

DOI: 10.5846/stxb201601200136

赵俊峰, 肖礼, 安韶山, 方瑛, 马任甜, 黄懿梅. 永利煤矿复垦区植物叶片和枯落物生态化学计量学特征. 生态学报, 2017, 37(9): 3036–3045.

Zhao J F, Xiao L, An S S, Fang Y, Ma R T, Huang Y M. Ecological stoichiometry characteristics of leaves and litter in plant communities in the Yongli colliery reclamation area. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(9): 3036–3045.

永利煤矿复垦区植物叶片和枯落物生态化学计量学特征

赵俊峰¹, 肖礼¹, 安韶山^{1,2}, 方瑛¹, 马任甜¹, 黄懿梅^{1,*}

¹ 西北农林科技大学资源环境学院, 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室 杨凌 712100

² 西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室 杨凌 712100

摘要: 为了明确煤矿复垦区植被恢复与重建以及不同物种的合理配置, 以内蒙古永利露天煤矿复垦区不同植物群落叶片和枯落物为研究对象, 通过对其碳(C)、氮(N)、磷(P)、钾(K)含量(质量含量)及生态化学计量学特征的研究, 探讨煤矿复垦区植物养分状况及限制因子, 同时研究叶片和枯落物之间的养分循环状况。结果表明: ①不同植物类型叶片 C 含量变化较大, 表现为乔木(侧柏 537.96 g/kg)最大, 草本(沙打旺 423.73 g/kg)最小; N、P、K 含量变化较小。枯落物中沙棘 C 含量(417.84 g/kg)显著高于沙打旺、柠条; N、P 含量差异显著, 氮含量表现为沙打旺(20.30 g/kg)最大, 柠条最小, 磷含量表现为沙打旺(1.57 g/kg)最大, 沙棘最小; 沙打旺 K 含量(6.31 g/kg)显著高于沙棘、柠条。叶片 C、N、P、K 含量高于枯落物。N、P、K 的回收率分别为 5.17%—50.16%、4.19%—6.41%、11.27%—23.24%, 其中 P 回流率表现为沙打旺(6.41%)最大, 柠条最小; K 回流率表现为沙棘(23.24%)最大, 柠条最小。②灌木、草本植物 N/P>16, 乔木类 N/P<14, 灌木类、草本类生长受制于 P, 乔木类生长受制于 N。结合土壤 C、N、P 含量, 建议在植被恢复初期种植豆科等先锋植物, 随着土壤肥力的提高再逐步种植灌木、乔木。

关键词: 矿区植被恢复; 养分循环; 叶片; 枯落物; 生态化学计量学

Ecological stoichiometry characteristics of leaves and litter in plant communities in the Yongli colliery reclamation area

ZHAO Junfeng¹, XIAO Li¹, AN Shaoshan^{1,2}, FANG Ying¹, MA Rentian¹, HUANG Yimei^{1,*}

¹ Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, College of Natural Resources and Environment, Northwest Agricultural & Forestry University, Yangling 712100, China

² State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Land Farming on Loess Plateau, Institute of soil and water conservation, Northwest Agricultural & Forestry University, Yangling 712100, China

Abstract: The objective of this study was to clarify the ecological stoichiometry characteristics of leaves and litter in different plant communities in the Yongli colliery reclamation area. Leaves and litter were collected, and organic carbon (C), total nitrogen (N), total phosphorous (P), and total potassium (K) content were measured. Plant nutrient values and restriction factors for the reclamation area were determined and nutrient cycling between leaves and litter was investigated. The results indicated that: (1) There were significant differences in leaf C content among the different plant types. C content was the highest in shrubs (*Platycladus orientalis* (L.) Franco, 537.96 g/kg) and the lowest in herbs (*Astragalus adsurgens* Pall., 423.73 g/kg). Leaf N, P, and K content did not differ significantly between plant types. In contrast, there were significant differences between plant types for the N and P content of the litter. C content was

基金项目: 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-13); 国家自然科学基金面上项目(41171226); 教育部新世纪优秀人才(NCET-2-0479)

收稿日期: 2016-01-20; 网络出版日期: 2016-12-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ymhuang1971@nwsuaf.edu.cn

<http://www.ecologica.cn>

significantly higher in *Hippophae rhamnoides* Linn. (417.84 g/kg) than in *A. adsurgens* and *Caragana korshinskii* Kom. N content was the highest in *A. adsurgens* (20.30 g/kg) and the lowest in *C. korshinskii*, whereas P content was the highest in *A. adsurgens* (1.57 g/kg) and the lowest in *H. rhamnoides*. K content was significantly higher in *A. adsurgens* (6.31 g/kg) than in *H. rhamnoides* and *C. korshinskii*. C, N, P, and K content were higher in the leaves than in the litter. The resorption efficiencies of N, P, and K was in the range of 5.17—50.16%, 4.19—6.41%, and 11.27—23.24%, respectively. N resorption was significantly higher in *H. rhamnoides* than in *C. korshinskii* and *A. adsurgens*, P resorption was the highest in *A. adsurgens* and the lowest in *C. korshinskii*, and K resorption was the highest in *H. rhamnoides* (23.24%) and the lowest in *C. korshinskii*; and (2) Shrubs and herbs had an N/P ratio >16. This finding indicates that the growth of these plants was primarily limited by P. In contrast, macrophanerophytes had an N/P ratio <14, which indicates that growth was primarily limited by N. Combined with C, N, and P content in the soil, leguminous plants should be planted in the early stage of vegetation restoration, followed by shrubs or macrophanerophytes.

Key Words: vegetation restoration; nutrient cycling; leaf; litter; ecological stoichiometry

生态化学计量学(ecological stoichiometry) 是分析多种化学元素在生态系统中相互作用平衡的一门新兴学科^[1], 主要研究生态系统中化学元素的组成、相互作用和过程的平衡^[2], 同时涉及能量的变化、平衡, 并分析这种平衡对生态系统的影响^[3]。从生物学角度, 碳(C)、氮(N)和磷(P)是3种主要化学元素, 同时是植物的物质基础, 三者之间的比例能够显著反映重要生态过程(如枯落物分解)^[4-5]。在植物的个体水平上, C、N、P等营养元素之间的相互作用以及与外界环境的关系共同决定着植物的生长发育过程和营养水平^[6]。C/N和C/P代表植物吸收C的能力^[7], N/P能反映土壤养分和植物营养需求之间的动态平衡^[8]。植物N/P营养限制理论被广泛接受, 并用于不同生态系统研究^[9]。在陆地生态系统中生态化学计量研究取得了较大进展^[10]。陆地植物N、P含量及N/P化学计量特征及其影响因素已成为生态学的研究热点^[11]。较大地域尺度^[12]、不同区域^[13]、不同植物功能群^[14]、不同植物生长阶段^[15]化学计量特征有较多研究, 但由于研究尺度、环境的不同造成结果差异很大。同时生态系统各组分养分循环规律研究尚显不足^[16], 也鲜见关于钾(K)的限制的研究^[17]。枯落物是生态系统的重要组分, 有着重要的生态功能^[18]。研究叶片-枯落物的生态化学计量学特征对于揭示生态系统各组分之间的养分循环规律, 阐明系统的稳定性以及促进生态化学计量学理论的发展具有重要的意义^[19]。

矿山废弃地是一类特殊的退化生态系统, 国内外开展了大量的修复研究与实践工作, 针对不同种类废弃地的不同退化机制和性质, 采取的修复及重建措施也不相同^[20]。但目前对生态系统脆弱的半干旱地区的研究与实践较少, 对于废弃地与植物的相互关系还不了解, 对于矿山废弃地地上植物与枯落物的养分限制关系的研究很少^[21]。而生态化学计量学可以用于指导矿山废弃地生态恢复^[22]。因此本研究以永利露天煤矿复垦区不同层次植被叶片与枯落物作为研究对象, 运用生态化学计量学手段, 研究不同植被类型的叶片与枯落物的养分变化以及相互关系, 探讨不同植被类型在矿山废弃地中的限制因子, 为理解叶片和枯落物养分循环状况提供理论支撑, 为该复垦区植物的选择及复垦效果评价提供科学合理的建议与参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

永利煤矿(110°12'E, 39°43'N)位于鄂尔多斯市准格尔旗乌兰哈达乡哈拉庆沟与贾明沟的区域, 现井田面积为3.567 km², 系露天开采A类煤矿。海拔1324—1423 m。属于典型的中温带半干旱大陆性气候, 干旱少雨, 常年平均温度7℃, 年积温3000℃, 年日照都在3000 h以上, 全年降水量约为380 mm。

矿区属于中部丘陵沟壑砂岩区, 位于准格尔旗西部, 是由3世纪上统砂质泥岩, 中统的含砾砂岩, 泥质粉砂岩和棕红色砂质泥岩、砂砾砂岩构成。植被特点为抗旱、抗贫瘠、生长缓慢、种类单纯。本研究所选试验

地为排土场,排土场复垦都采用未经熟化的深层黄土,复垦年限 5—10a,复垦方式是在不同区域人工栽植乔木(主要树种是油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)、侧柏(*Platycladus orientalis* (L.) Franco)等)、灌木(主要是酸刺(*Hippophae rhamnoides* Linn)、柠条(*Caragana Korshinskii* Kom.)等)、草本(主要是沙打旺(*Astragalus adsurgens* Pall.)、苜蓿(*Medicago*)等),不同生活型相互区分以便于比较恢复效果。

1.2 样品采集

2013 年 9 月在内蒙古准格尔旗永利煤矿复垦区采集植物叶片、枯落物和土样样品。植物样采集根据植被恢复中栽种的主要植物,选取样地 9 块(表 1),每块样地随机设置 3 个样方,样方间距 100 m,样方大小为草本样方 1 m×1 m,灌木样方 5 m×5 m,乔木样方 10 m×10 m,首先选择乔木样方,在乔木样方内选择灌木样方、在灌木样方内选择草本样方。在样方内根据生活型(表 2)选取植物群落中优势物种的代表性样株,根据不同方位、层次剪取单一物种叶片。在样方内多点收集单一物种枯落物(新鲜凋落物),每种植物收集到的枯落物混匀,枯落物只收集到沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)、沙打旺(*Astragalus adsurgens* Pall.)、柠条 3 种植物。采集的植物叶片质量大约为 300 g 左右,叶片于 105℃ 下杀青 15 min,然后 65℃ 烘干至恒重。土样采用“S”形布点采样法,多点混合取样,依次在选定的 9 块样地里采集 0—10 cm,10—20 cm 混合样土壤样品。

表 1 采样点信息

Table 1 The information of sampling points

序号 Serial number	植物群落 Plant communities	地理位置 Location	海拔 Elevation/m
1	沙打旺+油松+侧柏(伴有少量沙棘柠条苜蓿)	39°41'49.21"N,110°17'3.38"E	1402
2	沙棘+沙打旺	39°41'52.11"N,110°16'54.97"E	1402
3	沙打旺+苜蓿	39°41'59.43"N,110°16'59.83"E	1406
4	沙打旺	39°41'58.24"N,110°17'18.54"E	1405
5	苜蓿+沙打旺	39°41'57.09"N,110°16'32.18"E	1397
6	沙打旺	39°41'20.03"N,110°14'48.16"E	1422
7	沙棘	39°41'41.88"N,110°14'42.12"E	1429
8	沙棘+沙打旺	39°41'23.31"N,110°16'5.95"E	1413
9	苜蓿+沙棘	39°41'20.78"N,110°16'10.48"E	1403

表 2 采集的植物物种

Table 2 Species lists of collected plants

植物种 Species	生活型 Life form	科 Family
沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i> Linn.	灌木	胡颓子科
柠条 <i>Caragana Korshinskii</i> Kom.	灌木	豆科
沙打旺 <i>Astragalus adsurgens</i> Pall.	多年生草本	豆科
苜蓿 <i>Medicago</i>	多年生草本	豆科
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i> (L.) Franco	乔木	柏科
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i> Carr.	乔木	松科

1.3 样品测定

用粉碎机将植物叶片以及叶片枯落物粉碎成 0.15 mm 的粉末后测定其全碳、全氮、全磷、全钾。植物叶片与枯落物的全碳用重铬酸钾外加热法测定;全氮、全磷、全钾采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,消煮液分别用凯氏法测定全氮(KDY-9830)、钒钼黄比色法测定全磷(UV-2450)、火焰光度法测定全钾^[23]。

凋落物养分回收能力用养分回收率(*R*)表示,可以将其定义为:在秋季来临时,正常生长器官养分含量与凋落物中养分含量的差值,即凋落物在凋落前转移养分的量。养分回收率可按下式计算:

$$R = \frac{T_{\text{叶}} - T_{\text{枯}}}{T_{\text{叶}}} \times 100\%$$

<http://www.ecologica.cn>

式中 R 为养分回收率(%) ; $T_{\text{叶}}$ 为正常生长叶片中养分含量(g/kg) ; $T_{\text{枯}}$ 为凋落物中养分含量(g/kg) 。

土壤全碳采用重铬酸钾外加热法测定; 全氮采用凯氏定氮法(KDY-9830) 测定; 全磷采用高氯酸-硫酸消解钼锑抗比色法(UV-2450) 测定^[23]。

1.4 数据处理方法

采用 SPSS 20.0 统计分析软件对数据进行相关性分析、单因素方差分析(One-Way ANOVA) 以及多重比较, 运用 Excel 2013 进行数据处理, 运用 Origin9.0 作图。

2 结果与分析

2.1 不同植物叶片和凋落物 C、N、P、K 含量变化

由表 3 可以看出, 不同植物叶片 C 含量变化为 423.73—537.96 g/kg, 平均值为 483.16 g/kg, 变异系数为 10.04%; N 含量变化范围为 15.96—29.01 g/kg, 均值为 23.36 g/kg, 变异系数为 21.18%; P 含量变化范围为 1.13—1.94 g/kg, 均值为 1.43 g/kg, 变异系数为 20.22%; K 含量变化范围为 5.18—10.52 g/kg, 均值为 7.93 g/kg, 变异系数为 25.54%。

从整体来看, 植物叶片 C 含量表现为侧柏最大, 沙打旺最小, 沙棘、柠条、侧柏、油松显著高于沙打旺、苜蓿($P < 0.05$); N 含量表现为沙棘最大, 油松最小; P 含量表现为侧柏最大, 柠条最小; N、P 含量在不同植物叶片中差异不显著。K 含量表现为苜蓿最大, 油松最小, 苜蓿显著高于油松。

表 3 不同植物叶片 C、N、P、K 含量
Table 3 Nutrient contents in leaf under different plant

植物 Plants	总碳 Total C/(g/kg)	总氮 Total N/(g/kg)	总磷 Total P/(g/kg)	总钾 Total K/(g/kg)
沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i> Linn.	492.28±20.89a	29.01±8.56a	1.44±0.59a	6.88±0.63ab
柠条 <i>Caragana Korshinskii</i> Kom.	502.49±2.99a	27.01±3.43a	1.13±0.10a	10.06±0.86ab
沙打旺 <i>Astragalus adsurgens</i> Pall.	423.73±32.98b	21.93±7.02a	1.40±1.10a	7.78±2.80ab
苜蓿 <i>Medicago</i>	424.32±36.89b	26.32±10.10a	1.18±0.48a	10.52±4.71a
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i> (L.) Franco	537.96±11.65a	19.95±0.08a	1.94±0.01a	7.16±0.25ab
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i> Carr.	518.20±68.88a	15.96±0.16a	1.51±0.06a	5.18±0.34b

不同的小写字母代表 C、N、P、K 含量在不同植物叶片之间存在显著差异($P < 0.05$)

由表 4 可以看出, 3 种植物凋落物 C 含量的变化范围为 320.23—417.84 g/kg, 均值为 359.9 g/kg, 变异系数为 14.25%; N 含量变化范围为 15.19—20.30 g/kg, 均值为 17.53 g/kg, 变异系数为 14.74%; P 含量的变化范围为 0.96—1.57 g/kg, 均值为 1.22 g/kg, 变异系数为 25.99%; K 含量的变化范围为 3.91—6.31 g/kg, 均值为 4.85 g/kg, 变异系数为 26.43%。

凋落物 C 含量表现为沙棘最大, 柠条最小, 沙棘显著高于沙打旺、柠条($P < 0.05$); N 含量表现为沙打旺最大, 柠条最小, 沙棘、沙打旺、柠条之间差异显著($P < 0.05$); P 含量表现为沙打旺最大, 沙棘最小, 沙棘、沙打旺、柠条之间差异显著($P < 0.05$); K 含量表现为沙打旺最大, 沙棘最小, 沙打旺显著高于沙棘、柠条($P < 0.05$) 。

表 4 不同植物凋落物 C、N、P、K 含量
Table 4 Nutrient contents in litter under different plant

植物 Plants	总碳 Total C/(g/kg)	总氮 Total N/(g/kg)	总磷 Total P/(g/kg)	总钾 Total K/(g/kg)
沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i> Linn.	417.84±29.01b	17.09±7.52b	0.96±0.73a	3.91±2.28a
沙打旺 <i>Astragalus adsurgens</i> Pall.	341.64±32.41a	20.30±5.69c	1.57±0.67c	6.31±1.94b
柠条 <i>Caragana Korshinskii</i> Kom.	320.23±2.28a	15.19±2.051a	1.12±0.12b	4.33±0.67a

不同的小写字母代表 C、N、P、K 含量在不同植物凋落物之间存在显著差异($P < 0.05$)

2.2 不同植物叶片和凋落物的生态化学计量学特征

由图 1 可以看出, 不同植物叶片的生态化学计量学特征 C/N、C/P、N/P 的变化范围为 18.32—32.44、

276.18—457.54、10.24—22.53、除 C/N 比值外，C/K、N/K、P/K 的变化范围分别为 46.10—100.57、2.57—4.64、0.11—0.29。C/N 表现为油松最大，苜蓿最小，油松显著高于苜蓿、沙棘、柠条；C/P 表现为沙打旺最大，侧柏最小，侧柏显著低于苜蓿、沙打旺、沙棘、柠条(草本类、灌木类)；N/P 表现为柠条最大，侧柏最小，乔木类显著低于灌木、草本类。C/K 表现为油松最大，苜蓿最小，沙棘、油松显著大于苜蓿、沙棘、柠条；N/K 表现为沙棘最大，苜蓿最小，沙棘显著高于其他植物；P/K 表现为油松最大，柠条最小，侧柏、油松显著高于沙打旺、沙棘，沙打旺、沙棘显著高于苜蓿、柠条。

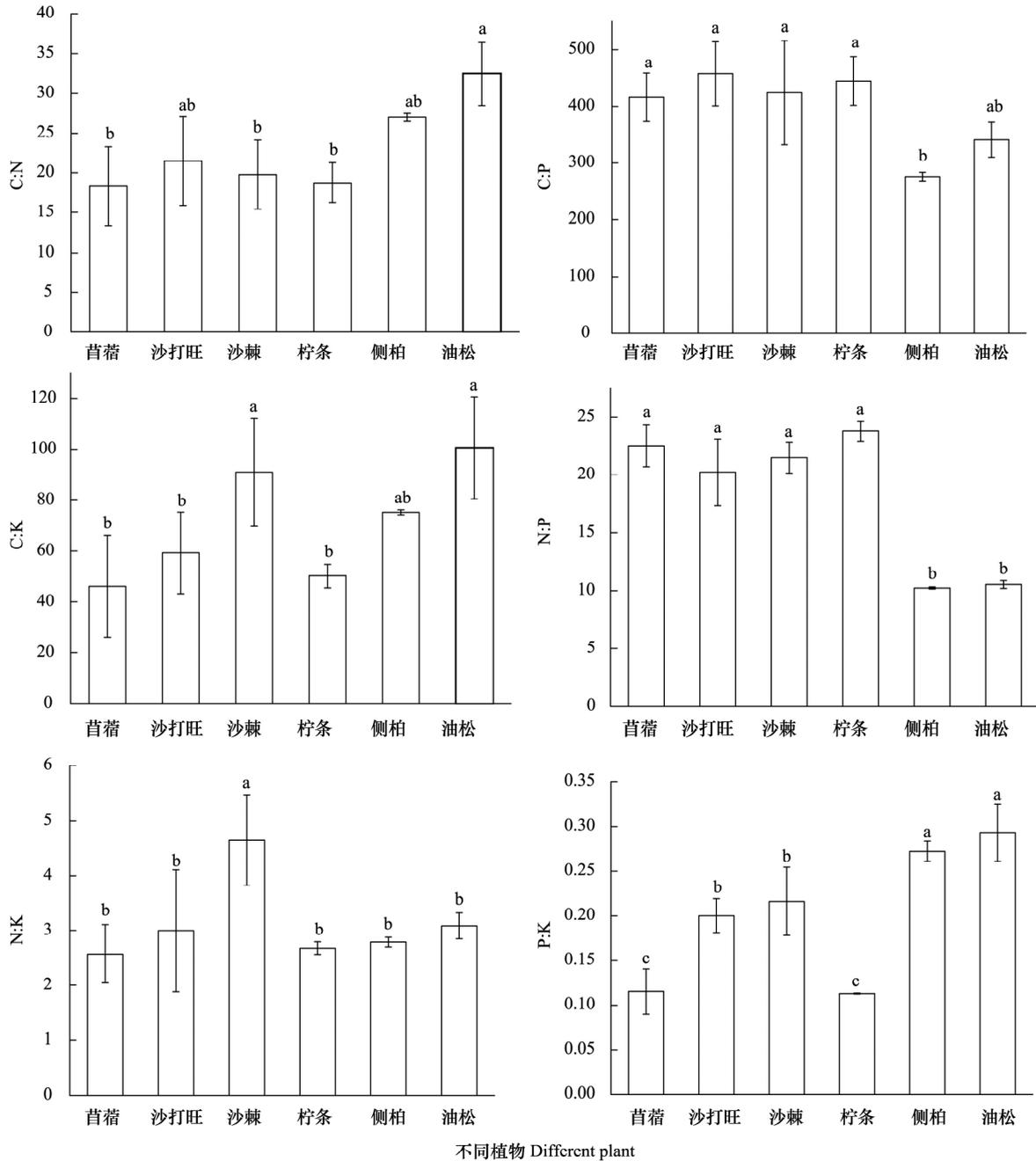


图 1 不同植物叶片生态化学计量学特征

Fig.1 The characteristics of ecological stoichiometry in leaf under different plant

不同的小写字母代表 C:N:P:K 在不同植物叶片之间存在显著差异 ($P < 0.05$)

由图 2 可以看出，植物枯落物的生态化学计量学特征 N/P 表现为沙棘>沙打旺>柠条，N/P 变化范围为

12.80—17.28; P/K、N/K、C/P、C/N、C/K 的变化范围分别为 0.21—0.29、2.73—4.70、236.63—632.67、18.49—31.08、50.52—148.38 表现为沙打旺>沙棘>柠条。在不同植物群落下枯落物 C/P、C/N、C/K 表现为沙棘显著高于沙打旺、柠条。N/P、P/K、N/K 差异不显著。

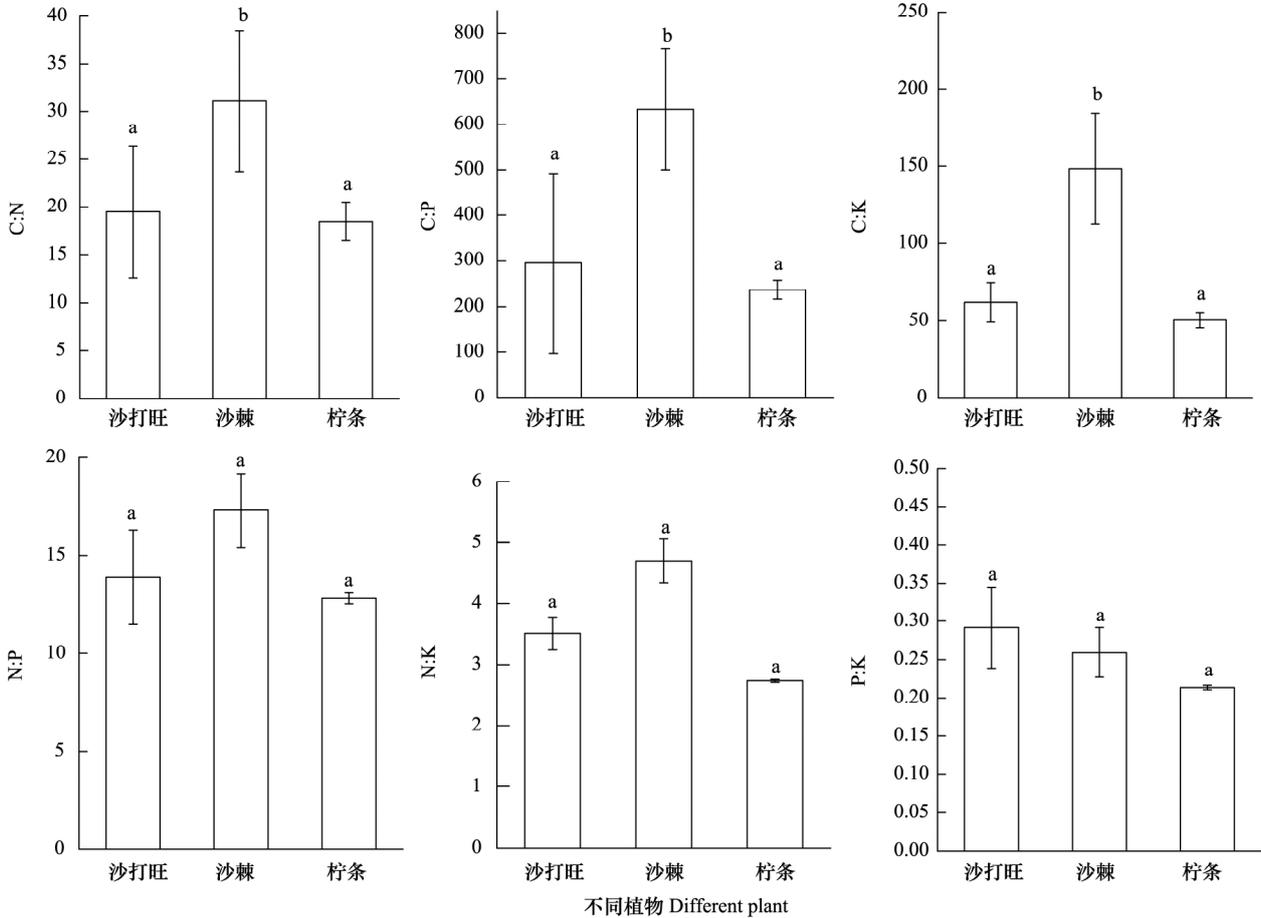


图 2 不同植物枯落物生态化学计量学特征

Fig.2 The characteristics of ecological stoichiometry in litter under different plan

不同的小写字母代表 C : N : P : K 在不同植物枯落物之间存在显著差异 (P<0.05)

由图 3 可以看出 9 月份养分回收率 ,N 回收率变化范围是 5.17—50.16% ,表现为沙棘>柠条>沙打旺。P 回收率变化范围 4.19%—6.41% ,表现为沙打旺>沙棘>柠条。K 回收率 11.27%—23.24% ,表现为沙棘>沙打旺>柠条。

2.3 植物叶片和枯落物 C、N、P、K 含量与生态化学计量学特征的关系

由表 5 可以看出 植物叶片 C 含量只与 C/K 比值呈极显著正相关 ,与其他比值均呈负相关 ,但相关性不显著; 植物叶片碳含量与 C/P、C/K 比值呈负相关 ,且相关性极显著 (P<0.01) ; 植物叶片 P 含量与 C/N 比值呈极显著负相关关系 ,与 N/K 呈极显著的正相关 (P<0.01) ; 植物叶片 K 含量与 C/N 呈极显著负相关 (P<0.01) 。

由表 6 可以看出 植物枯落物 C 含量与 N/P、N/K 呈显著相关 (P<0.05) ,与其他比值均呈负相关; 枯落物 N 含量与 C/P、C/K 呈极显著负相关 (P<0.01) ,与其他比值均呈负相关; 枯落物 P 含量与 C/N、C/K 呈极显著负相关 (P<0.01) ; 枯落物 K 含量与各比值之间均呈负相关 ,其中与 C/N、C/P 呈极显著的负相关 (P<0.01) 。

3 讨论

3.1 不同植物叶片和枯落物 C、N、P、K 含量变化

本研究中草本类植物叶片 C 含量不仅远低于乔木和灌木植物叶片碳含量,更是低于全球植物叶片平均 C 含量(464 g/kg)。主要是由于不同植物对环境的适应策略不同所导致,叶片 C 含量高,光合速率较低,生长较为缓慢,而抗逆性相对较强^[24]。灌木和草本植物叶片 N 含量均略高于我国植物叶片 N 含量(20.2 g/kg)^[25]而乔木略低于该值。这与已有草本、灌木和乔木植物比较,叶片氮含量较高的研究结果较为一致^[26],即寿命短的快速生长的物种的叶片 N 含量高于寿命长的生长相对较慢的物种^[27]。灌木和草本植物叶片 P 含量略低于植物叶片的平均 P 含量(1.5 g/kg)^[28]而乔木类略高于该值。不同植物叶片 N、P 含量表现出差异可能是由于不同类型植物吸收养分的种类、数量以及对养分的利用效率均存在差异^[29],也证明了不同生活型植物对资源利用的不同^[30]。

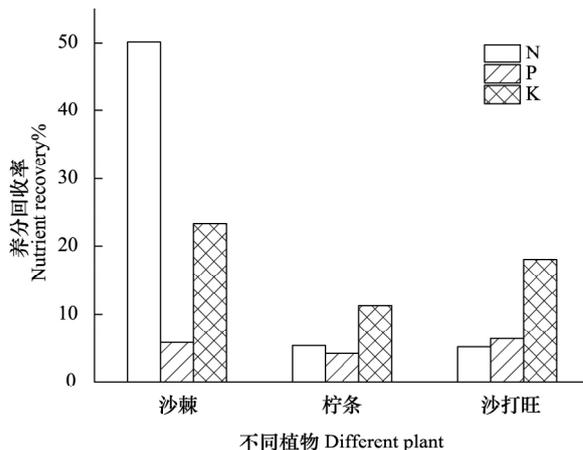


图 3 不同植物叶片变成枯落物 N、P、K 养分回收率
Fig. 3 Nutrients resorption efficiencies in leaf and litter of different plant communities

表 5 植物叶片 C、N、P、K 含量与生态化学计量学特征相关性分析

Table 5 Pearson correlations between C、N、P、K nutrient and the characteristics of ecological stoichiometry in leaf under different plant

项目 Items	总碳 Total C	总氮 Total N	总磷 Total P	总钾 Total K	碳氮比 C/N	碳磷比 C/P	碳钾比 C/K	氮磷比 N/P	氮钾比 N/K	磷钾比 P/K
总碳 Total C	1.000	-0.104	-0.180	-0.254	0	0.052	0.548**	-0.089	0.219	-0.036
总氮 Total N		1.000	0.533**	0.571**	-0.937**	-0.758**	-0.461**	0	0.348*	0.210
总磷 Total P			1	0.062	-0.526**	-0.879**	-0.139	-0.783**	0.418**	0.870**
总钾 Total K				1	-0.535**	-0.291	-0.854**	0.283	-0.540**	-0.402*
碳氮比 C/N					1	0.715**	0.552**	-0.052	-0.32	-0.219
碳磷比 C/P						1	0.267	0.621**	-0.389*	-0.646**
碳钾比 C/K							1	-0.231	0.580**	0.315
氮磷比 N/P								1	-0.284	-0.820**
氮钾比 N/K									1	0.657**
磷钾比 P/K										1

** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关,* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关

表 6 植物枯落物 C、N、P、K 含量与生态化学计量学特征相关性分析

Table 6 Pearson correlations between C、N、P、K nutrient and the characteristics of ecological stoichiometry in litter under different plant

项目 Items	总碳 Total C	总氮 Total N	总磷 Total P	总钾 Total K	碳氮比 C/N	碳磷比 C/P	碳钾比 C/K	氮磷比 N/P	氮钾比 N/K	磷钾比 P/K
总碳 Total C	1	-0.445	-0.653**	-0.702**	0.612**	0.667**	0.758**	0.520*	0.589*	-0.144
总氮 Total N		1	0.867**	0.708**	-0.821**	-0.616**	-0.656**	-0.267	-0.017	0.245
总磷 Total P			1	0.688**	-0.668**	-0.785**	-0.633**	-0.605**	-0.224	0.559*
总钾 Total K				1	-0.708**	-0.694**	-0.879**	-0.444	-0.664**	-0.125
碳氮比 C/N					1	0.612**	0.875**	0.172	0.164	0.052
碳磷比 C/P						1	0.777**	0.858**	0.576*	-0.443
碳钾比 C/K							1	0.463	0.616**	0.119
氮磷比 N/P								1	0.657**	-0.0560*
氮钾比 N/K									1	0.182
磷钾比 P/K										1

研究结果显示,不同植物叶片 C、N、P、K 含量高于枯落物,这可能是由于老化凋落的植物组织即枯落物在老化前会将部分养分转移到新鲜组织当中去,实现了养分的再吸收利用^[31]。比较植物叶片与枯落物 C、N、P、K 含量可以揭示生态系统各组分之间的养分循环规律。本研究中不同植物类型 N、P、K 回收率差异较大(图 3),沙棘中 N 的回收率明显高于其他植物。对于相同生活型养分回收率也表现出较大的不同,说明本研究中生活型不是影响养分回流的主要因素。K 决定了植物的耐旱性,在植物水分竞争中起着重要的作用^[29]。本研究中 K 的回收率普遍低于李鑫等^[29](3 种植物类型 K 回收率均超过 60%)的研究结果。这可能由于不同研究区域水分状况的差异所导致的。同时本研究采样时间是 9 月份,此时叶片可能已开始转移养分,导致结果略低于最大回收率。

3.2 不同植物叶片和枯落物的生态化学计量学特征变化

植物叶片 C/N 和 C/P 代表植物吸收营养元素时所能同化 C 的能力,在一定程度上可反映植物的营养利用效率^[32]。本研究中灌木和草本 C/N 与 Elser JJ 等^[33]对全球 398 种陆生植物的测定结果相差不大,同时显著低于乔木;乔木 C/P 与郑淑霞等^[34]研究结果较为一致但显著低于草本、灌木。本研究中草本灌木 C/N 显著高于乔木,草本灌木 C/P 显著低于乔木,说明了草本、灌木与乔木的 N、P 利用效率不同,也间接说明了草本、灌木与乔木在 N、P 需求量上的较大差异。

不同生活型植物对环境的适应能力明显不同,所表现出的养分适应策略差异较大,导致乔木、灌木、禾本科植物以及非禾本科植物等生活型之间的叶片 N 含量、P 含量和 N/P 差异均达极显著水平^[35]。植物叶片的 N/P 临界比值被认为可以作为判断环境对植物生长的养分供应状况,反映环境中养分制约的重要指标^[9]。N/P<14 时,植物受到 N 元素限制,N/P>16 时,植物受到 P 元素限制,N/P 在两者之间时,则植物受 N 或 P 或 N/P 影响^[9]。不同生活型植物叶片 N 含量、P 含量差异导致灌木和草本叶片 N/P 平均值显著高于 Han 等^[25]、任书杰等^[27]报道的结果,乔木类基本相近,可能是由于矿山废弃地特殊的环境所导致的不同生活型之间的差异。在本研究中草本类(沙打旺、苜蓿)、灌木类(沙棘、柠条) N/P>16,表明草本类、灌木类生长受制于 P。乔木类侧柏、油松 N/P<14,表明乔木类生长受制于 N,这与郑淑霞等^[34] N/P 无明显差别的研究结论不一致,这可能是植被恢复初期(复垦 5—10 a)对土壤的改良作用较小引起的。

在不同植物类型下枯落物 C/P、C/N、C/K 比值表现为沙棘显著高于沙打旺、柠条,是由于沙棘枯落物碳含量远高于沙打旺、柠条引起的(如表 4)。植物生长后期 N、P 发生了不同程度的释放和迁移^[36],结合养分叶片 N/P、回流率(图 3)3 种植物枯落物 N/P 比差异不显著,说明植物对不同养分的回流能力不同。根据土壤的理化性质(表 7),永利矿区恢复土壤中 N 含量与内蒙古放牧草原土壤比较含量偏低,结合乔木生长受制于 N 的情况,说明在目前阶段不适宜栽种乔木。在矿山废弃地恢复过程中,栽种物种一般是按照草本-灌木-木本植物的顺序进行的,其中豆科植物的添加起着关键性的作用^[21]。因此建议在目前恢复阶段种植豆科植物等先锋植物,随着土壤肥力的提高再逐步种植灌木、乔木。

表 7 永利土壤 C、N、P 含量与其他研究比较

Table 7 Comparisons between soil C、N、P across Yongli Colliery reclamation area and other studies

研究区域 Study area	不同土层 Different soil layers/cm	有机碳/(g/kg) Organic carbon	总氮/(g/kg) Total N	总磷/(g/kg) Total P	数据来源 Data sources
内蒙古永利煤矿复垦区 Yongli colliery reclamation area in Inner Mongolia	0—10	5.5680±0.3968	0.249±0.108	0.421±0.021	本研究
	10—20	2.9632±0.1654	0.205±0.078	0.403±0.002	
内蒙古放牧地 Rangeland in Inner Mongolia	0—10	16.93±0.97	1.01±0.38	0.110±0.018	[37]
	10—20	11.48±1.31	0.77±0.049	0.083±0.019	

4 结论

本研究表明,1) 不同植物叶片 C、N、P、K 含量均高于枯落物,植物叶片碳含量表现为乔木类(侧柏、油松)、灌木类(沙棘、柠条)显著高于草本类(沙打旺、苜蓿)。N、P 含量在各种植物叶片中差异不显著,在枯落物中差异显著,结合各元素回流率差异,说明植物对不同养分的回流能力有所差异。2) 不同植物群落下植物叶片 N/P 比表现为灌木类(沙棘、柠条)最高,乔木类(侧柏、油松)最低。灌木类(沙棘、柠条)、草本类(沙打旺、苜蓿) N/P 比大于 16,乔木类(侧柏、油松) N/P 比小于 14,表明灌木类、草本类生长受制于 P,乔木类生长受制于 N。结合土壤的 C、N、P 含量,建议在目前恢复阶段种植豆科植物等先锋植物,随着土壤肥力的提高再逐步种植灌木、乔木。

参考文献(References):

- [1] Elser J J, Sterner R W, Galford A E, Chrzanowski T H, Findlay D L, Mills K H, Paterson M J, Stainton M P, Schindler D W. Pelagic C: N: P stoichiometry in a eutrophied lake: responses to a whole-lake food-web manipulation. *Ecosystems*, 2000, 3(3): 293-307.
- [2] Sterner R W, Elser J J. *Ecological Stoichiometry: the Biology of Elements from Molecules to the Biosphere*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 2002: 584-584.
- [3] 程滨,赵永军,张文广,安树青. 生态化学计量学研究进展. *生态学报*, 2010, 30(6): 1628-1637.
- [4] Sardans J, Rivas-Ubach A, Peñuelas J. The elemental stoichiometry of aquatic and terrestrial ecosystems and its relationships with organismic lifestyle and ecosystem structure and function: a review and perspectives. *Biogeochemistry*, 2012, 111(1/3): 1-39.
- [5] d'Annunzio R, Zeller B, Nicolas M, Dhôte J F, Saint-André L. Decomposition of European beech (*Fagus sylvatica*) litter: combining quality theory and ¹⁵N labelling experiments. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(2): 322-333.
- [6] 姚红艳,陈琴,肖冰雪. 植物生态化学计量学综述. *草业与畜牧*, 2013, (2): 48-50.
- [7] Rong Q Q, Liu J T, Cai Y P, Lu Z H, Zhao Z Z, Yue W C, Xia J B. Leaf carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of *Tamarix chinensis* Lour. in the Laizhou Bay coastal wetland, China. *Ecological Engineering*, 2015, 76: 57-65.
- [8] Von Oheimb G, Power S A, Falk K, Friedrich U, Mohamed A, Krug A, Boschatzke N, Härdtle W. N: P Ratio and the nature of nutrient limitation in *Calluna*-dominated heathlands. *Ecosystems*, 2010, 13(2): 317-327.
- [9] Koerselman W, Meuleman A F M. The vegetation N: P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation. *Journal of Applied Ecology*, 1996, 33(6): 1441-1450.
- [10] Manzoni S, Trofymow J A, Jackson R B, Porporato A. Stoichiometric controls on carbon, nitrogen, and phosphorus dynamics in decomposing litter. *Ecological Monographs*, 2010, 80(1): 89-106.
- [11] Kang H Z, Zhuang H L, Wu L L, Liu Q L, Shen G R, Berg B, Man R Z, Liu C J. Variation in leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry in *Picea abies* across Europe: an analysis based on local observations. *Forest Ecology and Management*, 2011, 261(2): 195-202.
- [12] Han W X, Fang J Y, Reich P B, Woodward F I, Wang Z H. Biogeography and variability of eleven mineral elements in plant leaves across gradients of climate, soil and plant functional type in China. *Ecology Letters*, 2011, 14(8): 788-796.
- [13] 陶冶,张元明. 古尔班通古特沙漠 4 种草本植物叶片与土壤的化学计量特征. *应用生态学报*, 2015, 26(3): 659-665.
- [14] Hall E K, Maixner F, Franklin O, Daims H, Richter A, Battin T. Linking microbial and ecosystem ecology using ecological stoichiometry: a synthesis of conceptual and empirical approaches. *Ecosystems*, 2011, 14(2): 261-273.
- [15] 吴统贵,吴明,刘丽,等. 杭州湾滨海湿地 3 种草本植物叶片 N、P 化学计量学的季节变化. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 23-28.
- [16] 俞月凤,彭晚霞,宋同清,曾馥平,王克林,文丽,范文静. 喀斯特峰丛洼地不同森林类型植物和土壤 C、N、P 化学计量特征. *应用生态学报*, 2014, 25(4): 947-954.
- [17] Hoosbeek M R, van Breemen N, Vasander H, Buttlers A, Berendse F. Potassium limits potential growth of bog vegetation under elevated atmospheric CO₂ and N deposition. *Global Change Biology*, 2002, 8: 1130-1138.
- [18] 莫菲,王彦辉,熊伟,等. 六盘山华北落叶松人工纯林枯落物储量的空间变异分析. *林业科学*, 2009, 45(9): 1-5.
- [19] 陈亚南,马露莎,张向茹,杨佳佳,安韶山. 陕西黄土高原刺槐枯落叶生态化学计量学特征. *生态学报*, 2014, 34(15): 4412-4422.
- [20] 张鸿岭,孙丽娜,孙铁珩,陈丽芳. 矿山废弃地生态修复过程中基质改良与植被重建研究进展. *生态学杂志*, 2012, 31(2): 460-467.
- [21] 李永庚,蒋高明. 矿山废弃地生态重建研究进展. *生态学报*, 2004, 24(1): 95-100.
- [22] 闫德民. 北京首云铁矿尾矿库生态恢复的植被特征分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.

- [24] 王凯博, 上官周平. 黄土丘陵区燕沟流域典型植物叶片 C、N、P 化学计量特征季节变化. 生态学报, 2011, 31(17): 4985-4991.
- [25] Han W X, Fang J Y, Guo D L, Zhang Y. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. *New Phytologist*, 2005, 168(2): 377-385.
- [26] Wright I J, Reich P B, Westoby M, Ackerly D D, Baruch Z, Bongers F, Cavender-Bares J, Chapin T, Cornelissen J H C, Diemer M, Flexas J, Garnier E, Groom P K, Gulias J, Hikosaka K, Lamont B B, Lee T, Lee W, Lusk C, Midgley J J, Navas M L, Niinemets Ü, Oleksyn J, Osada N, Poorter H, Poot P, Prior L, Pyankov V I, Roumet C, Thomas S C, Tjoelker M G, Veneklaas E J, Villar R. The worldwide leaf economics spectrum. *Nature*, 2004, 428(6985): 821-827.
- [27] 任书杰, 于贵瑞, 陶波, 王绍强. 中国东部南北样带 654 种植物叶片氮和磷的化学计量学特征研究. 环境科学, 2007, 28(12): 2665-2673.
- [28] 吴统贵, 陈步峰, 肖以华, 潘勇军, 陈勇, 萧江华. 珠江三角洲 3 种典型森林类型乔木叶片生态化学计量学. 植物生态学报, 2010, 34(1): 58-63.
- [29] 李鑫, 曾全超, 安韶山, 董扬红, 李娅芸. 黄土高原纸坊沟流域不同植物叶片及枯落物的生态化学计量学特征研究. 环境科学, 2015, 36(3): 1084-1091.
- [30] 张珂, 何明珠, 李新荣, 谭会娟, 高艳红, 李刚, 韩国君, 吴杨杨. 阿拉善荒漠典型植物叶片碳、氮、磷化学计量特征. 生态学报, 2014, 34(22): 6538-6547.
- [31] 潘复静, 张伟, 王克林, 何寻阳, 梁士楚, 韦国富. 典型喀斯特峰丛洼地植被群落凋落物 C:N:P 生态化学计量特征. 生态学报, 2011, 31(2): 335-343.
- [32] Davis III S E, Childers D L, Noe G B. The contribution of leaching to the rapid release of nutrients and carbon in the early decay of wetland vegetation. *Hydrobiologia*, 2006, 563(1): 87-97.
- [33] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, Dobberfuhl D R, Folarin A, Huberty A, Interlandi S, Kilham S S, McCauley E, Schulz K L, Siemann E H, Sterner R W. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs. *Nature*, 2000, 408(6812): 578-580.
- [34] 郑淑霞, 上官周平. 黄土高原地区植物叶片养分组成的空间分布格局. 自然科学进展, 2006, 16(8): 965-973.
- [35] 李玉霖, 毛伟, 赵学勇, 张铜会. 北方典型荒漠及荒漠化地区植物叶片氮磷化学计量特征研究. 环境科学, 2010, 31(8): 1716-1725.
- [36] 向云, 程曼, 安韶山, 曾全超. 延河流域不同立地条件下植物-枯落物-土壤生态化学计量学特征. 自然资源学报, 2015, 30(10): 1642-1652.
- [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[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2012.