DOI: 10.5846/stxb201806031237

高德新,张伟,任成杰,戴银月,乔文静,陈正兴,杨改河,韩新辉.黄土高原典型植被恢复过程土壤与叶片生态化学计量特征.生态学报,2019,39 (13): - .

Gao D X, Zhang W, Ren C J, Dai Y Y, Qiao W J, Chen Z X, Yang G H, Han X H.Ecological stoichiometry characteristics of soil and leaves during the recovery process of typical vegetation on the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(13): - .

黄土高原典型植被恢复过程土壤与叶片生态化学计量 特征

高德新^{1,2},张 伟^{1,2},任成杰^{1,2},戴银月^{1,2},乔文静^{1,2},陈正兴^{1,2},杨改河^{1,2},韩

1 西北农林科技大学农学院,杨凌 712100
2 陕西省循环农业工程技术研究中心,杨凌 712100

摘要:为揭示黄土高原典型人工植被恢复过程中植物叶片与土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)元素变化特征及其交互作用,以延安庙 咀沟流域恢复 20—40a 的刺槐(Robinia pseudoacacia)、柠条(Caragana korshinskii)、草地和坡耕地(对照)为研究对象,分析了各 样地植物叶片和土壤 C、N、P 化学计量的变化特征及相互关系。结果表明:从 20a 到 40a 的恢复过程中,3 种植被叶片 C 含量均 显著增加,草地叶片 P 含量显著升高,而刺槐、柠条叶片 N 和 P 含量则显著降低。刺槐、柠条及草地土壤 C、N、P 含量随着恢复 年限的延长而增加,比耕地分别增加了 70%—349%、27%—202%、13%—62%(P<0.05),其中刺槐的增幅最大。从增速来看,刺 槐和柠条林土壤表层 C、N 增速表现为前期(0—20a)大于后期(20—40a),而草地则相反。在 20—40a 的恢复过程中,刺槐、柠 条叶片 C:N、C:P 均显著增加,草地叶片 C:P、N:1P 则显著降低。恢复过程中,土壤 C:P 在刺槐和草地中显著增加,而土壤 N: 1P 仅在草地中显著增加,土壤 C:N 则没有显著变化。相关性分析显示叶片 C 和土壤 C、N、P 显著正相关,叶片 N、P 和土壤 N 显著正相关,叶片和土壤 N:1P 显著正相关,叶片 P、C:P 与土壤 C、N 增速显著相关,表明叶片 P 可以指示土壤 C、N 增速的变 化,而 N:1P 可以将植物和土壤联系起来。植被恢复过程中,叶片和土壤 C、N、P 含量及增速均发生显著变化,且存在密切的联 系,这种变化的趋势在刺槐、柠条和草地中有所不同。

关键词:黄土高原;生态化学计量;植被恢复;土壤;叶片;碳氮磷

Ecological stoichiometry characteristics of soil and leaves during the recovery process of typical vegetation on the Loess Plateau

GAO Dexin^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, REN Chengjie^{1,2}, DAI Yinyue^{1,2}, QIAO Wenjing^{1,2}, CHEN Zhengxing^{1,2}, YANG Gaihe^{1,2}, HAN Xinhui^{1,2,*}

1 College of Agronomy, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

2 Shaanxi Engineering Research Center of Circular Agriculture, Yangling 712100, China

Abstract: This study aimed to reveal the dynamics and interactions between plant leaves and soil carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) in the restoration of typical artificial vegetation on the Loess Plateau, through analysis of the contents and stoichiometric characteristics of C, N, and P in the leaves and soil of *Robinia pseudoacacia* and *Caragana korshinskii*, and the associated grassland growing for 20a and 40a in the Miaozuigou catchment area. An area of cropland was selected as the control. The results showed that, from 20a to 40a, the leaf C in the three restored vegetation types and leaf P

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0504601)

收稿日期:2018-06-03; 网络出版日期:2018-00-00

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: hanxinhui@nwsuaf.edu.cn

in the grassland were significantly increased. However, the leaf N and P contents in both R. pseudoacacia and C. korshinskii were significantly deceased. The content of C, N, and P in the soil significantly increased with time since afforestation. Compared with the farmland, the content of C, N, and P in the soil increased by 70-349%, 27-202%, and 13-62% (P < 0.05) respectively, particularly, in *Robinia pseudoacacia*. Regarding the growth rates of C and N in the topsoil of R. pseudoacacia and C. korshinskii, they were higher in the first 20a (0-20a) than during the late subsequent (20-40a), but in the grassland the opposite trend was observed. From 20 to 40a, both C:N and C:P in R. pseudoacacia and C. korshinskii were significantly increased, while C:P and N:1P in the grassland were significantly decreased. During the recovery process, soil C:P in Robinia pseudoacacia and Caragana korshinskii significantly increased, whereas significant increases in soil N:1P were only observed in the grassland and soil C:N did not change significantly. The correlation analysis showed that the leaf C was positively and significantly correlated with the C, N, and P in soil; leaf N and P were positively and significantly correlated with soil N; leaf N:1P was positively and significantly correlated with soil N:1P; and the P and C:P in leaves were positively and significantly correlated with the C and N in soil. These results suggest that leaf P reflects the growth rates of C and N in soil and that the N:1P ratio can link plants and soil. During recovery, both contents and growth rates of C, N, and P in soil and leaf changed greatly and differently in R. pseudoacacia, C. korshinskii, and grassland. In addition, the content of P can indicate the change in the growth rate and the N:1P ratio in leaf can link soil and leaf.

Key Words: Loess plateau; ecological stoichiometry; vegetation restoration; soil; folia; carbon, nitrogen, phosphorus

碳(C)氮(N)磷(P)是植物营养和土壤肥力的核心组成元素^[1],植物吸收养分同时以凋落物形式向土壤 归还养分,使得土壤和植物不断进行着 C、N、P 转化与累积的循环过程,从而促进陆地植被生态系统的演化与 恢复^[2]。因此,明确植物土壤 C、N、P 养分相对累积效应与平衡交互作用对于认知植被恢复过程与机理具有 重要的科学意义。近 10 年迅速发展起来的生态化学计量学正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^[3-4]。这为研究生态恢复过程植物-土壤系统关键养分元素的动态平衡和交互作用 提供了新的理论与方法^[5]。

目前关于植被-土壤生态化学计量的研究多集中在不同生境、生态系统下各类型植被的生态计量特征, 比如在热带雨林^[6]、沙漠^[7]、黄土高原^[8]以及不同地形^[9]、海拔^[10]和气候条件下的生态化学计量特征^[11]。于 此同时,对不同恢复阶段的研究也有所涉及。如针对不同演替阶段的云南普洱季风常绿阔叶林的研究发现, 植物及土壤 N、P 含量均随着群落演替先减少后增加^[12]。而南亚热带森林不同演替阶段的研究发现,植物叶 片 N、P 含量演替过程中降低,但土壤的 N 含量呈增加趋势^[13]。此外姜沛沛等人针对黄土高原不同林龄的油 松林叶片和土壤化学计量的研究表明,叶片与土壤 C、N 含量均随着林龄增加先增加后降低,但是叶片与土壤 C、N 关系不显著^[14]。由于研究的区域环境、植被类型、演替时间等存在差异,不同恢复阶段植物、土壤生态化 学计量变化趋势存在差异和较大不确定性。并且,在不同恢复年限尺度上,大多研究仅分析了养分及其化学 计量随恢复年限变化的特征^[12,15-16],而针对不同恢复过程中养分变化速率的研究比较少见。养分的变化速率 会通过养分含量的变化影响化学计量比。所以可以反映演替过程中植物和土壤养分的变化特征和恢复状态。 因此研究不同恢复阶段植被-土壤生态化学计量特征及其变化速率对揭示恢复过程中养分的变化特征有重 要的参考价值。

黄土高原是生态环境脆弱区,植被恢复措施使土壤质量尤其是养分含量得到了明显的提升^[17]。但是,目前该地区植物和土壤养分的转化特征与平衡互作过程还不清楚。因此,本研究以延安庙咀沟流域恢复 20—40a 的乔、灌、草 3 种典型恢复植被土壤与叶片为研究对象,并以坡耕地为对照,探讨植被恢复过程中土壤与叶片生态化学计量变化特征及其交互影响,揭示黄土高原区典型植被恢复类型 C、N、P 养分平衡互作关系及累积效应,以期为该区域人工植被恢复过程与机制的深入研究提供科学依据。

1 材料方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕北黄土高原延安庙咀沟小流域(107°38′—108°32′E, 36°33′—37°24′N,海拔高度 1233— 1809 m)。该区年平均气温 7.8℃,无霜期 96—146 d,年平均降雨量为 478.3 mm,且 64%以上集中在 7—9 月 份,属典型的干旱半干旱地区。该研究区属于梁峁沟壑区,土壤类型主要是黄绵土,土质主要是砂质壤土。该 区针对生态退化进行了长期综合治理,特别是 1999 年开始实施退耕还林工程,植被恢复类型有乔木、灌木、草 地。乔木以刺槐(Robinia pseudoacacia)为主、灌木以柠条(Caragana korshinskii)为主。所选样地的基本信息情 况见表 1。

Table 1 The basic status of sampling sites								
样地 Sites	坡向 Aspect	坡度 Slope/(°)	海拔 Altitude/m	地理位置 Location	林下草本 Understory herbs	рН	容重 Soil bulk density/ (g/cm ³)	含水量 Soil water content/%
刺槐 20a	北偏东 10°	26	1247	109°21′ E 36°40′ N	铁杆蒿+长芒草 Artemisia sacrorum+ Stipa bungeana Trin	8.36	1.17	22.30
刺槐 40a	北偏东 35°	23	1265	109°21′ E 36°40′ N	茭蒿+葎草 Artemisia leucophylla + Humulus scandens	8.32	1.12	20.14
柠条 20a	北偏东 10°	20	1193	109°20' E 36°39' N	铁杆蒿+阿尔泰狗娃花 Artemisia sacrorum + Heteropappus altaicus	8.42	1.19	17.62
柠条 40a	北偏西 24°	18°	1258	109°21′ E 36°39′ N	铁杆蒿 Artemisia sacrorum	8.39	1.16	16.20
草地 20a	北偏西 20°	20	1239	109°21′ E 36°40′ N	达乌里胡枝子+铁杆蒿 Lespedeza dahurica+ Artemisia sacrorum	8.48	1.21	12.82
草地 40a	北偏东 32°	24	1273	109°21′ E 36°39′ N	茭蒿+ 铁杆蒿 Artemisia leucophylla + Artemisia sacrorum	8.45	1.19	14.89
农田	北偏东 30°	22	1261	109°21′ E 36°39′ N	小米 Setaria italica	8.51	1.23	10.53

表 1 样地基本情况 ble 1 The basic status of sampling

1.2 样地设置与采样

选择研究区内恢复 20a、40a 的刺槐、柠条、草地 3 种植被为研究对象,和附近坡耕地作为恢复 0 年对照, 于 2016 年 7 月份植物生长旺盛期采集叶片和土壤样品。采样时选择坡向、坡度、坡位和海拔相近,且均为坡 耕地退耕而来的样地。每个样地选择 3 个 20 m×20 m 标准采样小区,在每个样区内按照"S"型布设 12 个点, 用土钻法取 0—10、10—20、20—30 cm 共 3 层的土样,将各采样点同层土样充分混合后按四分法取样,然后装 入塑封袋作为该土层待测土样。同时挖取土壤剖面,用环刀法测定土壤容重。对于植物叶片的采集,在每个 样区内随机选择五个植株,草本植物叶片由小样方内完全收割的地上部分按照四分法获得,刺槐、柠条选择植 株中上部、各个方向成熟新鲜叶片,每个样区采集 8—10 g 叶片装入网袋,带回实验室。

1.3 样品处理与测定

采集的土样带回实验室自然风干,仔细除去其中动植物残体和石块后过2 mm 筛,装袋封存。采集的植物叶片 105℃杀青后置于 60℃烘箱烘干,经研磨后过 0.25 mm 筛装袋封存。叶片和土壤有机碳采用重铬酸钾 氧化外加热法测定;叶片全氮、全磷用浓硫酸-过氧化氢消煮,土壤全氮、全磷分别用浓硫酸-催化剂,浓硫酸-高氯酸消煮,最后采用流动分析仪测消煮液全氮、全磷含量^[18]。 1.4 数据分析

本研究中叶片和土壤 C、N、P 比均采用元素质量比,C、N、P 养分含量均以单位质量的养分含量均值表示。不同植被类型和恢复年限的土壤、叶片 C、N、P 及化学计量比差异显著性采用单因素方差分析和 Duncan 法进行检验,显著性水平为 P<0.05.。土壤 C、N、P 年变化速率(SCGR,SNGR,SPGR)用 0—20a、20—40a 的年 平均变化量计算得到,并采用相同方法进行三种植被不同恢复阶段的差异性检验。以上数据整理与分析均在 Excel 2010 与 SPSS 20.0 软件中进行,作图采用 Origin 2016 软件完成。同时,利用 Canoco 5.0 对叶片和土壤进 行冗余分析(RDA),分析叶片对土壤养分的影响。

2 结果与分析

2.1 植被恢复过程叶片 C、N、P 含量及其化学计量比变化特征

如表 2 所示,除了叶片 P、N:1P 不受恢复年限显著影响外,叶片 C、N、P 含量及其化学计量均受植被类型 和林龄显著影响。在 20—40a 的恢复过程中,刺槐、柠条、草地叶片 C 含量分别显著增加了 11%、9%、6%(图 1)。但刺槐叶片 N 和 P 含量则分别显著下降了 8%、10%,柠条叶片 N 和 P 含量均下降 11%;草地叶片 N 含量未发生显著变化,但 P 含量显著升高 24%。不同植被叶片 C、N、P 含量不均衡变化也导致其化学计量比发 生显著变化。从 20a 到 40a 的恢复过程中,刺槐和柠条叶片 C:N、C:P 分别显著增加了 21%、22%,而叶片 N: 1P 没有显著变化。在恢复过程中,草地叶片 C:N 未发生显著变化,但 C:P 和 N:1P 分别下降了 15%和 13% (*P*<0.05)。

Table 2 GLM analysis of leaf C, N, P stoichiometry								
自变量 Variable	因变量 Dependent variable	F	Р	因变量 Dependent variable	F	Р		
植被类型	LC	20.256	0.000	LCN	181.507	0.000		
Vegetation types	LN	368.144	0.000	LCP	66.276	0.000		
	LP	115.240	0.000	LNP	41.842	0.000		
林龄 Stand age	LC	49.138	0.000	LCN	17.146	0.001		
	LN	10.275	0.008	LCP	10.314	0.007		
	LP	0.779	0.000	LNP	1.695	0.217		

表 2 叶片 C、N、P 化学计量特征 GLM 分析 able 2 GLM analysis of leaf C、N、P stoichiometr

LC:叶片碳含量 Leaf carbon content;LN:1 叶片氮含量 Leaf nitrogen content;LP:叶片磷含量 Leaf phosphorus content;LCN:1 叶片碳氮比 Leaf carbon to nitrogen ratio;LCP:叶片碳磷比 Leaf carbon to phosphorus ratio、LNP:叶片氮磷比 Leaf nitrogen to phosphorus ratio

2.2 植被恢复过程土壤 C、N、P 含量及其化学计量比变化特征

植被类型和土层显著影响土壤 C、N、P 含量及其计量特征,但是对土壤 C:N 没有显著影响,而林龄仅对 土壤 N 和 C:N 有显著影响(表 3)。3 种植被不同恢复年限土壤 C、N、P 含量相较耕地得到了显著增加,且随 着恢复年限的增加而增加(图 2)。表层 C、N、P 含量显著高于中层和下层,表现出明显的表层富集效应。其 中刺槐林土壤表层 C、N、P 含量相较耕地分别增加了 285%、173%、46%,恢复效果最好。3 种植被 SOC 含量 在刺槐中最大(P<0.05),为草地、柠条 SOC 含量的 124%—201%。恢复 20a 时土壤 TN 含量在草地中最小(P <0.05),为刺槐、柠条土壤 TN 含量的 52%—57%,恢复 40a 时在刺槐中最大(P<0.05),为草地和柠条土壤 TN 含量的 109%—128%。土壤 TP 含量在 3 种植被间的大小顺序和土壤 TN 相同(P<0.05)。在 20—40a 的恢复 过程中,土壤化学计量比值呈现不同的变化特征。3 种植被表层土壤 C:N 在恢复过程中没有明显变化,稳定 在 9.80—11.57,刺槐、柠条、草地土壤 C:P 则均显著增加(图 2)。土壤 N:1P 在草地中由 14.54 显著降低为 12.66,在刺槐、柠条恢复过程中没有明显变化。 叶碳 Leaf carbon/(g/kg)

叶片C:N Leaf C:N

600

500

400

300

200

100

0

25

20

15

10

5

0







Fig.1 The content of C、N、P in leaf and its stoichiometric characteristics under different revegetation types and forest age CH:刺槐 R. pseudoacacia; NT: 柠条 C. korshinskii; CD: 草地 grassland; 图中大写字母代表不同植被间叶片指标在 P<0.05 水平上差异显著

Table 3 GLM analysis of soil C, N, P stoichiometry						
自变量 Variable	因变量 Dependent variable	F	Р	因变量 Dependent variable	F	Р
植被类型	SC	5.897	0.005	SCN	0.167	0.847
Vegetation types	SN	10.130	0.000	SCP	3.383	0.042
	SP	9.424	0.000	SNP	25.293	0.000
	SCGR	5.897	0.005	SNGR	10.130	0.000
	SPGR	9.424	0.000			
林龄 Stand age	SC	4.745	0.034	SCN	8.006	0.007
	SN	15.560	0.000	SCP	0.372	0.545
	SP	0.636	0.429	SNP	0.241	0.626
	SCGR	4.745	0.034	SNGR	15.560	0.000
	SPGR	0.636	0.429			
土层 Soil layer	SC	795.444	0.000	SCN	19.487	0.000
	SN	145.609	0.000	SCP	174.878	0.000
	SP	59.546	0.000	SNP	40.159	0.000
	SCGR	429.087	0.000	SNGR	155.494	0.000
	SPGR	53.612	0.000			

表 3 土壤 C、N、P 化学计量特征 GLM 分析

SC:土壤碳含量 Soil carbon content;SN:1 土壤氮含量 Soil nitrogen content;SP:土壤磷含量 Soil phosphorus content;SCN:1 土壤碳氮比 Soil carbon to nitrogen ratio;SCP:土壤碳磷比 Soil carbon to phosphorus ratio;SNP:土壤氮磷比 Soil nitrogen to phosphorus ratio。SCGR:土壤碳增速 Growth rate of soil carbon;SNGR:土壤氮增速 Growth rate of soil carbon;SNGR:土壤氮增速 Growth rate of soil nitrogen;SPGR:土壤磷增速 Growth rate of soil phosphorus

2.3 土壤 C、N、P 含量变化速率

植被类型、土层和林龄对土壤C、N、P含量和变化速率影响显著(图3)。不同恢复阶段内,3种植被土壤C、N、P的变化速率存在显著差异,且随土层的加深也有所不同(图3)。从前期(0—20a)到后期(20—40a)的恢复过程中,刺槐和柠条表层土壤C增速分别显著下降了42%、57%,N增速均显著下降了60%、54%。而草地土壤C、N增速则显著升高了47%、303%。除了刺槐、柠条中层土壤N增速最大外,土壤C和N增速随着土



Fig.2 The content of C、N、P in Soil and its Stoichiometric characteristics of different revegetation types and forest ages FL:耕地 Farmland;不同大写字母代表同一土层不同植被间的差异显著(P<0.05),不同小写字母代表同一植被不同土层间的差异显著(P<0.05)

层加深而递减。土壤 C 增速的大小顺序为刺槐>柠条>草地,土壤 N 增速恢复前期时在刺槐中最大,分别是柠条、草地 N 增速的 119%、536%;恢复后期时柠条土壤表层 C 增速最小,草地土壤表层 N 增速最大,分别为刺槐、柠条土壤表层 N 增速的 191%、196%。3 种植被不同恢复过程土壤 P 增速没有一致的趋势,随着土层变化差异较大。

2.4 土壤与叶片 C、N、P 含量及生态化学计量比关系

对不同恢复过程土壤生态化学计量特征与叶片因子进行 RDA 分析(图 4),结果表明:叶片 C 和土壤 C、N、P 呈极显著正相关,叶片 N、P 和土壤 N 显著正相关。叶片 P 和土壤 N、P 增速显著正相关,而叶片 C:P 和 土壤 C、N 增速显著负相关。叶片和土壤 N:1P 呈显著正相关。结果表明土壤含水量、p H、容重对植物和土 壤 C、N、P 含量及其化学计量比有显著影响:土壤含水量和叶片 C、N、P、N:1P 呈正相关,土壤 p H、容重和叶 片 C 呈负相关。叶片因子的贡献率排序表明,叶片指标对土壤的影响程度大小为 C>P>N>C:P>C:N>N:1P, 其中 C、N、P 达到显著水平。

3 讨论

6

3.1 不同植被恢复过程叶片与土壤 C、N、P 含量特征及其相互关系

植被恢复过程中,叶片和土壤养分含量均发生了显著变化(图 2、图 3)。研究结果显示刺槐、柠条在恢复 过程中叶片 N、P 含量显著下降,而草地叶片 N、P 含量均显著增加。这与 Yang Cao 等人在纸坊沟的研究结果 一致^[19]。前人的相关研究表明水分是黄土高原植物生长过程重要的制约因素^[20],水分缺少影响植物根系对 根系矿质元素的吸收,从而导致植物养分含量减少。本研究中土壤含水量和叶片 C、N、P 含量呈显著正相关, 并且刺槐、柠条土壤水分在恢复后期减少,而草地土壤水分在恢复后期增加(表 1)。其原因可能是刺槐、柠 条、草地三种植被的水分利用策略有所区别。刺槐、柠条群落在恢复初期充分利用水资源生长,这也导致水分 消耗过快而使后期生长受到水分限制^[21],因此植物吸收的 N、P 随之减少。而草地耗水则相对较少,后期生 长较快,吸收的 N、P 也随之增加。在恢复过程中,叶片 C 和土壤 C、N、P 含量变化趋势一致,均明显增加,是



图 3 不同植被类型和林龄土壤 C、N、P 增速 Fig.3 Growth rate in different revegetation types and forest ages

对土壤养分贡献率最大的因子。这是因为植物在恢复 过程中以凋落物形式不断向土壤中输入养分,使得土壤 养分显著提升。但是三种植被的土壤 C、N、P 增速在恢 复过程中会发生变化。本研究中刺槐和柠条林的土壤 表层 C、N 增速在恢复过程中显著降低,而草地则呈增 高趋势。这是因为刺槐、柠条和草地后期水分变化导致 的植物生长速率的变化,而使得三种植被的叶片归还速 率发生改变,进而导致土壤 C、N、P 增速发生变化。而 且刺槐、柠条恢复后期水分的缺少也会降低微生物活 性^[22-23],进而导致凋落物输入效率降低。其中刺槐林 中土壤凋落物最多,与中下层土壤相比,其土壤表层养 分和水分等因子占比较高。因此土壤有机碳增速从表 层到下层依次递减,并且恢复前期土壤表层 C、N 增速 在刺槐中最大。RDA 分析显示土壤 C、N、P 增速和叶 片 P、C:P 显著相关,表明土壤 C、N 和 P 增速受叶片 P



的显著影响。而 P 是微生物合成 RNA 的原料,与微生物的生长有密切的联系^[24]。植物对土壤 P 的吸收利用 显著影响微生物对 P 的吸收,从而影响微生物生长。因此叶片 P 通过调节微生物生长而显著影响凋落物的 分解速率和土壤养分的输入速率。本研究中,土壤 N 和叶片 N、P 显著正相关,表明土壤 N 对植物养分影响较 大,这与豆科植物根系的固氮作用密切相关。

3.2 不同植被过程叶片与土壤 C、N、P 的生态化学计量特征及相互关系

叶片 C:N、C:P 可以反映植物的生长状况,与植物生长速率呈负相关^[25]。刺槐、柠条在恢复过程中叶片 C:N、C:P显著降低,而在草地恢复过程中呈增加趋势。结果表明刺槐、柠条的生长有所减缓,而草地在恢复 后期,植物生长相对较快。草地叶片 N:1P 在恢复过程中从 14.54 降为 12.66,有研究表明叶片 N:1P 可以指 示植物的养分限制情况,当N:1P<14时植物主要受N限制,当N:1P在14和16之间时,受N、P共同限制,当 N:1P>16 时植物主要受 P 限制^[26]。根据此标准,草地在恢复过程中 N 限制的程度在增加。草地后期生长较 快,因此植物吸收更多的 P 来合成 RNA 以满足代谢的需要, 而 P 含量的增加使 N 含量相对降低, 进而导致 N 限制程度增加。而刺槐、柠条主要是受 P 限制,这和姜沛沛等人的研究结果一致^[14]。原因主要是刺槐、柠条 的固氮作用使植物根系 N 含量较多,植物吸收的 N 也因此较多,而导致 P 含量相对缺少。然而此标准是否适 合本地区还需要进一步开展研究验证。本研究中,叶片和土壤 N:1P 显著相关,这与 Yang Cao 等人在纸坊沟 的研究结果相同[19]。而章广琦等人的研究显示相关性不显著[8]。主要是因为该地区土壤贫瘠,植物所需养 分主要来自于土壤,因此受土壤N:1P显著影响。N、P是植物中各种蛋白质和遗传物质的重要组成元素,参 与植物的光合作用和细胞分裂,而植物 N、P 主要来自对土壤养分的吸收,因此土壤中 N、P 含量在恢复过程中 的相对变化与叶片中 N:1P 显著正相关,这也表明叶片 N:1P 可以指示土壤 N:1P 的变化, N:1P 可以将植物 和土壤联系起来。然而本研究中草地土壤和叶片 N:1P 呈相反的变化趋势。这可能是由于草地在养分限制 的情况下,会改变自身养分利用策略以适应环境,使得植物和土壤在恢复过程相对独立,引起养分发生变化。 恢复过程中土壤C:N较为稳定,C:P显著增加,这与牛瑞龙等人的研究一致^[27],主要是因为C、N作为结构成 分具有一致性。而土壤 P 在恢复过程中变化相对较小,使得 C:P 由土壤 C 含量主导。

4 结论

土壤和植物叶片碳氮磷含量及其化学计量比特征在恢复过程中呈不同的变化特征,在 20—40a 恢复阶段,刺槐和柠条叶片养分组成倾向于积累更多的 C 和相对少的 N、P,这也使得叶片 C:N、C:P 在此恢复过程中增加。草地在恢复过程叶片 N、P 相对 C 增加较多,P 相对 N 增加也较多,因此 C:N、C:P、N:1P 均呈下降趋势。土壤 C、N、P 含量在恢复后得到了显著提升,并且 C、N 相对 P 增加量更多,使得土壤 C:P、N:1P 在恢复中升高。但是恢复过程中土壤 C、N 的累积速率在刺槐和柠条中显著降低,而在草地呈升高趋势。并且恢复过程中叶片 C 含量对土壤 C、N、P 含量有显著影响,叶片 P 显著影响土壤 C、N 的累积速率。同时叶片 N、P 受到土壤 N 的显著影响,叶片和土壤 N:1P 紧密相关,表明 N:1P 可以将植物和土壤联系起来。

参考文献(References):

- [1] Reich P B, Tjoelker M G, Machado J L, Oleksyn J. Universal scaling of respiratory metabolism, size and nitrogen in plants. Nature, 2006, 439 (7075): 457-461.
- [2] Fan H B, Wu J P, Liu W F, Yuan Y H, Hu L, Cai Q K. Linkages of plant and soil C:N:1P stoichiometry and their relationships to forest growth in subtropical plantations. Plant and Soil, 2015, 392(1/2): 127-138.
- [3] 曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索. 植物生态学报, 2005, 29(6): 1007-1019.
- [4] 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.
- [5] 俞月凤, 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 王克林, 文丽, 范夫静. 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.
- [6] 卢同平, 王艳飞, 王黎明, 林永静, 武梦娟, 张文翔, 牛洁. 西双版纳热带雨林土壤与叶片生态化学计量特征的干湿度效应. 生态学报, 2018, 38(7): 2333-2343.
- [7] 周晓兵,陶冶,张元明.塔克拉玛干沙漠南缘荒漠绿洲过渡带不同土地利用影响下优势植物化学计量特征.草业学报,2018,27(5): 15-26.
- [8] 章广琦,张萍,陈云明,彭守璋,曹扬.黄土丘陵区刺槐与油松人工林生态系统生态化学计量特征.生态学报,2018,38(4):1328-1336.
- [9] 王宝荣,杨佳佳,安韶山,张海鑫,白雪娟.黄土丘陵区植被与地形特征对土壤和土壤微生物生物量生态化学计量特征的影响.应用生

态学报, 2018, 29(1): 247-259.

- [10] 陈晓萍,郭炳桥,钟全林,王满堂,李曼,杨福春,程栋梁.武夷山不同海拔黄山松细根碳、氮、磷化学计量特征对土壤养分的适应.生态 学报,2018,38(1):273-281.
- [11] 葛晓改,曾立雄,肖文发,黄志霖,周本智.模拟N沉降下不同林龄马尾松林凋落叶分解-土壤C、N化学计量特征.生态学报,2017,37 (4):1147-1158.
- [12] 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.
- [13] 刘兴诏,周国逸,张德强,刘世忠,褚国伟,闫俊华.南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中 N、P 的化学计量特征.植物生态学报, 2010,34(1):64-71.
- [14] 姜沛沛,曹扬,陈云明,王芳.不同林龄油松(Pinus tabulaeformis)人工林植物、凋落物与土壤 C、N、P 化学计量特征. 生态学报, 2016, 36 (19): 6188-6197.
- [15] 白雪娟,曾全超,安韶山,张海鑫,王宝荣.黄土高原不同人工林叶片-凋落叶-土壤生态化学计量特征.应用生态学报,2016,27(12): 3823-3830.
- [16] 赵晓单,曾全超,安韶山,方瑛,马任甜.黄土高原不同封育年限草地土壤与植物根系的生态化学计量特征.土壤学报,2016,53(6): 1541-1551.
- [17] 郭曼. 黄土丘陵区土壤质量对植被自然恢复过程的响应与评价. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009: 139-139.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [19] Cao Y, Chen Y M. Coupling of plant and soil C:N:1P stoichiometry in black locust (*Robinia pseudoacacia*) plantations on the Loess Plateau, China. Trees, 2017, 31(5): 1559-1570.
- [20] 胡良军, 邵明安. 黄土高原植被恢复的水分生态环境研究. 应用生态学报, 2002, 13(8): 1045-1048.
- [21] 韩蕊莲,梁宗锁,侯庆春,邹厚远.黄土高原适生树种苗木的耗水特性.应用生态学报,1994,5(2):210-213.
- [22] 赵彤, 闫浩, 蒋跃利, 黄懿梅, 安韶山. 黄土丘陵区植被类型对土壤微生物量碳氮磷的影响. 生态学报, 2013, 33(18): 5615-5622.
- [23] 刘洋,黄懿梅,曾全超.黄土高原不同植被类型下土壤细菌群落特征研究.环境科学, 2016, 37(10): 3931-3938.
- [24] Ilstedt U, Singh S. Nitrogen and phosphorus limitations of microbial respiration in a tropical phosphorus-fixing acrisol (ultisol) compared with organic compost. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(7): 1407-1410.
- [25] Ågren G I. The C:N:1P stoichiometry of autotrophs-theory and observations. Ecology Letters, 2004, 7(3): 185-191.
- [26] Tessier J T, Raynal D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation. Journal of Applied Ecology, 2003, 40(3): 523-534.
- [27] 牛瑞龙,高星,徐福利,王渭玲,王玲玲,孙鹏跃,白小芳.秦岭中幼林龄华北落叶松针叶与土壤的碳氮磷生态化学计量特征.生态学报,2016,36(22):7384-7392.