DOI：10.11766/trxb201512200490

黑岱沟露天煤矿优势植物叶片及枯落物生态化学计量特征*

马任甜[1]　方　瑛[1]　安韶山[1，2†]　赵俊峰[1]　肖　礼[1]

（1 西北农林科技大学资源环境学院，陕西杨凌　712100）

（2 西北农林科技大学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）

摘　要　以准格尔黑岱沟露天煤矿复垦区8种优势种植物的叶片及对应叶片枯落物为研究对象，通过对其碳、氮、磷、钾含量及生态化学计量学特征的研究，探讨退化生态系统植物内稳性、不同植被类型与NP限制率的关系，以期为黄土高原植被恢复与重建以及不同物种的合理配置提供合理建议，为完善生态化学计量学理论提供支撑。结果表明，不同植物叶片C、N、P、K的变化范围分别为418.2～564.1、7.19～33.21、0.82～2.37、4.98～32.77 g kg^{-1}。不同植物叶片的生态化学计量学特征N：P、P：K、N：K、C：N、C：P、C：K比变化范围分别为7.16～22.45、0.036～0.23、0.70～4.55、14.92～64.44、218.54～557.36、12.78～121.14。该地区3种植被类型钾含量差异显著，草本植物叶片钾含量显著高于乔木林和灌木林。不同植被类型植物叶片N：P比表现为灌木（18.86）＞草本（15.44）＞乔木（14.68），说明该区灌木林主要受P含量的限制，草本和乔木植物主要受N、P含量共同限制，该地区植被恢复应该以灌木为主。

关键词　露天煤矿；植物类型；叶片；枯落物；生态化学计量学

中图分类号　S154.1　　文献标识码　A

碳、氮、磷、钾作为植物生长的必需元素，对植物的生长发育及个体功能运行具有重要的作用[1]。生态化学计量学（ecological stoichiometry）结合了生态学和化学计量学的基本原理，是研究生物系统能量平衡和多重化学元素（主要是C、N、P）平衡的科学，它是分析多重化学元素的质量平衡对生态过程相互影响的一种理论，逐渐成为研究退化生态系统植物内稳性、NP限制率的新兴工具。随着生态化学计量学理论的完善，研究领域逐渐从水生生态系统向陆地生态系统扩展。陆地植物碳氮磷含量及其化学计量学特征，越来越成为研究者关注的热点[2-3]。植物N：P比营养限制理论已被广泛接受，并应用于不同生态系统的研究[4-6]。植物叶片是植物进行光合作用的主要器官，其N：P比的大小可用来表征陆地生态系统的生产力，同时也可表明该植物受到哪种元素的限制作用，但是这种限制关系会随着外界环境的改变而变化[5，7-9]。N、P协同限制植物代谢，同时施加N、P造成的植物生长响应较单独施加时更明显[10]。通过对N：P比在植被恢复过程中养分限制的研究，对其肥效管理和植被的合理搭配具有重要的指导意义。

* 中国科学院知识创新项目（KZCX2-XB3-13）、教育部新世纪优秀人才（NCET-2-0479）和陕西省自然科学基础研究计划（2011JM5011）共同资助 Supported by the Knowledge Innovation Project of the Chinese Academy of Sciences（KZCX2-XB3-13），the New Century Excellent Talents Program of the Ministry of Education（NCET-2-0479），and the Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province（2011JM5011）

† 通讯作者 Corresponding author，E-mail：shan@ms.iswc.ac.cn

作者简介：马任甜（1991—），女，陕西延安人，硕士研究生，主要研究方向为植被恢复与土壤固碳机制。E-mail：1371105625@qq.com

收稿日期：2015-12-20；收到修改稿日期：2016-03-31；优先数字出版日期（www.cnki.net）：2016-04-14

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

准格尔黑岱沟露天煤矿在煤炭开采过程中，由于基建工程的大面积开挖，土地受到人为扰动，生态系统受到破坏，矿区又处在生态非常脆弱的黄土丘陵区，为保护环境，防止地面硬化、水土流失，排土场平台覆土平整后立即采取了植被恢复措施。植被恢复重建是治理该区水土流失、改善土壤质量的重要措施之一[11]。根据当地的自然条件和立地条件，选择了适应环境生长、抗性强、根系发达、萌蘖能力强、生长快、栽植容易、成活率高的植被。本研究选择矿区主要的8种植物叶片及其对应叶片枯落物作为研究对象，对不同植物叶片和枯落物的碳氮磷钾含量及生态化学计量比进行研究，探讨不同植物叶片与枯落物的养分变化以及相互关系，为矿区植被选择以及矿区植被恢复建设提供理论指导，同时为完善陆地退化生态系统生态化学计量学提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区黑岱沟露天煤矿位于内蒙古自治区伊克昭盟准格尔旗境内，地理坐标为东经111°13′～111°20′、北纬39°43′～39°49′，海拔在1 025～1 302 m之间。矿区气候属于中温带半干旱大陆性气候，年平均气温5.3～7.6℃。年降水量为231～459 mm，多集中在7—9月，约占全年降水量的60%～70%。地貌为典型的黄土丘陵沟壑区。矿区内地带性土壤不明显，非地带性土壤黄绵土广泛分布，土壤呈微碱性，土壤肥力低下。矿区自1992年开始复垦，以乔灌草结合的原则种植了大量人工植被，乔本植物以杨树（*Populus* L.）为主，辅以生长能力强的油松（*Pinus tabuliformis*），同时采用以沙打旺（*Erect milkvetch*）、苜蓿（*Medicago sativa* Linn.）为主的草本植物，灌木植物主要有耐旱沙棘（*Hippophae rhamnoides*）、柠条（*Caragana korshinskii* Kom.）、紫穗槐（*Amorpha fruticosa* Linn.）等，天然植被稀少而呈零星分布[12]。

1.2 采样地设置与样品采集

植物叶片与对应植物叶片枯落物于2013年9月在内蒙古准格尔旗永利煤矿复垦区采集。在复垦区选取20 m×20 m的样方18个，对每个样方内植物种类和样地经纬度、海拔等进行调查（表1），在样

表1 试验样地的基本信息

Table 1 General information of the sampling plots

植被类型 Vegetation types	编号 Number	物种 Species	科 Family	纬度 Latitude（N）	经度 Longitude（E）	海拔 Altitude（m）
乔木 Forest	1	油松 *Pinus tabuliformis*	松科 Pinaceae	39°47′11.01″	111°17′32.38″	1 279
	2	杨树 *Populus* L.	杨柳科Salicaceae	39°47′15.76″	111°17′51.19″	1 275
	3	刺槐 *Robinia pseudoacacia* L.	豆科Leguminosae	39°47′20.45″	111°17′50.97″	1 276
灌木 Shrub	1	沙棘 *Hippophae rhamnoides*	胡颓子科 Elaeagnaceae	39°47′15.04″	111°18′0.18″	1 275
	2	紫穗槐 *Amorpha fruticosa* Linn.	豆科Leguminosae	39°47′27.55″	111°17′48.34″	1 260
草本 Grass	1	长芒草 *Stipa bungeana* Trin.	禾本科 Poales	39°47′15.76″	111°17′26.53″	1 273
	2	苜蓿 *Medicago sativa* Linn.	豆科Leguminosa	39°47′0.63″	111°18′0.75″	1 274
	3	冰草 *Agropyron cristatum*（Linn.）Gaertn	禾本科 Poales	39°47′41.35″	111°17′14.86″	1 278

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

方内根据生活型分成乔、灌、草3个层次采集优势物种的叶片及相应的叶片枯落物，选择长势均匀的优势物种，根据不同层次（高、中、低）、不同方位（东、西、南、北）采集单一物种叶片，在样方内多点采集单一物种的枯落物，采集的样品质量大约为300 g左右，叶片于105℃下杀青15 min，然后65℃烘干至恒重。

1.3　样品测定

用粉碎机将植物叶片以及叶片枯落物磨成0.15 mm的粉末后测定其全碳、全氮、全磷、全钾含量。植物叶片与枯落物的全碳采用重铬酸钾外加热法测定；全氮、全磷、全钾采用H_2SO_4-H_2O_2消煮，消煮液分别用凯氏法测定全氮，钒钼黄比色法测定全磷，火焰光度法测定全钾[13]。

1.4　数据处理与分析

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进行统计分析和图型制作。C、N、P、K采用质量含量，C：N、C：P、N：P、C：K、N：K、P：K均采用质量比。

2　结　果

2.1　不同植物叶片和枯落物碳氮磷钾含量变化

由表2可以看出，不同植物叶片全碳含量的变化范围为418.2～564.1 g kg^{-1}，平均值为477.6 g kg^{-1}；全氮含量的变化范围为7.19～33.21 g kg^{-1}，平均值为22.39 g kg^{-1}；全磷含量的变化范围为0.82～2.37 g kg^{-1}，平均值为1.39 g kg^{-1}；全钾含量的变化范围为4.98～32.77 g kg^{-1}，平均值为12.65 g kg^{-1}。

从整体来看，不同植物叶片全碳含量具体表现为油松最大，且显著高于其他植物（p＜0.05），冰草最小，叶片全碳的变异性较小；全氮含量表现为沙棘最大，苜蓿次之，然后是紫穗槐和刺槐，且显著高于其他植物（p＜0.05），叶片全氮的变异性较大。8种优势植物，其中刺槐、紫穗槐、苜蓿属于豆科，具有固氮能力，沙棘虽然不是豆科植物，但可以与某些固氮菌共生，在沙棘的根系上生长，形成根瘤，从而使沙棘具有较豆科植物更强的固氮能力。8种优势植物在全氮含量方面表现为

表2　不同植物叶片碳氮磷钾含量

Table 2　Nutrient contents in leaves relative to species of the plant

植被类型 Vegetation types	物种 Species	全碳 TC（g kg^{-1}）	全氮 TN（g kg^{-1}）	全磷 TP（g kg^{-1}）	全钾 TK（g kg^{-1}）
乔木 Forest	油松 *Pinus tabuliformis*	564.1±29.1a	7.79±3.05c	1.06±0.20cd	5.43±2.61d
	杨树 *Populus* L.	446.5±17.4de	21.18±10.36b	1.12±0.37cd	15.40±5.31b
	刺槐 *Robinia pseudoacacia* L.	463.1±29.1d	28.25±0.86ab	1.34±0.07bc	6.44±0.65d
灌木 Shrub	沙棘 *Hippophae rhamnoides*	487.2±28.1bc	33.21±4.04a	1.49±0.19bc	8.42±4.01d
	紫穗槐 *Amorpha fruticosa* Linn.	508.5±23.2b	28.72±0.65ab	1.78±0.01ab	13.35±0.66bc
草本 Grass	长芒草 *Stipa bungeana* Trin.	457.3±2.9d	7.19±1.21c	0.82±0.04d	4.98±0.01d
	苜蓿 *Medicago sativa* Linn.	475.9±30.0cd	29.80±12.68a	2.37±0.77a	14.43±3.23b
	冰草 *Agropyron cristatum*（Linn.）Gaertn	418.2±7.9e	22.95±0.34b	1.18±0.05cd	32.77±1.80a

注：平均值±标准差，同一列不同小写字母表示呈显著性差异（p＜0.05）Note：Mean±SD. Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

非固氮植物沙棘＞固氮植物＞非固氮植物。草本豆科植物苜蓿全氮含量＞灌木豆科植物紫穗槐全氮含量（$p<0.05$）＞乔木豆科植物刺槐全氮含量（$p<0.05$）。全磷表现为苜蓿最大，长芒草最小，叶片全磷的变异性较小；全钾含量表现为冰草最大，且显著高于其他植物（$p<0.05$）。全氮、全钾含量变异性高于全碳、全磷。不同植被类型叶片全碳含量表现为灌木＞乔木＞草本，全氮、全磷含量均表现为灌木＞草本＞乔木，全钾含量表现为草本＞灌木＞乔木。

由表3可以看出，不同植物枯落物全碳含量的变化范围为368.9～562.3 g kg^{-1}，平均值为443.1 g kg^{-1}；全氮含量的变化范围为3.98～22.65 g kg^{-1}，平均值为13.33 g kg^{-1}；全磷含量的变化范围为0.58～ 0.97 g kg^{-1}，平均值为0.83 g kg^{-1}；全钾含量的变化范围为1.18～20.98 g kg^{-1}，平均值为7.55 g kg^{-1}。枯落物全碳含量表现为油松最大，其他植物全碳含量差异不显著，枯落物全碳的变异性较小。枯落物全氮含量表现为紫穗槐最大，且显著高于其他植物（$p<0.05$），沙棘次之，然后为刺槐和苜蓿，油松最小。8种优势植物叶片枯落物全氮含量表现为固氮植物紫穗槐＞非固氮植物沙棘（$p<0.05$）＞固氮植物刺槐（$p<0.05$）＞固氮植物苜蓿（$p<0.05$），枯落物全氮的变异性较大。枯落物全磷含量表现为紫穗槐最大，且显著高于其他植物（$p<0.05$），油松最小，枯落物全磷的变异性较小。枯落物全钾含量表现为杨树最大，油松最小，枯落物全钾的变异性较大。叶片及其枯落物碳氮磷钾的变异性均表现为全氮、全钾的变异性高于全碳、全磷。不同植物叶片碳氮磷钾含量均高于枯落物。

表3 不同植物枯落物碳氮磷钾含量

Table 3 Nutrient contents in litter relative to species of the plant

植被类型 Vegetation types	物种 Species	全碳 TC（g kg^{-1}）	全氮 TN（g kg^{-1}）	全磷 TP（g kg^{-1}）	全钾 TK（g kg^{-1}）
乔木 Forest	油松 *Pinus tabuliformis*	562.3±45.8a	3.98±1.56g	0.58±0.23e	1.18±0.92f
	杨树 *Populus* L.	418.4±38.4b	8.07±0.07e	0.79±0.02bcd	20.98±0.20a
	刺槐 *Robinia pseudoacacia* L.	409.3±10.5b	15.55±0.92c	0.70±0.03cde	5.36±0.06e
灌木 Shrub	沙棘 *Hippophae rhamnoides*	368.9±71.1b	22.65±1.34b	0.97±0.10b	6.19±2.57d
	紫穗槐 *Amorpha fruticosa* Linn.	438.1±43.6b	25.19±0.13a	1.38±0.06a	8.97±0.02c
草本 Grass	长芒草 *Stipa bungeana* Trin.	451.4±24.7b	8.76±3.32f	0.74±0.28cde	4.97±2.75d
	苜蓿 *Medicago sativa* Linn.	452.1±22.0b	11.65±1.74d	0.64±0.13de	1.74±0.36f
	冰草 *Agropyron cristatum* (Linn.) Gaertn	444.3±4.4b	10.81±1.13d	0.83±0.02bc	11.03±0.21b

注：平均值±标准差，同一列不同小写字母表示呈显著性差异（$p<0.05$）Note：Mean±SD. Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level

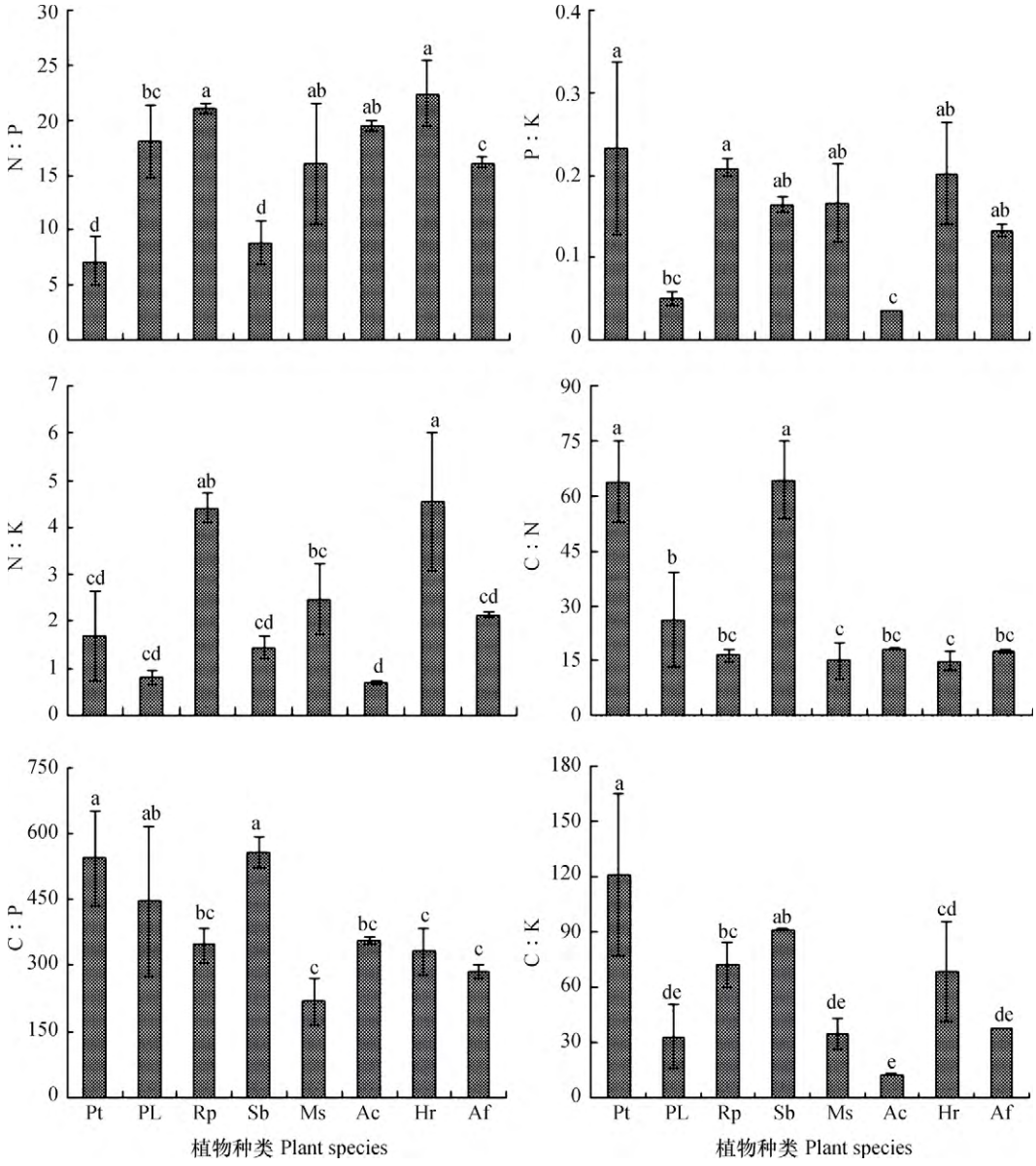
2.2 不同植物叶片和枯落物的生态化学计量学特征

2.2.1 不同植物叶片的生态化学计量特征 由图1可以看出，不同植物叶片的生态化学计量学特征N：P比变化范围为7.16～22.45，平均值为16.16，变异系数为34.19%；P：K比变化范围为0.036～0.23，平均值为0.15，变异系数为48.56%；N：K比变化范围为0.70～4.55，平均值为2.28，变异系数为65.24%；C：N比变化范

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

围为14.92～64.44，平均值为29.60，变异系数为73.17%；C：P比变化范围为218.54～557.36，平均值为385.44，变异系数为31.11%；C：K比变化范围为12.78～121.14，平均值为59.22，变异系数为60.62%。

由图1可知，N：P比表现为沙棘和刺槐最大，油松最小，沙棘和刺槐N：P比显著高于油松、长芒草、紫穗槐（$p<0.05$），不同植被类型植物叶片N：P比表现为灌木＞乔木＞草本；P：K比表现为油松最大，冰草最小，油松、刺槐、长芒草、苜蓿、沙棘、紫穗槐差异不显著；N：K比表现为沙棘最大，冰草最小；C：N比表现为油松和长芒草最大，且显著高于其他植物（$p<0.05$），C：N比的变异性较大，这是因为N元素含量的变异性较大引起的；C：P比表现为油松和长芒草最大，苜蓿最小；C：K比表现为油松最大，冰草最小。



注：Pt：油松；PL：杨树；Rp：刺槐；Sb：长芒草；Ms：苜蓿；Ac：冰草；Hr：沙棘；Af：紫穗槐。不同小写字母表示不同植物叶片生态化学计量差异显著（$p<0.05$）。下同 Note：Pt：*Pinus tabuliformis*；PL：*Populus* L.；Rp：*Robinia pseudoacacia* L.；Sb：*Stipa bungeana* Trin.；Ms：*Medicago sativa* Linn.；Ac：*Agropyron cristatum*（Linn.）Gaertn；Hr：*Hippophae rhamnoides*；Af：*Amorpha fruticosa* Linn.. Different lowercase letters represent significant difference in between ecological stoichiometry（$p<0.05$）. The same below

图1　不同植物叶片生态化学计量学特征

Fig. 1　Ecological stoichiometric characteristics of leaves relative to species of the plant

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.2.2 不同植物枯落物的生态化学计量特征 由图2可以看出，不同植物枯落物的生态化学计量学特征N：P比变化范围为6.97～23.78，平均值为15.60；P：K比变化范围为0.076～0.64，平均值为0.21；N：K比变化范围为0.92～6.71，平均值为2.97；C：N比变化范围为16.09～160.28，平均值为52.47；C：P比变化范围为292.89～1096.02，平均值为624.38；C：K比变化范围为20.24～795.31，平均值为172.83。其中C：K比、P：K比、C：N比的变异性较大，N：P比和C：P比的变异性较小。

由图2可知，N：P比表现为沙棘和刺槐最大，且显著高于其他植物（$p<0.05$），油松最小；P：K比表现为油松最大，苜蓿次之，其他植物差异不显著；N：K比表现为苜蓿最大，沙棘次之，二者差异显著（$p<0.05$），且比值均显著高于其他植物（$p<0.05$），杨树最小；C：N比表现为油松最大，且显著高于其他植物（$p<0.05$）；C：P比表现为油松最大，且显著高于其他植物（$p<0.05$），紫穗槐最小；C：K比表现为油松最大，其他植物差异不显著。

2.3 不同植物叶片和枯落物碳氮磷钾与生态化学计量学特征的关系

由表4可以看出，不同植物群落叶片有机碳与

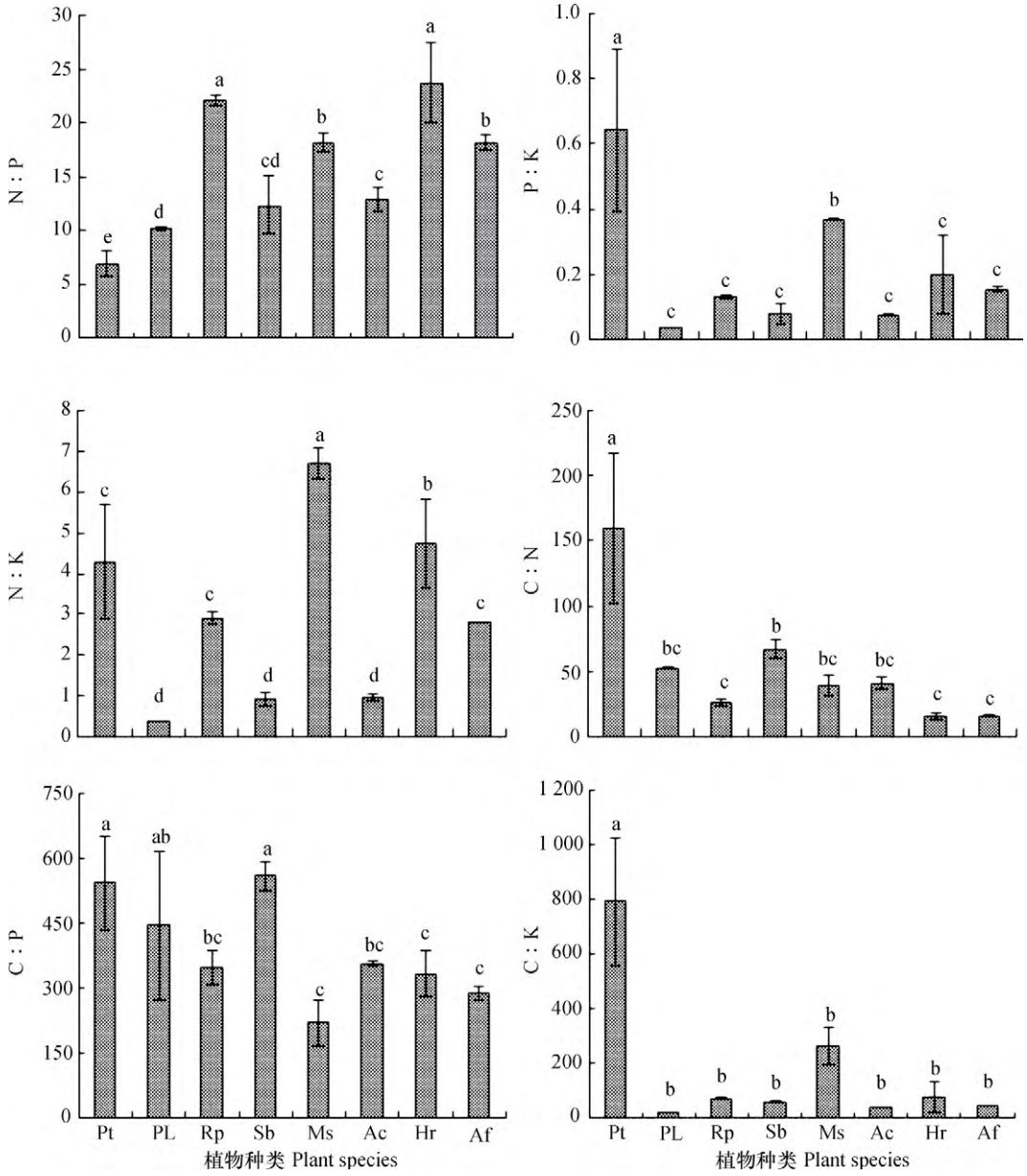


图2 不同植物枯落物生态化学计量学特征

Fig. 2 Ecological stoichiometric characteristics of litter relative to species of the plant

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表4　植物叶片碳氮磷钾含量与生态化学计量学特征的相关性

Table 4　Pearson correlations between content of C，N，P and K and eco-stoichiometric characteristics of the elements in leaves

	N：P	P：K	N：K	C：N	C：P	C：K
全碳TC	0.274	0.324	0.554**	-0.112	-0.001	0.227
全氮TN	0.854**	0.009	0.582**	-0.921**	-0.936**	-0.513*
全磷TP	0.490*	0.033	0.341	-0.662**	-0.781**	-0.400
全钾TK	0.352	-0.804**	-0.528**	-0.408*	-0.258	-0.779**

注Note：* $p<0.05$；** $p<0.01$

N：P、P：K呈正相关，与N：K呈极显著正相关（$p<0.01$），与C：N比、C：P比呈负相关，但相关性不显著，与C：K比呈正相关；植物叶片全氮与N：P、N：K呈极显著正相关（$p<0.01$），与P：K呈正相关，与C：N、C：P、C：K呈显著负相关（$p<0.05$）；植物叶片全磷与C：N、C：P呈极显著负相关（$p<0.01$），与N：P呈显著正相关（$p<0.05$），与P：K、N：K、C：K呈正相关；植物叶片全钾与P：K、C：K、N：K呈极显著负相关（$p<0.01$），与C：N比呈显著负相关（$p<0.05$）。

由表5可以看出，不同植物群落枯落物全碳与N：P、P：K、N：K、C：N、C：P、C：K均呈负相关；枯落物全氮与N：P呈极显著正相关（$p<0.01$），与C：P、C：N呈极显著负相关（$p<0.01$），与C：K呈显著负相关（$p<0.05$）；枯落物全磷与C【Objective】P呈极显著负相关（$p<0.01$），与C：N呈显著负相关（$p<0.05$）与N：P呈正相关，与其他呈负相关；枯落物全钾与各比值之间均呈负相关，其中与P：K、N：K、C：K呈极显著负相关（$p<0.01$）。

表5　植物枯落物碳氮磷钾含量与生态化学计量学特征的相关性

Table 5　Pearson correlations between content of C，N，P and K and eco-stoichiometric characteristics of the elements in litter

	N：P	P：K	N：K	C：N	C：P	C：K
全碳TC	-0.070	-0.282	-0.280	-0.204	-0.214	-0.261
全氮TN	0.783**	-0.305	0.098	-0.659**	-0.737**	-0.412*
全磷TP	0.318	-0.252	-0.103	-0.414*	-0.602**	-0.291
全钾TK	-0.191	-0.661**	-0.774**	-0.319	-0.450*	-0.534**

注Note：* $p<0.05$；** $p<0.01$

3　讨　论

3.1　不同植物叶片和枯落物碳氮磷钾含量变化

植物作为陆地生态系统的子系统，在调节整个系统的稳定性方面发挥着重要的作用。碳、氮、磷、钾等元素是植物生长发育所必需的营养元素，在调节植物生长及行为过程中发挥着重要的作用[14]。作为生态系统中环境因子和生物因子的代表，植物叶片和枯落物对环境变化的反应比较敏感[11]。植物枯落物分解产生养分，土壤养分得到相应的补给，为植物自身养分的调节和需求提供了条件[15]。不同植被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。本研究表明，矿区优势植物叶片碳氮磷钾含量均高于枯落物，其中植物叶片碳平均含量略高于全球植物叶片碳（464 g kg^{-1}）的平均含量，同时也高于浙江天童32种常绿阔叶树叶片的碳含量450 g kg^{-1}[16]、暖温带北京周边地区358种植物的几何平均数451 g kg^{-1}[17]。其中矿区油松叶片碳含量显著高于其他植物，同时也高于子午岭油松叶片碳平均含量499.5 g kg^{-1}[18]、郑淑霞和上官周平[19]对黄土高原126种植物叶片碳的测定值438 g kg^{-1}以及山西省油松林乔木叶片碳含量447 g kg^{-1}[20]，但低于陇东黄土高原沟壑区油松人工林的叶片碳含量534.1 g kg^{-1}[21]。这是因为研究区油松人工林地是经过整地后造林，人工抚育措施较好，采用人工灌溉，鳞坑法栽植乔木以及乔、

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

灌、草有机结合，加快生态恢复进程，油松处于生长旺盛时期，高养分循环和高养分利用效率使得油松叶片碳含量偏高，说明矿区油松对碳的富集能力较强。

植物叶片氮的平均含量略高于全球水平20.1 g kg^{-1} [22]、我国植物叶片氮的平均含量20.24 g kg^{-1} [23]，也高于浙江天童32种常绿阔叶树叶片中氮含量16.06 g kg^{-1} [16]以及阿拉善荒漠区55种典型植物叶片氮含量10.65 g kg^{-1} [24]，但低于松嫩草地80种草本植物叶片氮含量24.20 g kg^{-1} [25]。因为矿区所采集的优势植物一部分为固氮植物以及非固氮植物沙棘，沙棘虽然不是豆科植物，但可以与某些固氮菌共生，在沙棘的根系上生长，形成根瘤，从而使沙棘具有较豆科植物更强的固氮能力，这种特性对于沙棘在恶劣境地生存具有重要意义。这部分固氮植物以及沙棘体内的氮含量提高了矿区整体氮水平。植物叶片磷含量显著低于全球水平叶片磷含量1.99 g kg^{-1} [26]或1.80 g kg^{-1} [22]以及我国植物叶片磷的平均含量1.5 g kg^{-1} [27]，也低于北方典型荒漠及荒漠化地区植物叶片磷含量1.74 g kg^{-1} [28]。这与国内很多研究表明植物叶片磷含量偏低的规律一致。植物生长所需要的90%以上的氮元素来自于凋落物分解过程中的养分释放[29]，并且岩石的风化是磷的主要来源[30]，降水量少和相对较低的分解速度使得矿质风化速率降低和土壤存储有机物质的能力较小，会导致养分可利用性相对于其他地区明显的降低[31]，同时磷含量偏低与地表土壤对磷的吸附作用、黄土高原地区强烈的风化作用和水土流失作用有关，亦与中国土壤磷含量普遍低于全球平均水平有关[32]。研究结果说明在准格尔黑岱沟露天煤矿地区磷含量偏低，植物生长受到磷的限制。

植物枯落物的氮磷钾含量与植物自身的再吸收能力有关，植物叶片在掉落之前将养分转移至花、枝、根、果实中，防止养分的流失。研究结果显示，乔木林、灌木林与草本植被叶片碳氮磷钾含量显著高于枯落物，这是因为老化的植物组织在凋落前会将部分养分转移至新鲜组织中去，实现了养分的再吸收利用[33]。本研究中3种不同的植被类型下，植物叶片的碳氮磷钾含量明显高于枯落物，也证实了上述理论。灌木的氮、磷含量高于乔木和草本，因为灌木林所选的优势物种是沙棘和紫穗槐，这两种物种的氮、磷含量高于其他物种。钾在植物体内主要以离子态存在，不像碳、氮、磷主要以有机态形式储存在植物体内，流动性差。钾在植物水分竞争中起着非常重要的作用，植物对钾的吸收能力决定植物的耐旱性。本研究显示不同植被类型植物叶片钾的含量差异显著，这是因为研究区内随着生态系统的恢复，不同植被间对水分的竞争愈加激烈，植物通过吸收相对多的钾来提高自身的抗旱能力和水分吸收能力[34]。草本植物叶片钾含量显著高于乔木林和灌木林，说明草本植物的耐旱性显著高于乔木林和灌木林。

3.2 不同植被类型植物叶片和枯落物的生态化学计量学特征变化

氮和磷是植物生长过程中最常见的限制性元素，对植物各种功能影响深刻[35]。通常可用植物叶片的N：P来表征植物生长的限制性养分[36]。通常将N：P比为16作为评价植物生长受氮或者磷限制的临界值，N：P比大于16受P限制，小于14受N限制，介于14～16则受氮和磷共同限制。本研究发现8种优势植物在全氮含量方面表现为非固氮植物沙棘＞固氮植物＞非固氮植物。全氮、全磷含量均表现为灌木＞草本＞乔木，全钾含量表现为草本＞灌木＞乔木。乔木植被N：P比最小（14.68），其次是草本（15.44），灌木N：P比最高（18.86），草本和乔木两者N：P含量均介于14～16之间，植物生长主要受氮和磷共同限制。灌木N：P比大于临界值16，植物生长主要受磷限制。本研究区域草本植被主要生长在乔木林或者灌木林下，其覆盖度较大，草本植被作为浅根性植物对土壤表层养分含量吸收能力较强，特别是对磷的吸收。此外，草本植物叶片在掉落前磷的转移能力较强，显著高于乔木和灌木林，能够有效地利用叶片中的磷，满足植物生长对磷的需求，因此黑岱沟露天煤矿草本植物主要受氮限制。灌木林的N：P较大，主要受磷含量的限制，这是由于黄土高原土壤磷含量较低，植物受磷的限制作用大于氮，这与Han等对中国753种陆生植物的研究结果相似，我国陆地植被普遍受磷限制[23]。

作为重要的生理指标，植物叶片的C：N和C：P比能够反映其同化碳的能力，在一定程度上反映植物营养的利用效率，具有重要的生态学意义[37]。较低的C：P比也是磷有效性高的表现。本研究结果表明不同植被类型叶片全碳含量表现为灌木＞乔木＞草本，3种植被类型叶片C：P比表

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

现为乔木叶片＞草本叶片＞灌木叶片，这与山西省4种不同森林类型叶片C：P比的化学计量特征一致[20]，表明矿区不同植被类型乔木叶建成效率最高，而灌木叶建成效率最低。乔木的C：N比高于全球水平（22.5），灌木的C：N比低于全球水平（22.5）。乔木和灌木C：P比均高于全球水平（232）。这可能与该地区的气候条件、水热状况有关，在植被恢复和群落演替的过程中，植被种类增多，物种多样性增加，土壤养分的富集作用增强，植物可吸收利用的养分增加所导致。叶片C：P、C：K、C：N、P：K、N：K均小于枯落物，这与Mcgroddy等[38]的研究结果一致。将来的研究重点可以将植物、枯落物和土壤的元素计量特征相结合，可以解释养分比例的调控机制，了解各元素是如何流动和如何产生耦合作用的，最终实现自然资源的可持续利用。

4 结　论

不同植物叶片碳氮磷钾含量均高于枯落物，其中植物叶片氮含量略高于我国植物叶片氮的平均含量；植物叶片磷含量低于我国植物叶片磷的平均含量。草本植物叶片钾含量显著高于乔木和灌木，灌木的N、P含量高于草本和乔木。不同植被类型受N与P限制作用不一致，不同植被类型下植物叶片N：P比以灌木最高，乔木最低。表明灌木缺磷，草本、乔木受氮磷共同限制，该地区应该以灌木植被为主。本研究结果可为准格尔黑岱沟露天煤矿矿区植被恢复与重建提供理论与实践指导。

参 考 文 献

[1] Vitousek P M，Porder S，Houlton B Z，et al. Terrestrial phosphorus limitation：mechanisms，implications，and nitrogen-phosphorus interactions. Journal of Applied Ecology，2010，20（1）：5—15

[2] Ågren G I. The C：N：P stoichiometry of autotrophs-Theory and observations. Ecology Letters，2004，7（3）：185—191

[3] Aerts R，Chapin III F. The mineral nutrition of wild plants revisited：A re-evaluation of processes and patterns. Advances in Ecological Research，1999，30：1—67

[4] Koerselman W，Meuleman A F. The vegetation N：P ratio：a new tool to detect the nature of nutrient limitation. Journal of Applied Ecology，1996，33：1441—1450

[5] 王晶苑，王绍强，李纫兰，等. 中国四种森林类型主要优势植物的C：N：P化学计量学特征. 植物生态学报，2011，35（6）：587—595
Wang J Y，Wang S Q，Li R L，et al. C：N：P stoichiometric characteristics of four forest types ’ dominant tree species in China（In Chinese）. Chinese Journal of Plant Ecology，2011，35（6）：587—595

[6] 阎凯，付登高，何峰，等. 滇池流域富磷区不同土壤磷水平下植物叶片的养分化学计量特征. 植物生态学报，2011，35（4）：353—361
Yan K，Fu D G，He F，et al. Leaf nutrient stoichiometry of plants in the phosphorus-enriched soils of the Lake Dianchi watershed，southwestern China（In Chinese）. Chinese Journal of Plant Ecology，2011，35（4）：353—361

[7] Von Oheimb G，Power S A，Falk K，et al. N：P ratio and the nature of nutrient limitation in Calluna-dominated heathlands. Ecosystems，2010，13（2）：317—327

[8] He J-S，Wang L，Flynn D F，et al. Leaf nitrogen：phosphorus stoichiometry across Chinese grassland biomes. Oecologia，2008，155（2）：301—310

[9] G Sewell S. N：P ratios in terrestrial plants：variation and functional significance. New Phytologist，2004，164（2）：243—266

[10] Harpole W S，Ngai J T，Cleland E E，et al. Nutrient co-limitation of primary producer communities. Ecology Letters，2011，14（9）：852—862

[11] 刘兴诏，周国逸，张德强，等. 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，et al. N and P stoichiometry of plant and soil in lower subtropical forest successional series in southern China（In Chinese）. Chinese Journal of Plant Ecology，2010，34（1）：64—71

[12] 李青峰，曹江营. 准格尔煤田露天矿植被恢复的研究：排土场植被自然恢复的观察研究. 中国草地，1997（2）：23—25，66
Li Q F，Cao J Y. Vegetation restoration in Zungeer open-cut coal mine：Natural recovery in soil refusal site（In Chinese）. Grassland of China，1997（2）：23—25，66

[13] 鲍士旦. 土壤农化分析. 第3版. 北京：中国农业出版社，2005：45—52
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analisis（In Chinese）. 3rd ed. Beijing：China Agriculture Press，

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2005：45—52

[14] 马永跃，王维奇. 闽江河口区稻田土壤和植物的C、N、P含量及其生态化学计量比. 亚热带农业研究，2011，7（3）：182—187
Ma Y Y，Wang W Q. Carbon，nitrogen and phosphorus content and the ecological stoichiometric ratios of paddy field soil-plants in Minjiang River estuary（In Chinese）. Subtropical Agriculture Research，2011，7（3）：182—187

[15] Agren G I，Bosatta E. Theoretical ecosystem ecology：understanding element cycles. Cambridge University Press，1998

[16] 黄建军，王希华. 浙江天童32种常绿阔叶树叶片的营养及结构特征. 华东师范大学学报（自然科学版），2003（1）：92—97
Huang J J，Wang X H. Leaf nutrient and structural characteristics of 32 evergreen broad leaved species（In Chinese）. Journal of East China Normal University（Natural Science），2003（1）：92—97

[17] 韩文轩，吴漪，汤璐瑛，等. 北京及周边地区植物叶的碳氮磷元素计量特征. 北京大学学报（自然科学版），2009，45（5）：855—860
Han W X，Wu Y，Tang L Y，et al. Leaf carbon，nitrogen and phosphorus stoichiometry across plant species in Beijing and its periphery（In Chinese）. Acta Scientiarum Naturalium Universities Pekinensis，2009，45（5）：855—860

[18] 邓娟，上官周平. 子午岭林区人工与天然油松林（*Pinus tabulaeformis*）养分库和碳库特征. 生态学报，2009，29（6）：3231—3240
Zheng J，Shangguan Z P. Nutrient and carbon pools in both natural and artificial *Pinus tabulaeformis* in Ziwuling Region（In Chinese）. Acta Ecologica Sinica，2009，29（6）：3231—3240

[19] 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
Zheng S X，Shangguan Z P. Spatial distribution patterns of leaf nutrients composition on the Loess Plateau（In Chinese）. Progress in Natural Science，2006，16（8）：965—973

[20] 王宁，张有利，王百田，等. 山西省油松林生态系统碳氮磷化学计量特征. 水土保持研究，2015（1）：72—79.
Wang N，Zhang Y L，Wang B T，et al. Stoichiometry of carbon，nitrogen and phosphorus in *Pinus tabulaeformis* Carr. forest ecosystems in Shanxi Province，China（In Chinese）. Research of Soil and Water Conservation，2015（1）：72—79

[21] 申家朋，张文辉，李彦华，等. 陇东黄土高原沟壑区刺槐和油松人工林的生物量和碳密度及其分配规律. 林业科学，2015（4）：1—7
Shen J P，Zhang W H，Li Y H，et al. Biomass and carbon density and patterns of their distribution in the plantations of *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabulaeformis* in Loess Gullies in Eastern Gansu（In Chinese）. Scientia Silvae Sinicae，2015（4）：1—7

[22] Reich P B，Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America，2004，101（30）：11001—11006

[23] Han W X，Fang J Y，Guo D L，et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. New Phytologist，2005，168：377—385

[24] 张珂，何明珠，李新荣，等. 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
Zhang K，He M Z，Li X R，et al. Foliar carbon，nitrogen and phosphorus stoichiometry of typical desert plants across the Alashan Desert（In Chinese）. Acta Ecologica Sinica，2014，34（22）：6538—6547

[25] 宋彦涛，周道玮，李强，等. 松嫩草地80种草本植物叶片氮磷化学计量特征. 植物生态学报，2012，36（3）：222—230
Song Y T，Zhou D W，Li Q，et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry in 80 herbaceous plant species of Songnen grassland in Northeast China（In Chinese）. Chinese Journal of Plant Ecology，2012，36（3）：222—230

[26] Elser J J，Stemer R W，Gorokhova E，et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems. Ecology Letters，2000，3（6）：540—550

[27] 杨菁，谢应忠，吴旭东，等. 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，et al. Stoichiometry characteristics of plant and soil in alfalfa grassland with different growing years（In Chinese）. Acta Prataculturae Sinica，2014，23（2）：340—345

[28] 李玉霖，毛伟，赵学勇，等. 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
Li Y L，Mao W，Zhao X Y，et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry in typical desert and desertified regions，North China（In Chinese）. Environmental Science，2010，31（8）：1716—1725

[29] 李鑫，曾全超，安韶山，等. 黄土高原纸坊沟流域不同

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

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
Li X，Zeng Q C，An S S，et al. Ecological stoichiometric characteristics in leaf and litter under different vegetation types of Zhifanggou Watershed on the Loess Plateau，China（In Chinese）. Environmental Science，2015，36（3）：1084—1091

[30] Craine J M，Jackson R D. Plant nitrogen and phosphorus limitation in 98 North American grassland soils. Plant and Soil，2010，334（1/2）：73—84

[31] 赵红梅，黄刚，马健，等. 荒漠区地表凋落物分解对季节性降水增加的响应. 植物生态学报，2012，36（6）：471—482
Zhao H M，Huang G，Ma J，et al. Responses of surface litter decomposition to seasonal water addition in desert（In Chinese）. Chinese Journal of Plant Ecology，2012，36（6）：471—482

[32] Elser J J，Fagan W F，Denno R F，et al. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs. Nature，2000，408：578—580

[33] 杨佳佳，张向茹，马露莎，等. 黄土高原刺槐林不同组分生态化学计量关系研究. 土壤学报，2014，51（1）：133—142
Yang J J，Zhang X R，Ma L S，et al. Ecological stoichimetric relationships between components of *Robinia pseudoacacia* forest in Loess Plateau（In Chinese）. Acta Pedologica Sinica，2014，51（1）：133—142

[34] Rivas-ubach A，Sardans J，Perez-trujillo M，et al. Strong relationship between elemental stoichiometry and metabolome in plants. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America，2012，109（11）：4181—4186

[35] Reich P B，Walters M B，Ellsworth D S. From tropics to tundra：Global convergence in plant functioning. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America，1997，94（25）：13730—13734

[36] 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（In Chinese）. Acta Ecologica Sinica，2008，28（8）：3937—3947

[37] 曾全超，李鑫，董扬红，等. 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（5）：870—879
Zeng Q C，Li X，Dong Y H，et al. Ecological stoichiometry characteristics and physical-chemical properties of soils at different latitudes on the Loess Plateau（In Chinese）. Journal of Nature Resources，2015（5）：870—879

[38] Mcgroddy M E，Daufresne T，Hedin L O. Scaling of C：N：P stoichiometry in forests worldwide：Implications of terrestrial Redfield-type ratios. Ecology，2004，85（9）：2390—2401

Ecological Stoichiometric Characteristics of Leaves and Litter of Plants Dominant in Heidaigou Opencast Coal Mining Area

MA Rentian[1]　FANG Ying[1]　AN Shaoshan[1, 2†]　ZHAO Junfeng[1]　XIAO Li[1]

（1 *College of Natural Resources and Environment*，*Northwest A&F University*，*Yangling*，*Shaanxi* 712100，*China*）

（2 *State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Land Farming on Loess Plateau*，*Research Center of Soil and Water Conversation and Ecological Environment*，*Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education*，*Yangling*，*Shaanxi* 712100，*China*）

Abstract　【Objective】Carbon，nitrogen，phosphorus and potassium，being elements essential to plant growth，play important roles in the growth and development of plants and functioning of the individuals. Ecological stoichiometry is a discipline integrating the principles of ecology and stoichiometry and studying energy balance and mass balance of multiple chemical elements in living systems，and can be used to analyze constraints and consequences of these mass balances during ecological interactions. 【Method】This paper was to characterize contents and eco-stoichiometric proportions of carbon（C），nitrogen（N），phosphorus（P）and potassium（K）in leaves and litter of eight dominant species of plants，i.e. *Pinus tabuliformis*，*Populus* L.，*Robinia pseudoacacia* L.，*Hippophae rhamnoides*，*Amorpha fruticosa* Linn，*Stipa bungeana*

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Trin, *Medicago sativa* Linn, *Agropyron cristatum* (Linn.) Gaertn, in three different types of vegetation (forest, shrub, and grass) in the revegetated area of the Heidaigou opencast coal mining, Zhungeer, Inner Mongolia by means of field surveying and sampling and in-lab analysis, and further to explore relationships of plant homeostasis of degraded ecosystems with vegetation type and NP limiting rate, in an attempt to provide some proposals for rational combination of plant species in restoring and/or reestablishing vegetation on the Loess Plateau and some evidence for perfecting the theory of eco-stoichiometry. 【Result】Results show that the content of C, N, P and K varied in the range of 418.2～564.1, 7.19～33.21, 0.82～2.37 and 4.98～32.77 g kg^{-1}, respectively in leaves of the plants, and in the range of 368.9 ～562.3, 3.98 ～22.65, 0.58～0.97 and 1.18 ～20.98 g kg^{-1}, respectively in litter of the plants. Among the eight species of plants, a decreasing order of non-nitrogen-fixing plant *Hippophae rhamnoides* > nitrogen-fixing plants > the other non-nitrogen-fixing plants was observed. The leaves were higher than the litter in content of total carbon, nitrogen, phosphorus and potassium, especially N content in the leaves, which was even slightly higher than the average of the country. But the P content in the leaves was lower than the average of the country. Among the three types of vegetations, a decreasing order of shrubbery > forest plants > grass was found in content of organic carbon in leaves; an order of shrubbery > grass > forest in TN and TP and an order of grass > shrubury > forest in TK. Eco-stoichiometric characteristics of C, N, P and K in leaves and litter varied with species of the plant and the ratio of N：P, P：K, N：K, C：N, C：P and C：K varied in the range of 7.16～22.45, 0.036～0.23, 0.70～4.55, 14.92～64.44, 218.54～557.36 and 12.78～121.14, respectively in leaves and in the range of 6.97～23.78, 0.076～0.64, 0.92～6.71, 16.09～160.28, 292.89～1096.02 and 20.24～795.31, respectively, in litter. In terms of N：P ratio in leaves, the three types of vegetations followed an order of shrubbery (18.86) > grass (15.44) > forest (14.68), indicating that P is the major limiting factor for growth of shrub plants, while N and P the two factors limiting development of forest and grass vegetations. 【Conclusion】It could, therefore, be concluded that for revegetation of the area, shrubs are the priority choice. All the findings in the study may provide theoretical and practical guidance for restoration and re-establishment of vegetation in the Zhungeer Heidaigou opencast coal mining area.

Key words Opencast coal mining; Plant types; Leaf; Litter; Ecological stoichiometry

（责任编辑：陈德明）

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net