

DOI: 10.5846/stxb201709131649

赵珊宇, 黎锦涛, 孙学凯, 曾德慧, 胡亚林. 樟子松人工林原产地与不同自然降水梯度引种地土壤和植物叶片生态化学计量特征. 生态学报, 2018, 38(20): - .

Zhao S Y, Li J T, Sun X K, Zeng D H, Hu Ya L. Responses of soil and plant stoichiometric characteristics along rainfall gradients in Mongolian pine plantations in native and introduced regions. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(20): - .

樟子松人工林原产地与不同自然降水梯度引种地土壤和植物叶片生态化学计量特征

赵珊宇^{1,2}, 黎锦涛^{1,2}, 孙学凯¹, 曾德慧¹, 胡亚林^{1,3,*}

1 中国科学院沈阳应用生态研究所大青沟沙地实验站, 沈阳 110016

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 福建农林大学林学院, 福州 350002

摘要:降水格局是影响陆地生态系统结构和过程的重要环境要素, 尤其对于干旱/半干旱地区, 降水变化是植物生长驱动的关键生态因子。目前, 针对降水变化对陆地生态系统 C、N、P 等元素生物地球化学循环过程影响开展了大量研究。然而, 关于沙地樟子松重要引种地科尔沁沙地自然降水梯度下沙地樟子松人工林土壤、植物生态化学计量特征的研究未见报道。因此, 本研究以樟子松原产地红花尔基和引种地科尔沁沙地自然降水梯度下 4 个典型沙地樟子松人工林为对象, 研究樟子松引种地降水变化对土壤(0—10, 10—20 cm 和 20—40 cm)和植物(1 年和 2 年生叶)生态化学计量特征的影响。研究结果发现: (1) 与红花尔基原产地樟子松人工林相比, 科尔沁沙地引种的樟子松人工林土壤 C、N、P 元素含量显著降低; (2) 科尔沁沙地自西向东, 随降水量增加, 沙地樟子松人工林土壤 C、N、P 含量以及 C:P 和 N:P 表现为逐渐增加趋势, 而土壤 C:N 呈减少趋势; (3) 随着降水量增加, 樟子松叶 C 含量呈下降趋势, 叶 N 含量和 N:P 比值呈增加趋势, 植物叶 P 含量无一致性规律; (4) 樟子松叶片 P 含量与土壤 C、N、P 含量呈极显著正相关关系, 而叶片 C 和 N 含量与土壤 C、N、P 含量无显著相关性。本研究表明, 沙地樟子松引种地科尔沁沙地土壤 C、N、P 养分比较缺乏, 且随着降水增加土壤 N 养分限制降低, 而土壤 P 养分限制增加。本研究从生态化学计量特征角度, 为今后开展科尔沁沙地不同降水梯度条件下引种樟子松人工林提供理论依据。

关键词:科尔沁沙地; 降水梯度; 生态化学计量; 土壤养分; 樟子松人工林

Responses of soil and plant stoichiometric characteristics along rainfall gradients in Mongolian pine plantations in native and introduced regions

ZHAO Shanyu^{1,2}, LI Jintao^{1,2}, SUN Xuekai¹, ZENG Dehui¹, HU Yalin^{1,3,*}

1 Daqinggou Ecological Station, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Forestry College, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

Abstract: Rainfall is one of most important environmental factors influencing ecosystem structures and processes, and changes in rainfall can alter plant growth in arid/semi-arid regions. Currently, the impacts of rainfall patterns on the biogeochemical cycles of C, N, and P in terrestrial ecosystems have been well studied. However, a knowledge gap exists with regard to the changes in soil and plant stoichiometric characteristics along rainfall gradients in Mongolian pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) plantations. We selected one native Mongolian pine plantation and four plantations along a rainfall gradient in the Horqin Sandy Land. We measured stoichiometric characteristics in the soil (0—10, 10—20, and 20—40 cm) and leaves (1- and 2-year old). Our results showed that: (1) Soil C, N, and P concentrations in Mongolian pine

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41271318); 中国科学院青年创新促进会会员启动课题

收稿日期:2017-09-13; **网络出版日期:**2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huyi@iae.ac.cn

plantations in the Horqin Sandy Land were significantly lower than those in native Mongolian pine plantation; (2) Soil C, N, and P concentrations and soil C:P and N:P increased with increasing rainfall in the Horqin Sandy Land, but soil C:N decreased along the rainfall gradient; (3) Leaf C concentration decreased, and leaf N concentration and N:P increased with increasing rainfall, but there was no clear trend for leaf P concentration along a rainfall gradient; (4) there were significant positive relationships between leaf P concentration and soil C, N, and P concentrations, but not for leaf C and N. Our results implied that soil nutrients limit the growth of Mongolian pines in the Horqin Sandy Land compared with growth in native land. Furthermore, the soil N limitation decreased with increasing rainfall, but soil P limitation increased. Our results could improve the management of Mongolian pine plantations following introduction into the Horqin Sandy Land.

Key Words: Horqin Sandy Land; rainfall gradient; stoichiometric ratio; soil nutrient concentration; Mongolian pine plantation

生态化学计量学是近年来新兴起来的研究生态系统营养元素平衡关系的学科^[1-2],并广泛用于研究生物与环境间元素平衡如何驱动生态系统结构和功能^[3]。生态化学计量学的产生最初是由 Redfield 发现海洋浮游植物 C:N:P 接近于海水 C:N:P 比值,由此促使很多生态学家开始寻找陆地生态系植物与土壤是否存在这种化学元素计量比关系^[4]。生态化学计量学可以从元素比值关系的角度把环境、细胞、器官、种群和群落等不同层次的研究进行综合,为揭示生态系统土壤-植物养分供给以及平衡提供了新的研究思路 and 手段^[5-7]。目前,生态化学计量比被广泛应用于限制性元素的判断^[8]、植物适应策略^[9]以及全球碳、氮、磷生物地球化学循环等方面^[10]。

近年来,国内外对土壤与植物生态化学计量特征与环境因子关系开展了一系列研究^[11-20]。例如,Elser 等发现植物叶片养分浓度与 CO₂ 浓度有关,CO₂ 浓度的增加能够改变 C 与其他元素浓度比值^[13]。Stevens 等报导 N 沉降的增加显著降低土壤和植物 C:N,但显著提高土壤和植物的 N:P^[14]。有研究发现,植物叶片 N 和 P 含量随年均温度增加而减少,而 N:P 随年均温度增加而增加^[12,15-16],但有研究发现 N:P 随年均温度增加而减少^[17]。Körner 研究发现随海拔升高,植物叶片 N、P 含量呈增加的趋势^[18]。于海玲等研究发现青藏高原不同功能植物群落中植物 N 与纬度无线性关系,P 含量随纬度升高呈降低趋势^[19]。丁小慧等报道在呼伦贝尔草地沿经度梯度上降水增加,土壤与植物群落 C、N 和 P 元素含量显著增加^[20]。虽然,目前有关降水变化对陆地生态系统 C、N、P 等元素生物地球化学循环过程影响已开展了大量研究^[21-23],但有关自然降水梯度对植物-土壤生态化学计量特征的研究依然不足^[24]。

樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) 是欧洲赤松的变种,以其较强的耐寒、耐旱、耐土壤贫瘠等优良特性,被广泛用于“三北防护林”和“退耕还林”等重大林业生态工程建设。自 20 世纪 90 年代以来,较早引种的樟子松人工林出现生命周期缩短和生产力水平降低等衰退现象^[25],而红花尔基原产地樟子松并未出现衰退问题。水分是干旱/半干旱地区沙地生态系统生产力主要限制因子^[25-27],被认为是沙地樟子松人工林衰退的最重要的驱动因素^[25]。因此研究樟子松人工林对降水梯度变化的响应,对其可持续利用具有重要意义。然而,目前有关沙地樟子松人工林土壤和植物生态化学计量特征沿自然降水梯度变化的研究未见报道。因此,本文选择科尔沁沙地自然降水梯度上傅家、章古台、奈曼、乌兰敖都沙地樟子松林引种地和原产地红花尔基沙地樟子松人工林为研究对象,研究沙地樟子松由原产地引种到科尔沁沙地后樟子松土壤和植物叶片化学计量特征沿自然降水梯度的变化。通过比较樟子松原产地与引种地不同降水梯度上沙地樟子松人工林土壤和植物化学计量特征,以期揭示沙地樟子松人工林引种后水分驱动的衰退机理。

1 研究材料与方法

1.1 研究样地概况

研究地区位于我国北方科尔沁沙地(图 1),包括乌兰敖都、奈曼、章古台、傅家。气候类型分别为典型半干旱、半干旱-亚湿润和亚湿润气候区。红花尔基作为樟子松林的原产地,是我国最具代表性天然樟子松的集

中分布区,被誉为樟子松的故乡,该区域位于大兴安岭西坡中段、呼伦贝尔沙地南端。具体研究样地概况见表 1。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集

2016 年 8 月,沿降水梯度分别在科尔沁沙地选择傅家、章古台、奈曼、乌兰敖都 4 个沙地樟子松引种地和原产地红花尔基作为研究地区。在每个研究地区设置 4 块 30 年左右的沙地樟子松人工林样地,在每块林地内设置 10 m × 10 m 调查样方。每个样方内随机选 5 个点,用土钻(直径 4 cm)按 0—10,10—20,20—40 cm 深度分层取土样,将同一样方内 5 个样点各土层分别混合为 1 个土壤样品,装入有冰袋的保温箱,立即带回实验室,共采集土壤样品 60 个。同时,在每个样方内随机选择 4 棵生长状况相近的樟子松,用高枝剪取树冠层中上部枝条,收集 1 年生叶和 2 年生叶片样品,共采集 40 个植物叶片样品。土壤样品挑去粗根和石块等杂物,过 2 mm 筛,并在自然条件下风干,磨碎后过 0.25 mm 筛。植物样品在 65℃ 条件下烘干 48 h,烘干的样品用粉碎机粉碎过 0.25 mm 筛。

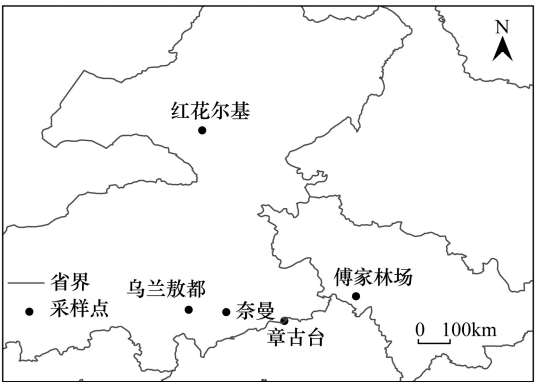


图 1 研究样地地理位置分布

Fig.1 Geographical location of the studied sites

表 1 研究样地气候和土壤类型概况

Table 1 Characteristics of climate and soil types in the studied stands

研究样地 Study site	经纬度 Latitude and longitude	海拔 Altitude/m	年均温度 MAT/℃	年降水量 MAP/mm	年蒸发量 Annual evaporation/mm	土壤类型 Soil type
傅家林场	43°25'N, 123°84'E	130—142	6.2	600	1800	风沙土
章古台	42°43'N, 122°22'E	212—230	6.2	475	1550	风沙土
奈曼	42°58'N, 120°43'E	360—369	6.3	366	1935	风沙土
乌兰敖都	43°02'N, 119°39'E	484—505	6.2	284	2250	风沙土
红花尔基	48°08'N, 120°02'E	730—860	-1.5	344	1174	砾质粗砂沙土、黑钙土

MAT:年均温 mean annual temperature;MAP:年降水 mean annual precipitation

1.2.2 样品分析

土壤和植物全 C 和全 N 含量用元素分析仪 (Vario CUBE,Elementar,德国)测定;土壤和植物全 P 含量采用 5mL 浓 H₂SO₄消煮,定容至 50 mL^[28],随后采用连续流动分析仪 (Bran +Luebbe,德国)进行测定。

1.3 数据处理

数据用 Excel 2013 处理后,采用 SPSS Statistics 19.0 软件进行统计分析。采用双因素方差分析检验降水梯度与土层对土壤 C、N、P 含量以及 C:N、C:P、N:P 比值的交互性作用,降水梯度与叶龄对植物叶片 C、N、P 含量以及 C:N、C:P、N:P 比值的交互性作用,并采用最小显著差异法 (LSD) 进行多重比较;采用 person 相关分析土壤和植物 C、N、P 元素含量相关性。差异显著和极显著水平分别设置为 $P=0.05$ 和 $P=0.01$ 。

2 结果与分析

2.1 土壤生态化学计量特征

降水和土层深度对土壤 C、N 和 P 含量均存在极显著影响 ($P<0.01$),且降水与土层深度存在显著交互性作用 (图 2,表 2)。与原产地红花尔基樟子松林相比,科尔沁沙地引种樟子松人工林土壤 C、N 和 P 含量均显著降低 ($P<0.05$)。引种地奈曼、章古台和傅家沿降水增加,沙地樟子松人工林土壤 C、N、P 含量呈现逐渐增加趋势,且 0—10cm 表层土壤变化趋势更加明显 (图 2A,B,C)。相同降水条件下,随着土层深度的增加土壤

C、N 和 P 含量逐渐下降,0—10 cm 土壤 C、N、P 含量显著高于 10—20 cm 和 20—40 cm。

降水和土层深度均对土壤 C:N、C:P 和 N:P 产生极显著影响($P<0.01$),且存在显著交互作用(表 2)。在科尔沁沙地引种地,沙地樟子松人工林土壤 C:N 随降水增加表现为下降趋势,而土壤 C:P、N:P 随降水增加表现上升趋势。在同一降水梯度下,随着土层深度的增加,土壤 C:N、C:P 和 N:P 呈下降趋势;章古台、傅家林场和红花尔基 0—10 cm 土壤 C:N 显著高于 10—20 cm 和 20—40 cm,而乌兰敖都和奈曼各土层间 C:N 差异不显著(图 2D)。随着土层深度的增加,不同地区土壤 C:P、N:P 含量均为 0—10 cm 高于 10—20 cm 和 20—40 cm,且 10—20 cm 与 20—40 cm 差异不显著(图 2E、F)。

表 2 降水梯度与土层深度对樟子松林土壤生态化学计量特征影响双因素方差分析

Table 2 Two-ways ANOVA of rainfall gradient and soil depth on soil C, N, P concentrations and C:N, C:P and N:P in Mongolian pine plantations

自变量 Variable	自由度 df	C/(g/kg)		N/(g/kg)		P/(g/kg)		C:N		C:P		N:P	
		F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
降水量 Rainfall	4	438.8	<0.01	358.7	<0.01	179.1	<0.01	40.26	<0.01	61.79	<0.01	70.1	<0.01
土层深度 Soil depth	2	120.6	<0.01	89.04	<0.01	19.92	<0.01	27.81	<0.01	159.6	<0.01	73.28	<0.01
降水量×土层深度 Rainfall×Soil depth	8	11.15	<0.01	6.59	<0.01	1.07	0.4	2.22	0.04	6.21	<0.01	3.39	<0.01

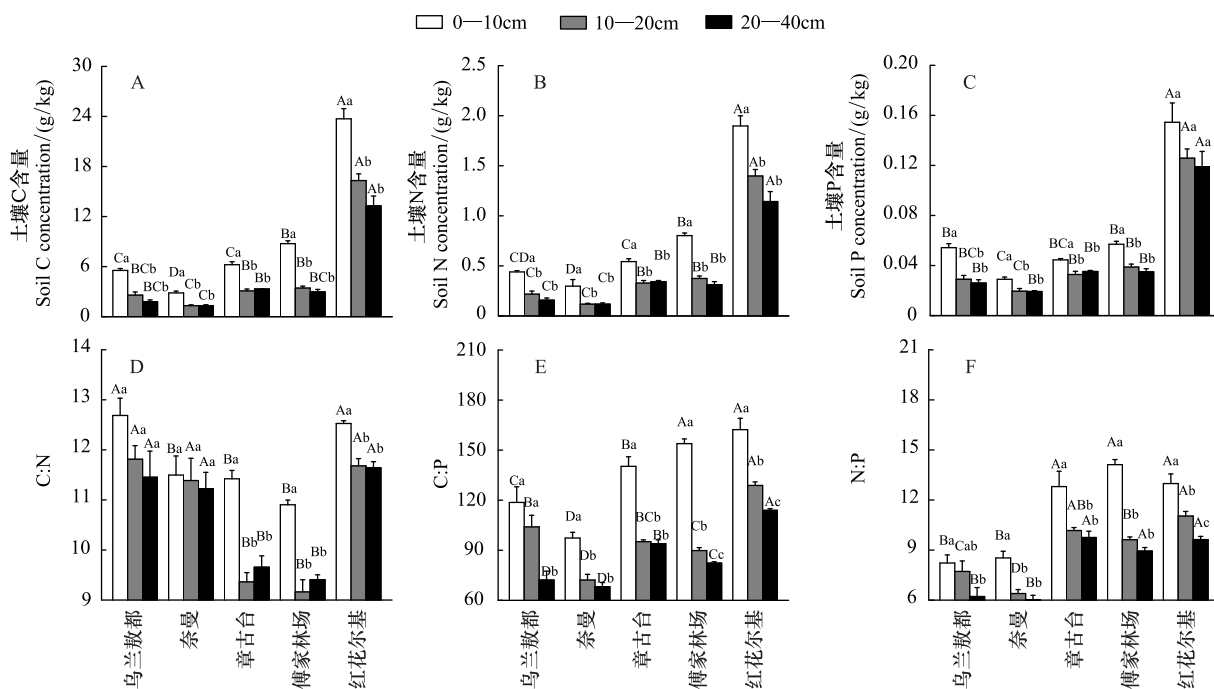


图 2 原产地与不同降水梯度下引种地樟子松林土壤生态化学计量特征

Fig.2 Soil stoichiometric characteristics along the rainfall gradient

不同大写字母表示不同降水梯度在同一土层差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示同一降水梯度不同土层差异显著($P<0.05$)

2.2 植物叶片生态化学计量特征

与红花尔基原产地相比,引种地沙地樟子松人工林 1 年生和 2 年生叶 P 含量均显著降低,而 C:P、N:P 显著升高($P<0.05$)(表 3)。同时,降水变化能够影响引种地沙地樟子松人工林 1 年和 2 年生叶生态化学计量特征。引种地沙地樟子松 1 年和 2 年生叶片 C 含量与降水量呈显著负相关关系($P<0.05$)(图 3A),而 1 年生叶 N 含量随降水增加显著增加($P<0.05$)(图 3B)。樟子松 1 年和 2 年生叶 P 含量随降水量无一致性规律(表 3;图 3C)。相同降水条件下,1 年生叶 N、P 含量高于 2 年生叶,而 C 含量低于 2 年生叶(表 3)。

同样,降水变化能够改变沙地樟子松人工林 1 年生叶 C:N、N:P、C:P 和 2 年生叶 C:N、N:P,而 2 年生叶片 C:P 在不同降水条件下差异不显著(表 3)。1 年生叶 C:N 随降水增加逐渐降低,并存在显著负相关性,而 2 年生叶 C:N 与降水量无显著相关性(图 3D)。1 年生叶 N:P 随降水增加而显著增加(图 3F)。1 年生叶和 2 年生叶 C:P 与降水无显著相关性(图 3E)。相同降水条件下,2 年生叶 C:N、C:P、N:P 均高于 1 年生叶(表 3)。

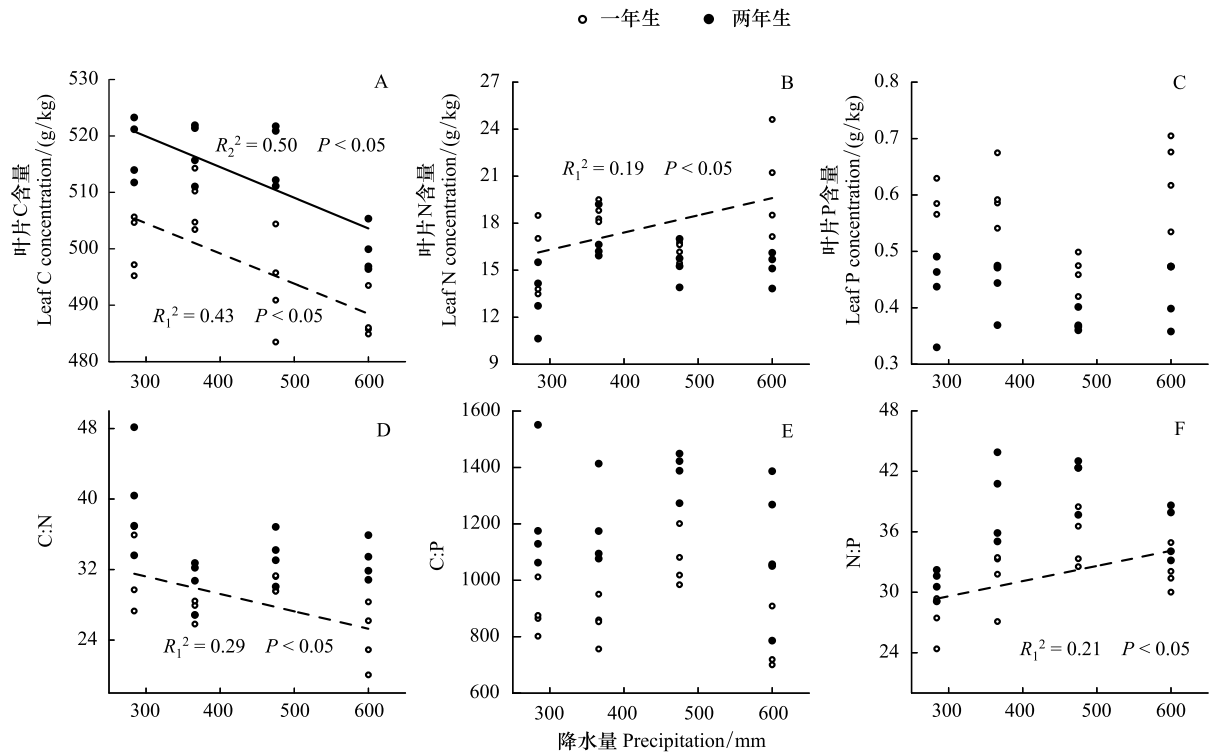


图 3 樟子松 1 年和 2 年生叶片生态化学计量特征沿降水梯度变化特征

Fig.3 Changes of 1 and 2 year-old leaf stoichiometric characteristics across rainfall gradient

表 3 不同降水梯度下樟子松 1 年和 2 年生叶片生态化学计量特征

研究样地 Study site	C/(g/kg)		N/(g/kg)		P/(g/kg)		C:N		C:P		N:P	
	1 年生	2 年生	1 年生	2 年生	1 年生	2 年生	1 年生	2 年生	1 年生	2 年生	1 年生	2 年生
	1 year-old	2 year-old	1 year-old	2 year-old	1 year-old	2 year-old	1 year-old	2 year-old	1 year-old	2 year-old	1 year-old	2 year-old
乌兰敖都	500.67ab (5.24)	517.53a (5.55)	15.70b (2.46)	13.26b (2.09)	0.57b (0.06)	0.43b (0.07)	32.45a (4.68)	39.78a (6.22)	888.44b (88.52)	1229.45a (219.36)	27.58c (2.30)	30.87c (1.37)
奈曼	508.15a (5.03)	517.49a (5.15)	18.67ab (0.63)	17.00a (1.50)	0.60b (0.06)	0.44b (0.05)	27.25b (1.16)	30.63b (2.66)	854.82b (79.42)	1189.80a (155.00)	31.40b (2.97)	38.90ab (4.18)
章古台	493.62b (8.78)	516.48a (5.6)	16.25b (0.59)	15.48a (1.28)	0.46b (0.03)	0.38b (0.02)	30.40ab (0.98)	33.55b (2.81)	1071.11a (95.38)	1383.13a (77.35)	35.22a (2.78)	41.35a (2.47)
傅家	487.53b (4.00)	499.63b (4.11)	20.37a (3.30)	15.19ab (0.99)	0.63b (0.08)	0.43b (0.05)	24.37b (3.64)	33.02b (2.20)	778.42b (94.25)	1190.50a (165.3)	32.10ab (2.07)	35.94b (2.73)
红花尔基	491.32b (7.36)	502.12b (2.07)	16.80ab (0.70)	16.04a (0.74)	0.79a (0.03)	0.62a (0.01)	29.29ab (1.60)	31.38b (1.63)	620.53c (29.48)	807.94b (14.22)	21.20d (0.32)	25.80d (1.10)

数据为平均值,括号内数据为标准差,同列不同小写字母表示不同降水梯度下各元素含量及其化学计量比差异显著($P<0.05$)

2.3 土壤与植物叶片 C、N、P 含量相关性

1 年生叶和 2 年生叶 P 含量与不同土层土壤 C、N、P 含量均呈极显著正相关关系($P<0.01$),而 1 年生和

2 年生叶 N 含量与土壤 C、N、P 含量无显著相关性。1 年生叶 C 含量与土壤 C、N、P 含量无显著相关性,而 2 年生叶 C 含量与土壤 C、N、P 含量呈显著负相关($P<0.05$)(表 4)。

表 4 土壤 C、N、P 与植物叶片 C、N、P 含量相关性分析

Table 4 The correlations between soil C, N, P concentration and leaf C, N, P concentration

土层深度 Soil depth	元素 Elements	1 年生叶 1year-old leaf			2 年生叶 2year-old leaf		
		C	N	P	C	N	P
0—10 cm	C	-0.43	-0.09	0.76 **	-0.61 **	0.1	0.81 **
	N	-0.44	-0.06	0.75 **	-0.63 **	0.11	0.79 **
	P	-0.33	-0.19	0.72 **	-0.56 *	0.06	0.81 **
10—20 cm	C	-0.33	-0.16	0.74 **	-0.53 *	0.12	0.84 **
	N	-0.38	-0.14	0.73 **	-0.57 **	0.12	0.82 **
	P	-0.34	-0.16	0.73 **	-0.56 *	0.09	0.81 **
20—40 cm	C	-0.33	-0.16	0.71 **	-0.52 *	0.13	0.81 **
	N	-0.38	-0.15	0.69 *	-0.55 *	0.13	0.78 **
	P	-0.33	-0.16	0.70 **	-0.53 *	0.09	0.79 **

* 表示达到显著水平, $P<0.05$; ** 表示达到极显著水平, $P<0.01$

3 讨论

樟子松由于其耐寒、耐旱、耐贫瘠等特点,广泛种植于干旱/半干旱区,其最早是从内蒙古红花尔基引种到科尔沁沙地,近年来发现引种地樟子松出现衰退现象^[25]。有研究表明,引种地跨纬度较大,水分热量较原产地充足,使得樟子松生长规律发生变化,高峰生长期提前,旺盛生长期缩短^[29],此外引种区的蒸发量和降雨量大于原产地,使得引种地樟子松人工林一直处于较原产地更严重的水分胁迫中^[30]。土壤 C、N、P 元素含量是土壤的肥力高低的重要指标,能够表征土壤有机质组成、土壤质量以及养分供给能力^[31]。本研究中,与红花尔基樟子松原产地相比,引种地樟子松人工林不同深度土壤 C、N 和 P 含量均显著降低。可见,科尔沁沙地引种地樟子松人工林土壤 C、N、P 养分比较贫瘠,尤其土壤 P 养分限制更加严重,其原因可能主要是位于干旱/半干旱地区的科尔沁沙地存在干旱化和土壤沙化,导致土壤 C、N 和 P 等元素生物地球化学速率慢、土壤养分固持能力弱。同时,由于近年来 N 沉降增加,能够缓解土壤 N 养分限制,使得科尔沁沙地土壤 P 元素越来越成为该地区主要限制因子^[32]。此外,在干旱半干旱地区,干旱少雨的特殊情况,使得降雨直接影响着微生物的活性进而影响生态系统结构、过程和功能^[33]。本研究进一步研究发现,科尔沁沙地自西向东,随降水量增加,土壤 C、N 和 P 含量逐渐增加,引种地樟子松人工林土壤养分呈现增加趋势。降水能够直接影响土壤水分含量,降水量的增加能够提高胞外酶活性,促进呼吸作用以及增加底物的利用^[34],进而增加土壤 C、N、P 养分^[35]。同样,王淑平等研究东北样带土壤 C、N 和 P 含量与气候因子关系发现,土壤有机碳和全 N 含量与降水量呈显著正相关,而降雨对土壤 P 含量的影响不大^[36]。然而,杜满义等研究发现,在湿润地区随降水增加,土壤 N 含量降低,其原因可能是湿润地区降水增加能够提高土壤 N 元素淋溶流失^[37]。此外,本研究发现乌兰敖都降水量虽然低于奈曼,但土壤 C、N、P 含量均高于奈曼。乌兰敖都位于科尔沁沙地西缘,降水非常少、沙漠化严重,该地区并不适合大面积引种沙地樟子松,往往需要选择较好立地栽种樟子松,并在造林初期进行浇水灌溉等措施。

土壤生态化学计量特征能够表征土壤 C、N 和 P 元素耦合循环特征。本研究发现,沙地樟子松引种地随着降水增加,土壤 C:N 逐渐降低,而 C:P 和 N:P 逐渐增加,表明随着降水量增加,引种地沙地樟子松人工林土壤 N 元素限制逐渐降低,而土壤 P 元素限制不断增加。土壤 C:N 是表征土壤 N 矿化能力的重要指标,低的 C:N 表明降水增加,樟子松人工林土壤质量不断提高,土壤 N 矿化潜力和供 N 能力增加^[38-39]。此外,较高的土壤 C:P 可能会引起土壤有机质分解时土壤微生物受 P 养分限制,进而与植物竞争 P 元素^[40],是 P 有效性低的一个指标^[41],这也验证了引种地土壤 P 的匮乏。土壤 N:P 会影响植物生产力的组成,同时会影响微

生物的组成与活性^[42],常被用作确定土壤 N 和 P 养分限制的重要诊断指标^[43]。本研究发现,土壤 N:P 随降水量增加而提高,表征科尔沁沙地随降水增加土壤 N 限制减弱,而土壤 P 限制不断提高。

同样,植物叶片 N 和 P 含量是影响植物光合作用的重要元素,同时可以反映土壤养分的可利用性与有效性^[44-46]。与红花尔基原产地相比,引种地沙地樟子松 1 年生和 2 年生叶 P 含量显著降低,而 C:P、N:P 均显著升高,其原因主要是引种地樟子松人工林土壤 P 养分匮乏。本研究发现,樟子松叶片 P 含量均与土壤 P 含量呈极显著正相关关系。李家湘等研究发现一致的结果,土壤 P 是决定灌木器官 P 含量最主要的因子^[47]。此外,本研究发现科尔沁沙地樟子松叶 C 含量随着降水增加逐渐减少,而 N 含量与降水量呈显著正相关关系。这可能是因为叶片 N 含量直接影响植物的光合能力,且随降水量增加光合速率增加,N 含量增加^[48]。然而,丁小慧等研究发现随降雨增加呼伦贝尔植物群落叶片 C 含量显著升高,而 N 和 P 含量呈下降趋势^[20]。该研究结果与我们的结果不一致,这可能是由于呼伦贝尔草原土壤是黑钙土和草甸土、土质肥沃、水分胁迫较弱,而本研究地区土壤为沙土、养分贫瘠、水分胁迫比较严重,土壤水分条件的改善能够提高土壤 N 养分供应和植物 N 吸收。叶片 N:P 是判别植物生长养分限制的关键指标^[49]。通常,植物叶片 N:P<14 时,植物受到 N 限制;N:P>16 时,植物受到 P 限制;N:P 介于 14—16 之间时,植物受 N 和 P 的共同限制^[50]。本研究中沙地樟子松 1 年生叶 N:P 为 21—35,可见 P 元素是沙地樟子松主要限制养分。此外,随着降水增加,樟子松 1 年生叶 N:P 呈升高趋势,表明随降水量增加,P 养分限制性增加。本研究还发现一年生叶 N、P 含量显著高于二年生叶,表明随叶龄增加 N、P 元素逐渐降低,这可能是因为叶片在生长初期,需要大量的蛋白质和核酸来满足自身的快速生长,对 N、P 选择吸收较多^[51]。

4 结论

综上所述,科尔沁沙地作为樟子松重要引种地,与原产地红花尔基相比,土壤 C、N、P 养分比较缺乏,且缺乏程度为 C<N<P,表明土壤养分匮乏,尤其是土壤 P 元素限制可能是科尔沁沙地樟子松人工林衰退的重要原因。进一步研究表明,降水变化能够显著改变科尔沁沙地樟子松人工林土壤和植物生态化学计量特征。随着降水增加,土壤 N 含量和供给能力逐渐增加,进而土壤 N 养分限制逐渐减弱。然而,随着降水增加,科尔沁沙地樟子松人工林土壤 P 养分限制增加。本研究从土壤和植物生态化学计量学角度,探讨了引种地樟子松人工林对科尔沁沙地降水梯度变化响应,针对降水变化如何驱动土壤养分供给和植物养分利用效率有待今后进一步深入研究。

参考文献 (References):

- [1] Fan H B, Wu J P, Liu W F, Yuan Y H, Hu L, Cai Q K. Linkages of plant and soil C:N:P stoichiometry and their relationships to forest growth in subtropical plantations. *Plant and Soil*, 2015, 392(1/2): 127-138.
- [2] 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.
- [3] González A L, Kominoski J S, Danger M, Ishida S, Iwai N, Rubach A. Can ecological stoichiometry help explain patterns of biological invasions? *Oikos*, 2010, 119(5): 779-790.
- [4] 张仲胜, 吕宪国, 薛振山, 刘晓辉. 中国湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征研究. *土壤学报*, 2016, 53(5): 1160-1169.
- [5] 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.
- [6] Dodds W K, Martí E, Tank J L, Pontius J, Hamilton S K, Grimm N B, Bowden W B, McDowell W H, Peterson B J, Valett H M, Webster J R, Gregory S. Carbon and nitrogen stoichiometry and nitrogen cycling rates in streams. *Oecologia*, 2004, 140(3): 458-467.
- [7] Hessen D O, Ågren G I, Anderson T R, Elser J J, de Ruiter P C. Carbon sequestration in ecosystems: the role of stoichiometry. *Ecology*, 2004, 85(5): 1179-1192.
- [8] Cleveland C C, Liptzin D. C:N:P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? *Biogeochemistry*, 2007, 85(3): 235-252.
- [9] Ratnam J, Sankaran M, Hanan N P, Grant R C, Zambatis N. Nutrient resorption patterns of plant functional groups in a tropical savanna: Variation and functional significance. *Oecologia*, 2008, 157(1): 141-151.
- [10] Güsewell S. N:P ratios in terrestrial plants: Variation and functional significance. *New Phytologist*, 2004, 164(2): 243-266.

- [11] 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.
- [12] 洪江涛, 吴建波, 王小丹. 全球气候变化对陆地植物碳氮磷生态化学计量学特征的影响. 应用生态学报, 2013, 24(9): 2658-2665.
- [13] Elser J J, Fagan W F, Kerkhoff A J, Swenson N G, Enquist B J. Biological stoichiometry of plant production: Metabolism, scaling and ecological response to global change. *New Phytologist*, 2010, 186(3): 593-608.
- [14] Stevens C J, Duprè C, Dorland E, Gaudnik C, Gowing D J G, Bleeker A, Diekmann M, Alard D, Bobbink R, Fowler D, Corcket E, Mountford J O, Vandvik V, Aarrestad P A, Muller S, Dise N B. The impact of nitrogen deposition on acid grasslands in the Atlantic region of Europe. *Environmental Pollution*, 2011, 159(10): 2243-2250.
- [15] 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.
- [16] Reich P B, Oleksyn J, Tilman G D. 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.
- [17] Soethe N, Lehmann J, Engels C. Nutrient availability at different altitudes in a tropical montane forest in Ecuador. *Journal of Tropical Ecology*, 2008, 24(4): 397-406.
- [18] Körner C. The nutritional status of plants from high altitudes. *Oecologia*, 1989, 81(3): 379-391.
- [19] 于海玲, 李愈哲, 樊江文, 钟华平. 中国草地样带不同功能群植物叶片氮磷含量随水热因子的变化规律. 生态学报, 2016, 35(11): 2867-2874.
- [20] 丁小慧, 罗淑政, 刘金巍, 刘魁, 刘国华. 呼伦贝尔草地植物群落与土壤化学计量学特征沿经度梯度变化. 生态学报, 2012, 32(11): 3467-3476.
- [21] Taylor P G, Cleveland C C, Wieder W R, Sullivan B W, Doughty C E, Dobrowski S Z, Townsend A R. Temperature and rainfall interact to control carbon cycling in tropical forests. *Ecology Letters*, 2017, 20(6): 779-788.
- [22] Cregger M A, McDowell N G, Pangle R E, Pockman W T, Classen A T. The impact of precipitation change on nitrogen cycling in a semi-arid ecosystem. *Functional Ecology*, 2014, 28(6): 1534-1544.
- [23] Mellett T, Selvin C, Defforey D, Roberts K, Lecher A L, Dennis K, Gutknecht J, Field C, Paytan A. Assessing cumulative effects of climate change manipulations on phosphorus limitation in a Californian grassland. *Environmental Science & Technology*, 2017, 52(1): 98-106.
- [24] Zhang X L, Guan T Y, Zhou J H, Cai W T, Gao N N, Du H, Jiang L H, Lai L M, Zheng Y R. Community characteristics and leaf stoichiometric traits of desert ecosystems regulated by precipitation and soil in an arid area of China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(1): 109-109.
- [25] 朱教君, 曾德慧, 康宏樟, 吴祥云, 范志平. 沙地樟子松人工林衰退机制. 北京: 中国林业出版社, 2005.
- [26] 李玲芬, 延军平, 刘冬梅, 陈锋, 丁金梅. 干旱—半干旱地区不同植被条件下土壤含水量变化及植被建设途径分析. 水土保持通报, 2009, 29(1): 18-22, +27.
- [27] 禹朴家, 徐海量, 王伟, 张鹏, 赵新风, 刘新华, 张青青. 荒漠草地植物稳定性氮同位素对水分变化的响应. 干旱区研究, 2012, 29(2): 347-351.
- [28] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 166-185.
- [29] 康宏樟, 朱教君, 李智辉, 许美玲. 沙地樟子松天然分布与引种栽培. 生态学报, 2004, 23(5): 134-139.
- [30] 李露露, 李丽光, 陈振举, 周永斌, 张先亮, 白学平, 常永兴, 肖建强. 辽宁省人工林樟子松径向生长对水热梯度变化的响应. 生态学报, 2015, 35(13): 4508-4517.
- [31] 秦娟, 孔海燕, 刘华. 马尾松不同林型土壤 C、N、P、K 的化学计量特征. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2016, 44(2): 68-76, 82-82.
- [32] Asner G P, Townsend A R, Riley W J, Matson P A, Neff J C, Cleveland C C. Physical and biogeochemical controls over terrestrial ecosystem responses to nitrogen deposition. *Biogeochemistry*, 2001, 54(1): 1-39.
- [33] Chen D M, Cheng J H, Chu P F, Hu S J, Xie Y C, Tuvshintogtokh I, Bai Y F. Regional-scale patterns of soil microbes and nematodes across grasslands on the Mongolian plateau: Relationships with climate, soil, and plants. *Ecography*, 2015, 38(6): 622-631.
- [34] Liu W, Lü X T, Xu W F, Shi H Q, Hou L Y, Li L H, Yuan W P. Effects of water and nitrogen addition on ecosystem respiration across three types of steppe: The role of plant and microbial biomass. *Science of the Total Environment*, 2018, 619-620: 103-111.
- [35] 郭焱培, 杨弦, 安尼瓦尔·买买提, 刘鸿雁, 马文红, 于顺利, 唐志尧. 中国北方温带灌丛生态系统碳、氮、磷储量. 植物生态学报, 2017, 41(1): 14-21.
- [36] 王淑平, 周广胜, 吕育财, 邹建军. 中国东北样带 (NECT) 土壤碳、氮、磷的梯度分布及其与气候因子的关系. 植物生态学报, 2002, 26(5): 513-517.
- [37] 杜满义, 范少辉, 刘广路, 封焕英, 郭宝华, 唐晓鹿. 中国毛竹林碳氮磷生态化学计量特征. 植物生态学报, 2016, 40(8): 760-774.

- [38] Attiwill P M, Polglase P J, Weston C J, Adams M A. Nutrient cycling in forests of South-Eastern Australia//Attiwill P M, Adams M A, eds. *Nutrition of Eucalypts*. Collingwood, Australia: CSIRO Publishing, 1996: 191-227.
- [39] Gómez-Rey M X, Madeira M, Gonzalez-Prieto S J, Coutinho J. Soil C and N dynamics within a precipitation gradient in Mediterranean eucalypt plantations. *Plant and Soil*, 2010, 336(1/2): 157-171.
- [40] 王建林, 钟志明, 王忠红, 陈宝雄, 余成群, 胡兴祥, 沈振西, 大次卓嘎, 张宪洲. 青藏高原高寒草原生态系统土壤碳氮比的分布特征. *生态学报*, 2014, 34(22): 6678-6691.
- [41] 李丹维, 王紫泉, 田海霞, 和文祥, 耿增超. 太白山不同海拔土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征. *土壤学报*, 2017, 54(1): 160-170.
- [42] 王晶苑, 张心昱, 温学发, 王绍强, 王辉民. 氮沉降对森林土壤有机质和凋落物分解的影响及其微生物学机制. *生态学报*, 2013, 33(5): 1337-1346.
- [43] 陶冶, 刘耀斌, 吴甘霖, 张元明. 准噶尔荒漠区域尺度浅层土壤化学计量特征及其空间分布格局. *草业学报*, 2016, 25(7): 13-23.
- [44] 姜沛沛, 曹扬, 陈云明, 赵一娉. 陕西省3种主要树种叶片、凋落物和土壤N、P化学计量特征. *生态学报*, 2017, 37(2): 443-454.
- [45] Elser J J, Bracken M E S, Cleland E E, Gruner D S, Harpole W S, Hillebrand H, Ngai J T, Seabloom E W, Shurin J B, Smith J E. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 2007, 10(12): 1135-1142.
- [46] Grimm N B, Fisher S G. Nitrogen limitation potential of Arizona streams and rivers. *Journal of the Arizona-Nevada Academy of Science*, 1986, 21(1): 31-44.
- [47] 李家湘, 徐文婷, 熊高明, 王杨, 赵常明, 卢志军, 李跃林, 谢宗强. 中国南方灌丛优势木本植物叶的氮、磷含量及其影响因素. *植物生态学报*, 2017, 41(1): 31-42.
- [48] 褚建民, 邓东周, 王琼, 孙学凯, 胡守明, 杜光和. 降雨量变化对樟子松生理生态特性的影响. *生态学杂志*, 2011, 30(12): 2672-2678.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] 张欣影, 宁秋蕊, 李守中, 姜良超, 刘溶, 张昊泽, 陶晶晶. 亚热带红壤侵蚀区马尾松针叶生态化学计量特征. *水土保持研究*, 2017, 24(2): 156-161.