碳 Organic carbon	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	C:N	C:P	N:P
有机碳 Organic carbon	1					
全氮 Total nitrogen	0.828**	1				
全磷 Total phosphorus	0.369**	0.428**	1			
C:N	-0.062	-0.568**	-0.196	1		
C:P	0.737**	0.512**	-0.319*	0.083	1	
N:P	0.647**	0.779**	-0.214	-0.482**	0.802**	1

注: *表示显著相关($P < 0.05$); **表示极显著相关($P < 0.01$)。Note: * means significant correlation ($P < 0.05$); ** means extremely significant correlation ($P < 0.01$).

碳、全磷与 C:N 无显著相关性($P > 0.05$), 全氮与 C:N 呈极显著负相关($P < 0.01$); 有机碳、全氮与 C:P 呈极显著正相关($P < 0.01$), 全磷与 C:P 呈显著负相关($P < 0.05$), 且有机碳与土壤 C:P 的相关性最高; 有机碳、全氮与 N:P 呈极显著正相关($P < 0.01$), 全磷与 N:P 间无显著相关性($P > 0.05$), 全氮与土壤 N:P 的相关性最高。在生态化学计量比值之间, C:N 与 C:P 无显著相关性($P > 0.05$), C:N 与 N:P 呈极显著负相关关系($P < 0.01$); C:P 与 N:P 呈极显著正相关关系($P < 0.01$), 且在生态化学计量间的相关性最高。以上结果说明, 土壤 C:N 和 N:P 受全氮影响较大, C:P 受有机碳影响较大。

4 讨 论

4.1 不同植被类型对土壤养分含量的影响

本研究结果显示, 人工林地的土壤有机碳和全氮含量高于草地和小麦田, 这与孙骞等^[25]研究结果一致。这主要由于: (1) 农田退耕成人工林后, 耕种过程中的物理机械破坏消失, 同时地表植被、地下根系增多, 枯落物全部回归土壤, 使土壤有机物来源增加^[26]。(2) 农田退耕成人工林后地表植被覆盖度和地下根系增加, 降雨时的土壤侵蚀降低, 土壤养分流失量减少^[25]。因此, 在青海黄土高寒区人工林地的土壤养分含量较高。在本研究的不同人工林类型中, 青杨林对表土层有机碳、全氮含量的提高均显著高于其他林分类型, 这一结果与 Shi 等^[27]和 Wang 等^[28]研究结果一致。这是因为: (1) 青杨林属于阔叶林, 它的根生物量和凋落物较针叶林丰富, 表层土壤的有机物累积率高, 使土壤的有机物输入增加^[27]。(2) 通过调查发现研究区的青杨生长状况最好, 植株胸径较粗, 树体高大, 林下植被丰富, 因此其积累有机物量最多。本研究的人工林地与农田和草地全磷含量差异部分显著但规律不明显, 这与张萍、朱秋莲等^[29-30]研究一致。这可能是由于 P 主要来自于岩石的风化和淋溶作用, 受土壤母质影响较大, 而且 P 易

形成具有沉积性的矿物质, 不利于在土壤中迁移^[30]。因此本研究中不同退耕方式对土壤全磷的影响不显著。

此外, 本研究中不同植被类型的土壤 C、N、P 养分含量均随土层深度增加而降低, 这与大部分的研究结果一致, 这主要是因为植物归还的养分主要积累在土壤表层, 退耕后人为翻动消失, 地表以下土壤获得有机物的含量逐渐减少, 同时植物根系随着土壤深度的增加生物量逐渐减少^[31], 进入土壤的根系残体减少, 同时根系也会消耗地表以下的土壤有机物, 因此土壤养分会随土层深度的增加而降低^[26]。

4.2 不同植被类型对土壤生态化学计量的影响

土壤的 C、N、P 生态化学计量是通过土壤中有有机碳、全氮和全磷含量的计算得到, 若某元素含量变化必将引起比值变化^[11]。本文通过相关性分析表明, 研究区土壤的有机碳与全氮相关性关系最紧密, 说明土壤中 C、N 对不同退耕方式的响应是一致的。全氮与土壤 C:N 和 N:P 相关性最紧密, 有机碳与土壤 C:P 相关性最紧密, 说明研究区不同植被类型土壤的 C:N 和 N:P 主要受全氮的影响, C:P 主要受有机碳的影响。本研究结果表明, 农田退耕成人工林地后土壤的 C:N 降低, 土壤的 C:P 和 N:P 升高, 这与 Liu 等^[32]和王建林等^[33]的研究结果一致。这是因为农田退耕成人工林地后土壤的有机碳和全氮含量增加, 由于土壤 C:N 和 N:P 受全氮的影响较大, 因此退耕后土壤的 C:N 降低, N:P 比升高; 因为 C:P 受有机碳的影响较大, 因此退耕后土壤的 C:P 升高。在不同的人工林类型中, 青杨林土壤表层的 C:N、C:P 和 N:P 变化显著, 是因为青杨林表土层积累的有机碳、全氮含量较高, 土壤化学计量受有机碳和全氮影响较大, 这提高了青杨林表土层的生态化学计量比(C:N、C:P 和 N:P)。

本研究结果表明青杨的 C:N、C:P、N:P 均随土壤深度的增加而下降, 其他植被类型的生态化学计量随土壤深度的变化趋势不显著。这可能是因为其他植被类型的有机碳、全氮和全磷在不同土壤深度

的变异很大。

5 结 论

(1)黄土高寒区不同人工林土壤 C、N 含量差异显著($P < 0.05$), P 含量差异部分显著。各土层的有机碳和全氮含量表现为人工林地高于草地和农田($P < 0.05$);在各人工林类型中,青杨在 0~20 cm 表土层的有机碳、全氮含量增加显著,分别为 25.82、2.17 g/kg。说明青杨林更有利于表土层的养分积累。

(2)黄土高寒区不同人工林土壤生态化学计量有显著差异($P < 0.05$), 0~60 cm 土层中人工林地的 C:N 低于农田, C:P 和 N:P 高于草地和农田($P < 0.05$);在各人工林类型中,青杨在 0~20 cm 表土层的生态化学计量比其他人工林类型高, C:N、C:P 和 N:P 分别为 11.99、43.27 和 3.64。说明青杨林对表层土壤的生态化学计量影响最大。

(3)相关性分析表明,研究区土壤的有机碳与全氮相关性最紧密($P < 0.01$),全氮与土壤 C:N 和 N:P 相关性最紧密($P < 0.01$),有机碳与土壤 C:P 相关性最紧密($P < 0.01$)。说明土壤 C、N 对不同退耕方式的响应具有一致性,研究区不同植被类型土壤的 C:N 和 N:P 主要受全氮的影响, C:P 主要受有机碳的影响。

(4)在 0~60 cm 土层中,黄土高寒区不同植被类型土壤 C、N、P 含量均随土壤深度的增加而降低;土壤生态化学计量(C:N、C:P 和 N:P)除青杨随土壤深度的增加而下降外,其他植被类型无显著变化趋势。说明人工林对表层土壤养分的改良效果最好。

参 考 文 献

- [1] 洗伟光,周丽,唐洪辉,等.不同林龄针阔混交林土壤生态化学计量特征[J].广东林业科技,2015,31(1):1-6.
Xian W G, Zhou L, Tang H H, et al. Soil ecological stoichiometry of conifer-broadleaved plantations of different age in southern subtropical region[J]. Guangdong Forestry Science and Technology, 2015, 31(1): 1-6.
- [2] 张光德,赵传燕,戎战磊,等.祁连山中部不同植被类型土壤生态化学计量特征研究[J].兰州大学学报(自然科学版),2019,55(4):533-540.
Zhang G D, Zhao C Y, Rong Z L, et al. Ecological stoichiometry of soils with different vegetation types in the middle part of the Qilian Mountains[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2019, 55(4): 533-540.
- [3] 王璐,喻阳华,邢容容,等.喀斯特高原山地区主要人工林土壤生态化学计量特征[J].南方农业学报,2017,48(8):1388-1394.
Wang L, Yu Y H, Xing R R, et al. Ecological stoichiometry characteristics of soils from main plantations in karst plateau mountainous area[J]. Journal of Southern Agriculture, 2017, 48(8): 1388-1394.
- [4] Zhao F, Kang D, Han X, et al. Soil stoichiometry and carbon storage in long-term afforestation soil affected by understory vegetation diversity[J]. Ecological Engineering, 2015, 74: 415-422.
- [5] 庞圣江,张培,贾宏炎,等.桂西北不同森林类型土壤生态化学计量特征[J].中国农学通报,2015,31(1):17-23.
Pang S J, Zhang P, Jia H Y, et al. Research on soil ecological stoichiometry under different forest types in Northwest Guangxi[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(1): 17-23.
- [6] Tian H, Chen G, Zhang C, et al. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry, 2009, 98(1-3): 139-151.
- [7] 吴建平.黄土丘陵区典型退耕植被土壤化学计量特征[D].杨凌:西北农林科技大学,2016.
Wu J P. Soil stoichiometry under conversion of grain to green program in loess hilly region[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016.
- [8] 赵佰礼,穆兴民,高鹏,等.黄土丘陵区沟壑区不同退耕草地土壤水分研究[J].水土保持研究,2019,26(4):111-115.
Zhao B L, Mu X M, Gao P, et al. Study on soil moisture in two returning farm-land patterns in gully and hilly region of the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(4): 111-115.
- [9] 刘晶,徐少君,刘丽芬.不同退耕方式对豫西黄土丘陵区土壤颗粒有机碳含量的影响[J].河南农业科学,2015,44(5):72-76.
Liu J, Xu S J, Liu L F. Effect of different reforestation patterns on soil particulate organic carbon content in loess hilly region of western Henan[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2015, 44(5): 72-76.
- [10] 陈青松,李婷,张世熔,等.城乡交错带土壤氮素空间分布及其影响因素[J].生态学报,2016,36(8):2133-2141.
Chen Q S, Li T, Zhang S R, et al. Spatial distribution of soil nitrogen in an urban-rural fringe and its influencing factors[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(8): 2133-2141.
- [11] 邢丹,肖玖军,王晓红,等.石漠化区退耕植桑地土壤养分与生态化学计量特征[J].西南农业学报,2018,31(7):1436-1443.
Xing D, Xiao J J, Wang X H, et al. Nutrients and ecological stoichiometry characteristics of soil from returning farmland to mulberry field in stony desertification area[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2018, 31(7): 1436-1443.
- [12] 陈鹏,郭建英,董智,等.达拉特旗砒砂岩裸露区退耕还林土壤生态化学计量分布[J].中国水土保持科学,2020,18(1):25-34.
Chen P, Guo J Y, Dong Z, et al. Eco-stoichiometric distribution of soil under grain for Green Project in Pisha sandstone exposed area of Dalad banner[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(1): 25-34.
- [13] 梁爱华,韩新辉,张扬,等.纸坊沟流域退化土壤碳氮关系对植被恢复的时空响应[J].草地学报,2013,21(5):842-849.
Liang A H, Han X H, Zhang Y, et al. Spatio-temporal response of soil carbon and nitrogen relation to the process of vegetation restoration in the gully region of Loess Plateau[J]. Acta Agrestia

- Sinica, 2013, 21(5): 842–849.
- [14] Li C, Zhao L, Sun P, et al. Deep soil C, N, and P stocks and stoichiometry in response to land use patterns in the loess hilly region of China[J]. *PLoS ONE*, 2016, 11(7): e0159075.
- [15] Fu B, Chen L, Ma K, et al. The relationships between land use and soil conditions in the hilly area of the Loess Plateau in northern Shaanxi, China[J]. *Catena*, 2000, 39(1): 69–78.
- [16] 王莉, 林莎, 李远航, 等. 青海大通不同林地类型林下植被与土壤水分的关系[J]. *中国水土保持科学*, 2019, 17(5): 25–35.
- Wang L, Lin S, Li Y H, et al. Relationship between understory vegetation and soil moisture in different forest types in Datong, Qinghai Province[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019, 17(5): 25–35.
- [17] Fu B J, Wang S, Liu Y, et al. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017, 45: 223–243.
- [18] 林莎, 贺康宁, 王莉, 等. 基于地统计学的黄土高寒区典型林地土壤水分盈亏状况研究[J]. *生态学报*, 2020, 40(2): 728–737.
- Lin S, He K N, Wang L, et al. Soil moisture surplus and loss of typical forestland in loess alpine area by the geostatistical analyst method[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(2): 728–737.
- [19] 刘若莎, 王冬梅, 李平, 等. 青海高寒区典型人工林植物多样性、地上生物量特征及其相关性[J]. *生态学报*, 2020, 40(2): 692–700.
- Liu R S, Wang D M, Li P, et al. Plant diversity, ground biomass characteristics and their relationships of typical plantations in the alpine region of Qinghai[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(2): 692–700.
- [20] 刘凯, 贺康宁, 王先棒. 青海高寒区不同密度白桦林枯落物水文效应[J]. *北京林业大学学报*, 2018, 40(1): 89–97.
- Liu K, He K N, Wang X B. Hydrological effects of litter of *Betula platyphylla* forest with different densities in alpine region, Qinghai of northwestern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2018, 40(1): 89–97.
- [21] 王志齐, 杜兰兰, 赵愷, 等. 黄土区不同退耕方式下土壤碳氮的差异及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(3): 716–722.
- Wang Z Q, Du L L, Zhao M, et al. Differences in soil organic carbon and total nitrogen and their impact factors under different restoration patterns in the Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(3): 716–722.
- [22] 李平, 王冬梅, 丁聪, 等. 黄土高寒区典型植被类型土壤入渗特征及其影响因素[J]. *生态学报*, 2020, 40(5): 1610–1620.
- Li P, Wang D M, Ding C, et al. Soil infiltration characteristics and its influencing factors of typical vegetation type in loess alpine region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(5): 1610–1620.
- [23] 刘运新, 陈之凤, 廖溪苏, 等. 大通县志[M]. 西宁: 青海人民出版社, 2020.
- Liu Y X, Chen Z F, Liao X S, et al. Datong County annals[M]. Xining: Qinghai People's Publishing House, 2020.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Bao S T. Soil agrochemical analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [25] 孙骞, 王兵, 周怀平, 等. 黄土丘陵区小流域土壤碳氮磷生态化学计量特征的空间变异性[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(3): 766–774.
- Sun Q, Wang B, Zhou H P, et al. Spatial variation of ecological stoichiometry of soil C, N and P in a small catchment of loess hilly area[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(3): 766–774.
- [26] 李柏桥, 付玉, 李光录, 等. 退耕年限与方式对土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(3): 238–244.
- Li B Q, Fu Y, Li G L, et al. Effects of age and type of conversion from cropland to forest land and grassland on stability and organic carbon in soil aggregates[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(3): 238–244.
- [27] Shi J, Cui L. Soil carbon change and its affecting factors following afforestation in China[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 98: 75–85.
- [28] Wang Q, Wang S, Huang Y. Comparisons of litterfall, litter decomposition and nutrient return in a monoculture *Cunninghamia lanceolata* and a mixed stand in southern China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255: 1210–1218.
- [29] 朱秋莲, 邢肖毅, 张宏, 等. 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 Q L, Xing X Y, Zhang H, et al. Soil ecological stoichiometry under different vegetation area on loess hilly-gully region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(15): 4674–4682.
- [30] 张萍, 章广琦, 赵一婷, 等. 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[J]. *生态学报*, 2018, 38(14): 5087–5098.
- Zhang P, Zhang G Q, Zhao Y P, et al. Ecological stoichiometry characteristics of leaf-litter-soil interactions in different forest types in the loess hilly-gully region of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(14): 5087–5098.
- [31] 李俊超, 郭胜利, 党廷辉, 等. 黄土丘陵区不同退耕方式土壤有机碳密度的差异及其空间变化[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(6): 1167–1173.
- Li J C, Guo S L, Dang T H, et al. Spatial variations in soil organic carbon density under different restoration practices in loess hilly-gully region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(6): 1167–1173.
- [32] Liu X, Ma J, Ma Z W, et al. Soil nutrient contents and stoichiometry as affected by land-use in an agro-pastoral region of northwest China[J]. *Catena*, 2017, 150: 146–153.
- [33] 王建林, 钟志明, 王忠红, 等. 青藏高原高寒草原生态系统土壤碳氮比的分布特征[J]. *生态学报*, 2014, 34(22): 6678–6691.
- Wang J L, Zhong Z M, Wang Z H, et al. Soil C/N distribution characteristics of alpine steppe ecosystem in Qinghai Tibetan Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(22): 6678–6691.

(责任编辑 范娟 孟瑶
责任编辑 孙向阳)