

DOI: 10.5846/stxb202002050200

苏卓侠, 苏冰倩, 上官周平. 黄土高原刺槐叶片-土壤生态化学计量参数对降雨量的响应特征. 生态学报, 2020, 40(19): 7000-7008.

Su Z X, Su B Q, Shangguan Z P. Response characteristics of *Robinia pseudoacacia* leaf and soil ecological stoichiometric parameters to precipitation in the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(19): 7000-7008.

黄土高原刺槐叶片-土壤生态化学计量参数对降雨量的响应特征

苏卓侠, 苏冰倩, 上官周平*

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, 杨凌 712100

摘要:以黄土高原 10 个典型样点的 20 年刺槐人工林为研究对象,测定了样地中刺槐叶片碳(C)、氮(N)、磷(P)含量,以及 0—10 cm 和 10—20 cm 土层土壤的主要理化指标,探讨了黄土高原刺槐叶片—土壤生态化学计量特征参数随水分梯度的变化规律。研究发现:① 随着降水量增加,刺槐叶 C、N 含量呈增加趋势,叶片 P 含量无一致性规律。② 0—10 cm 土层中土壤 SOC、TN、TP、铵态氮含量以及 C:P 和 N:P 均随降雨量增加呈逐渐增加趋势,而 C:N 比变化不明显。③ 刺槐叶片 C、N、P 及其化学计量比与土壤化学计量比相关性较弱,但叶片 N、P 与土壤铵态氮、速效磷等速效养分含量呈显著正相关($P < 0.05$)。本研究叶片 N:P>16,说明黄土高原刺槐生长主要受 P 元素限制,且随着降水的增加,土壤 P 养分的限制加强。

关键词:生态化学计量参数; 降雨量; 刺槐; 黄土高原

Response characteristics of *Robinia pseudoacacia* leaf and soil ecological stoichiometric parameters to precipitation in the Loess Plateau

SU Zhuoxia, SU Bingqian, SHANGGUAN Zhouping*

State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

Abstract: This study sampled 20-year-old *Robinia pseudoacacia* plantations at 10 typical sites on the Loess Plateau. We determined the C, N and P concentrations in *Robinia pseudoacacia* leaves and various physical and chemical indexes of 0—10 cm and 10—20 cm soil layers, and further explored the variations in the ecological stoichiometric parameters of the leaf—soil system along a water gradient on the Loess Plateau. The results showed that: ① leaf C and N concentrations increased with increasing rainfall, but there was no clear trend for leaf P concentration along a rainfall gradient. ② Soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and ammonium nitrogen concentrations and soil C:P and N:P ratios increased with increasing rainfall in 0—10 cm soil layer, but soil C:N has no obvious change. ③ There were no significant correlations between plant and soil C, N, P concentrations and C:N, C:P, N:P ratios, but leaf N and P concentrations were significantly positively correlated with soil available phosphorus and ammonium concentrations. The result of leaf N:P>16 indicated that the plant was under P limitation on the Loess Plateau. Additionally, the soil P limitation increased with increasing rainfall.

Key Words: ecological stoichiometric parameters; rainfall; *Robinia pseudoacacia*; the Loess Plateau

基金项目:陕西省林业科学院科技创新计划专项(SXLK2020-0101);国家重点研发课题计划(2016YFC0501605);国家自然科学基金(41771549)

收稿日期:2020-02-05; 网络出版日期:2020-07-31

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shangguan@ms.iswc.ac.cn

碳(C)氮(N)磷(P)是生物体中的主要组成元素^[1]、也是生态系统中的主要养分元素^[2-3]。植物从土壤中吸收养分,同时又以枯落物归还给土壤,使得植物与土壤之间不断进行着养分循环与转化的过程,从而有利于陆地植被的演替与恢复^[4]。生态化学计量学是一门交叉学科^[5],研究 C、N、P 的生态化学计量是当前生态研究的热点领域。因此,明确植物土壤 C、N、P 等养分之间的相互关系对揭示陆地生态系统的养分循环具有重要意义,也是区域生态保护与生态文明建设的重要内容。

目前,关于植物 N 土壤 C:N:P 生态化学计量学与环境因子的相关研究在国内外已广泛开展^[6-19]。例如, Yue 等^[6]发现 N 沉降显著增加植物 N:P,但对土壤 C:P 和 N:P 均无显著影响。相关研究发现,植物叶片 N、P 含量随着年均温的增加而降低^[7-9],但有研究发现叶片 N、P 含量随着年均温的增加而增加^[10-11]。李喜霞等^[12]认为我国温带阔叶红松林叶片各元素计量特征随纬度变化不显著,而土壤 SOC、C:N、C:P 均随纬度升高而极显著增加。吴昊等^[13]发现随着海拔升高,土壤整体 C:N 呈先上升后下降趋势,N:P 变化趋势与之相反,C:P 则无明显变化。赵珊宇等^[14]通过对科尔沁沙地樟子松人工林的研究表明随着降雨量的增加,叶片 C 含量呈下降趋势,叶片 P 含量无一致性规律,叶片 N 含量以及土壤 C、N、P 含量均呈增加趋势。目前已开展了很多关于降水变化对陆地生态系统 C、N、P 化学计量影响的研究,但多集中于草地生态系统方面^[15-19],关于自然降水梯度对次生林土壤-植物体系的研究仍有很大不足。

黄土高原以干旱和养分贫瘠为其主要特征,是全球生态系统最为脆弱的区域之一^[20],刺槐(*Robinia pseudoacacia*.)作为该区主要的退耕造林树种^[21],具有良好抗逆能力与水土保持功效。全球变暖加速了水循环,导致降水格局发生了变化^[22],如在 21 世纪初以来西北地区东部降水呈显著增加趋势^[23]。水分作为制约旱区植被生长的主要限制因子^[15],降水格局的变化对于该区植物生长和土壤养分调控具有重要影响。因此研究刺槐人工林对自然降水梯度的响应,对其应对气候变化具有重要的科学意义。然而,目前关于黄土高原刺槐叶片-土壤生态化学计量参数对降雨量响应方面的研究亟待加强。因此,本文以黄土高原 20 年刺槐人工林为研究对象,通过比较不同水分梯度下刺槐林叶片与土壤养分及 C、N、P 生态化学计量特征的变化,分析叶片与土壤养分的相关关系,以期深入了解区域降水格局变化如何影响脆弱生态系统化学计量特征提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黄土高原(34°42′32″—39°18′28″N, 108°40′35″—110°37′47″E),沿不同气候带由南向北确定泾阳县、铜川市、黄陵县、富县、宝塔区、延川县、绥德县、米脂县、榆林市、神木市等 10 个代表性较强的样点(表 1)。该区跨越了半湿润和半干旱气候区,平均气温在 8.8—13.4℃,降雨集中在 7—8 月,年降雨量 500 mm 左右,从南向北逐渐减少^[24]。海拔 688—1310 m,地势西北高、东南低。土壤类型以黄土母质形成的黄绵土为主。研究区内地表破碎,沟壑纵横,水土流失严重,以刺槐(*Robinia pseudoacacia*.)人工林为主进行植被恢复。林下草本主要有鼠尾粟(*Sporobolus fertilis*)、菵草(*Humulus scandens*)、小冠花(*Securigera varia*)、牛筋草(*Eleusine indica*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、天门冬(*Asparagus cochinchinensis*)等。研究区内刺槐人工林林分单一、结构简单,林下灌草层生物量很低。

1.2 样品采集与测定

野外采样于 2018 年 8 月植物生长旺盛时期,选择 20 年成熟刺槐林地作为研究对象。每个采样点设置 3 个 20 m×20 m 的样方,每个样方内选取 3 株生长健壮、长势良好的刺槐,用高枝剪从东、西、南、北 4 个方向分别采集每株植物中上部成熟且无病害的叶片,混匀后装入信封中。在每个样方内按照“S”取样法用土钻钻取 5 个点,分别采集其 0—10 cm 和 10—20 cm 土壤样品,挑出细根、石块等杂物后按土层混匀并装入自封袋中。将所有的植物、土壤样品做好标记并带回实验室。

采集的植物叶片在 105℃杀青后置于 65℃条件下烘干,经研磨后过 0.15 mm 筛后装袋封存。

表 1 样地基本信息

Table 1 The basic information of sampling

样地 Site	地理位置 Location	海拔 Altitude/m	年均降雨量 Precipitation/ mm	坡度 Slope/(°)	坡向 Aspect	林龄 Age/a	平均树高 Mean height/m	平均胸径 Mean diameter at breast height/cm
泾阳县	108°40'E 34°42'N	688	504.2	30	南偏东 11°	20	8.0	9.9
铜川市	108°55'E 35°01'N	904	594.2	49.3	北偏西 18°	20	12.0	14.1
黄陵县	109°14'E 35°33'N	985	597.3	30.5	西坡	20	15.0	13.63
富县	109°25'E 35°59'N	1038	532.8	37.6	南偏东 20°	20	15.0	12.83
宝塔区	109°22'E 36°40'N	1310	500	29	北偏东 66°	20	8.0	14.1
延川县	110°10'E 36°55'N	967	470.4	25.1	南偏东 30°	20	8.0	15.6
绥德县	110°17'E 37°30'N	944	410.5	42.4	南坡	20	7.0	11.37
米脂县	110°10'E 37°51'N	1127	421.9	32.4	东坡	20	8.0	9.4
榆林市	109°51'E 38°11'N	1216	383.5	无	平地	20	7.0	12.67
神木市	110°37'E 38°49'N	1300	410.3	无	塬顶	20	9.0	14.77

土壤样品经自然风干后过筛,装袋以供后续分析。土壤 pH 采用玻璃电极法测定,土壤含水量采用烘干法测定,土壤硝态氮、铵态氮采用 KCl 浸提法,土壤速效磷采用 NaHCO_3 浸提钼蓝比色法。叶片和土壤 SOC 采用重铬酸钾外加热法测定, TN 采用凯氏定氮法测定, TP 采用高氯酸-硫酸消解钼锑抗比色法测定^[25]。

1.3 数据处理

本文中植物和土壤碳氮磷比均采用元素质量比。用 Excel 2010 对数据进行前期整理,用 SPSS 25.0 对数据进行了回归分析和相关性分析,并对 0—10 cm 和 10—20 cm 土层养分以及 C、N、P 化学计量比做方差分析,最后用 Origin 2016 绘图。

2 结果与分析

2.1 刺槐叶片 C、N、P 化学计量学特征参数沿水分梯度的变化

刺槐叶片碳氮磷的生态化学计量指标随降雨量呈现出不同的变化趋势(图 1),刺槐叶片 C 含量随降雨量增加而显著增加($P=0.017$),其含量变化范围为 410.89—534.70 mg/g,平均值为 448.95 mg/g。叶片 N 含量随降水增加也显著增加($P=0.006$),其含量变化范围为 22.45—36.91 mg/g,均值为 30.17 mg/g。叶片 P 含量随降水增加变化趋势不明显,其变化范围为 1.26—2.09 mg/g,均值为 1.72 mg/g。叶片 C:N 随着降雨量的增加而下降($P=0.157$),叶片 C:P 随降雨量无一致性规律,叶片 N:P 随降水增加而增加,变化趋势不显著($P=0.06$)。

2.2 刺槐林地土壤理化性质沿水分梯度的变化特征

刺槐林地 0—10 cm 和 10—20 cm 土层 SOC、TN 含量均随降水增加而显著增加(图 2),且由方差分析知(表 2),同一降雨条件下两土层间 SOC、TN 含量差异显著($P<0.01$);0—10 cm 土层土壤 TP 含量(0.45—0.77 g/kg)随降水增加呈上升趋势,在 10—20 cm 土层中其含量变化不大。SOC、TN、TP 的变异系数分别为 37.87%、47.10% 和 14.49%,土壤 TP 变异程度较小。土壤铵态氮含量在 0—10 cm 和 10—20 cm 土层均随降水增加而显著上升($P<0.05$),但土壤速效磷和硝态氮含量随着降雨量变化不显著($P>0.05$),在两土层间硝态氮、铵态氮、速效磷含量均无显著差异(表 2)。

表 2 不同土层土壤理化性质及 C、N、P 化学计量比统计特征

Table 2 Statistical characteristics of soil physical and chemical properties and C:N:P in different layers

土层 Soil layer/cm	C/ (g/kg)	N/ (g/kg)	P/ (g/kg)	C:N	C:P	N:P	NO_3^- -N/ (mg/kg)	NH_4^+ -N/ (mg/kg)	速效磷 AP Available phosphorus/ (mg/kg)
0—10	7.13±2.70A	0.74±0.35A	0.55±0.08A	10.22±2.16A	12.83±4.16A	1.31±0.52A	3.54±0.81A	6.50±4.25A	1.73±0.87A
10—20	4.81±2.03B	0.51±0.21B	0.53±0.07A	9.53±1.55A	8.96±3.28B	0.95±0.34B	3.20±0.62A	5.68±4.59A	1.47±0.72A

样本数 $n=30$, 数据为平均值±标准差, 同列不同大写字母表示不同土层同一测定指标在 0.05 水平上差异显著

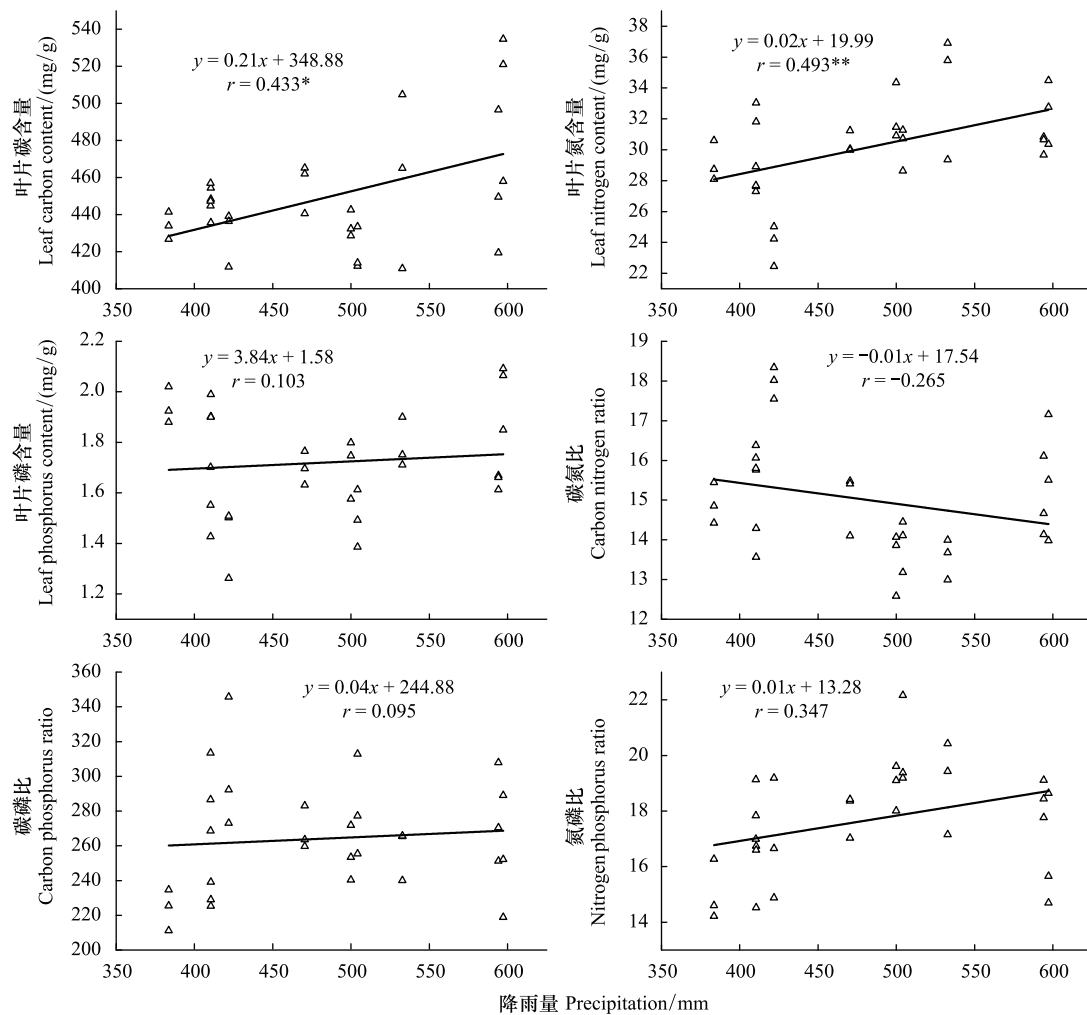


图1 刺槐叶片化学计量学特征参数随降雨量的变化趋势

Fig.1 The variation trend of stoichiometric characteristic parameters of *Robinia pseudoacacia* leaves with precipitation

2.3 刺槐林地土壤 C、N、P 生态化学计量特征沿水分梯度的变化

刺槐林地 0—10 cm 土层土壤 C:N(7.36—16.34)、C:P(6.67—22.55)和 N:P(0.66—2.44),平均值分别是 10.22、12.83 和 1.31,变异系数分别为 21.1%、32.4%和 39.4%(图 3);10—20 cm 土层土壤 C:N(7.50—13.90)、C:P(5.26—16.81)和 N:P(0.51—1.62),平均值分别是 9.53、8.96 和 0.95,变异系数分别为 16.2%、36.6%和 35.8%。土壤 C:N 的空间变异性较小,土壤 C:P、N:P 的空间变异性较大。土壤 C:N 与降雨量无显著相关性($P>0.05$)。在 0—10 cm 土层中,土壤 C:P 随降雨量的减小而显著减小($P<0.05$),而在 10—20 cm 的土层中变化不明显;土壤 C:P 随着降雨量的减小而显著下降($P<0.01$)。10—20 cm 与 0—10 cm 土层相比,土壤 C:N 含量差异不显著,土壤 C:P 和 N:P 含量均显著下降(表 2)。

2.4 刺槐叶片与不同土层土壤各养分之间的关系

除刺槐叶片 N 含量与土壤 TP 存在显著相关性($P<0.05$)外,刺槐叶片与土壤养分 C、N、P 含量均无显著相关关系(表 3)。叶片 P 含量与土壤速效磷呈极显著正相关($P<0.01$),叶片 N 含量与土壤铵态氮含量呈显著正相关($P<0.05$)。相对而言,0—10cm 土层的土壤 C、N、P 含量对叶片 C、N、P 含量的影响比 10—20 cm 土层稍明显些,但未达到显著水平。

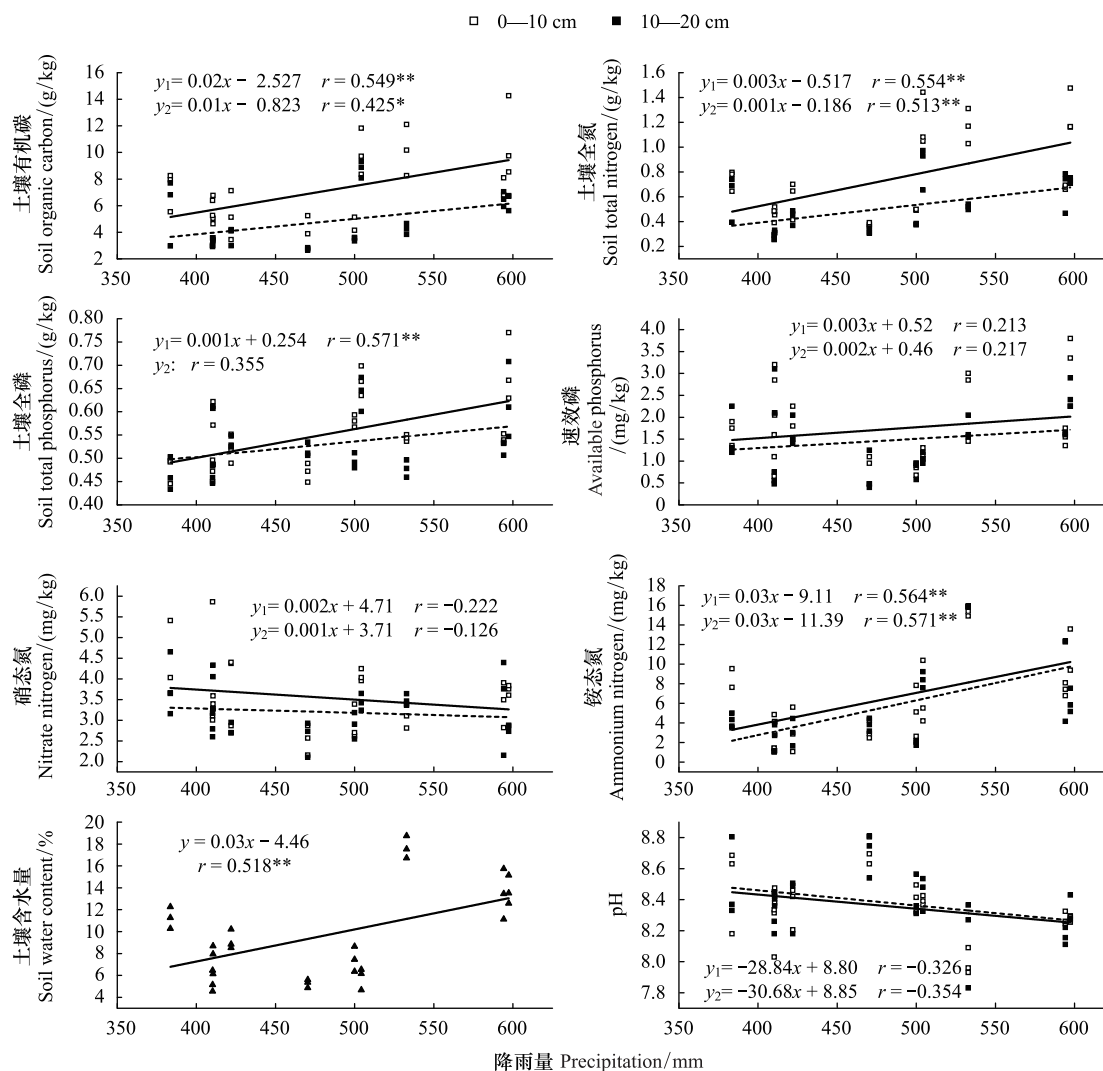


图2 刺槐林地土壤理化性质随水分梯度的变化动态

Fig.2 Changes of soil biogeochemical properties of *Robinia pseudoacacia* with precipitation

y_1 表示 0—10 cm 土层, y_2 表示 10—20 cm 土层, *, **, * * 分别表示相关性显著、极显著

3 讨论

3.1 刺槐叶片化学计量学特征沿水分梯度的变化规律

C、N、P 是构成植物体干物质、生物体蛋白质和遗传物质的重要元素^[26]。本研究中叶片 C 含量的平均值为 448.95 mg/g, 这与郑淑霞等^[27]对黄土高原植被叶片 C 含量的研究较为一致, 但是低于全球植物叶片的平均值^[28], 这说明黄土高原刺槐叶片合成有机物的含量较低^[29]。本研究发现叶片 N 含量平均值 30.17 mg/g, 高于我国^[30]和全球^[28]植物叶片 N 含量, 这可能是由于刺槐有豆科植物根瘤固氮的特性。刺槐叶片 P 含量均值为 1.72 mg/g, 与全球尺度植物叶片 P 含量的研究较为接近^[7]。N、P 作为陆地生态系统中植物生长的主要限制元素, 而且 N:P 临界值可以作为一种指标来判断环境对植物生长的养分供应状况^[3]。当植被叶片 N:P < 14 时, 主要是受到 N 的限制, 当 N:P > 16 时, 主要是受到了 P 的限制, 当 14 < N:P < 16 时, 植物生长受到 N 和 P 的共同限制^[31]。本研究中 N:P 均值为 17.68, 说明黄土区刺槐的生长主要是受 P 元素限制, 与张萍等^[32]研究结果相似。

生境因子的变化一方面会直接影响植物组织的特性, 从而影响植物体的代谢活动; 另一方面它会影响到

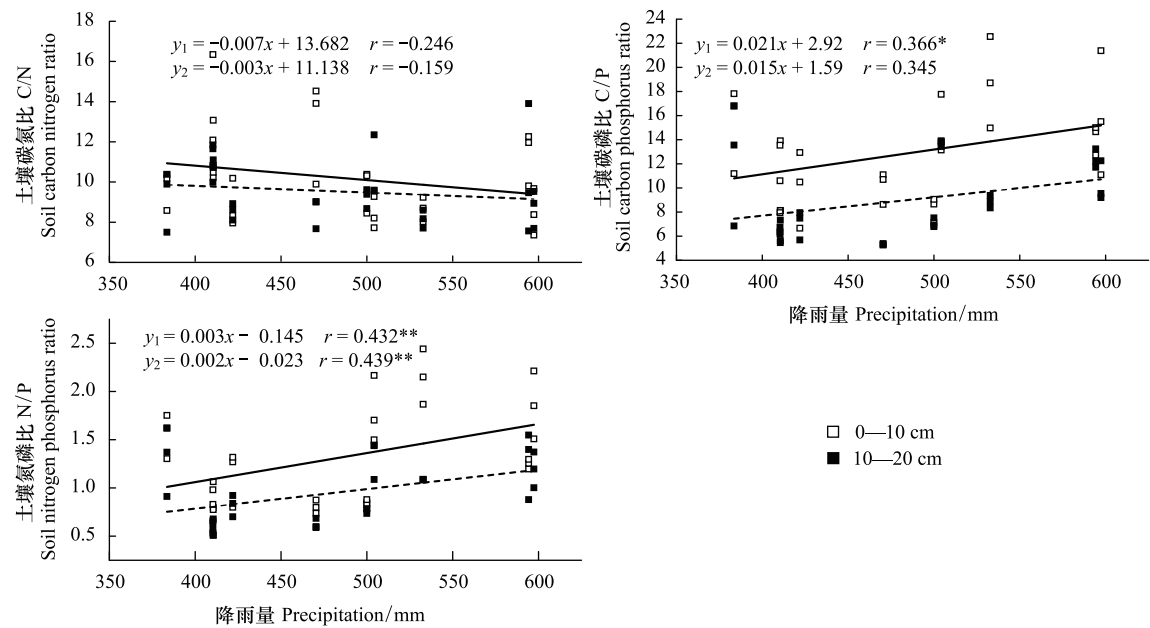


图3 刺槐林地土壤碳氮磷比随降雨量的变化动态

Fig.3 Changes of soil C:N、C:P and C:P with precipitation in *Robinia pseudoacacia* forest

土壤有效养分的含量,从而间接影响植物叶片 C、N、P 的含量^[33]。本研究中刺槐叶片 C 含量随着降雨量的增加而增加,与丁小慧等^[18]的研究结果一致,原因可能为充足的水分有利于植物进行光合作用,从而使得叶片 C 含量得以累积。姜沛沛等^[10]认为刺槐叶片 N、P 含量大致随着降水增加而增加,而郑淑霞等^[27]对黄土高原 126 种植物叶片的研究表明叶片 N、P 含量与年降水量无关,叶片 N:P 随年降水增加而显著减少。本研究中叶片 N 含量随降雨量增加而显著增加,叶片 P 含量以及叶片 N:P 均与降雨量无显著相关性,这与上述结果并不一致,表明在较小尺度上叶片 N、P 的化学计量特征存在着较大的变异性。刺槐叶片中 C、N、P 含量的高低,在一定程度上体现了刺槐对当地气候环境的适应。

表 3 刺槐叶片与土壤各养分之间的相关系数

Table 3 The correlation coefficient between <i>Robinia pseudoacacia</i> leaf and soil nutrients							
土壤 Soil	土层/cm Soil layer	叶片 Leaf					
		C	N	P	C:N	C:P	N:P
C	0—10	0.348	0.340	0.174	-0.172	0.007	0.167
	10—20	-0.011	0.107	0.021	-0.163	-0.006	0.149
N	0—10	0.274	0.360	0.148	-0.221	0.010	0.223
	10—20	0.146	0.187	0.056	-0.131	0.043	0.178
P	0—10	0.161	0.415 *	0.175	-0.350	-0.084	0.233
	10—20	0.034	0.080	-0.003	-0.075	0.055	0.132
C:N	0—10	0.086	-0.161	-0.016	0.184	0.024	-0.160
	10—20	-0.296	-0.157	-0.052	-0.072	-0.107	-0.067
C:P	0—10	0.292	0.216	0.176	-0.079	-0.028	0.041
	10—20	-0.009	0.083	0.081	-0.138	-0.073	0.052
N:P	0—10	0.233	0.283	0.143	-0.163	-0.006	0.151
	10—20	0.155	0.175	0.117	-0.110	-0.024	0.087
速效磷 AP	0—10	0.313	0.176	0.485 **	0.032	-0.306	-0.358
	10—20	0.294	0.192	0.505 **	0.007	-0.327	-0.353
硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	0—10	0.030	-0.202	0.051	0.230	0.018	-0.200
	10—20	0.055	0.148	0.291	-0.143	-0.252	-0.149
铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	0—10	0.357	0.529 **	0.336	-0.341	-0.167	0.127
	10—20	0.186	0.418 *	0.050	-0.332	0.032	0.340

* 表示 0.05 水平上显著, ** 表示 0.01 水平上显著

3.2 土壤养分指标沿水分梯度的变化规律

本项研究中,土壤呈现弱碱性,土壤 TN 与 SOC 均随着降雨量增加而增加(图 2),土壤碳氮含量均呈现出从南向北逐渐减小的趋势,这与曾全超^[34]、李佳佳等^[24]的研究结果相似。这是因为植物种类、丰度、生物量与土壤 C、N 含量有关,随着降雨量的减少,刺槐林地土壤含水量也相应减少^[35],地上植被的生物量以及凋落物量也会随之减少^[33],因此,土壤碳氮含量呈现逐渐降低的趋势。土壤铵态氮随着降雨量的增加而显著增加,这与周才平等^[36]的研究结果一致。这主要是因为随着降雨量的增多,土壤含水量也随之增加,土壤湿度与土壤的矿化速率呈正相关^[36]。此外,研究区从南向北,土壤类型也逐渐向砂黄土转变,砂质土保肥保水性差,导致土壤养分含量呈现减小的趋势^[24,33]。

土壤深度是决定土壤养分含量变化的重要因素^[2]。刺槐林地 0—10 cm 和 10—20 cm 土层土壤 C、N 含量具有显著差异,而土壤 TP 差异不显著。土壤养分含量随着土层深度的增加而降低,这与 Müller^[37]、赵晓单等^[38]的研究结果相似。这是因为土壤 C、N、P 三者来源不同,土壤 C、N 主要源于凋落物、动植物残体和微生物的分解和转化的过程,它们在表层聚集并逐渐向下层迁移^[39];土壤中磷素的获取相对单一,磷主要来自于岩石风化^[12],且 P 是一种沉积型元素,在土壤中相对迁移较少^[40],因此在两土层间无显著差异。相关研究表明^[41],随着土层加深,C:N 无显著变化,而 C:P 及 N:P 显著减小,这与本研究结果较一致。随着土层加深,SOC、TN 含量显著减少,而 TP 含量比较稳定,因此 C:P 和 N:P 具有相同的变化趋势。

3.3 刺槐叶片化学计量学特征与土壤 C、N、P 含量的相关性分析

土壤 C、N、P 生态化学计量比是评价土壤养分及其质量的重要指标^[42]。由于人为因素以及自然成土因素的影响,不同降雨梯度下土壤 C、N、P 有较大的变化,从而土壤 C:N、C:P、N:P 存在着一定的空间变异性。本研究中,土壤 C:N 随着降雨量的升高没有显著变化,主要是因为虽然土壤 C、N 含量变异较大,但是土壤碳氮空间分布具有一致性^[34,43]。土壤中 N:P 用来指示生境中 N 或 P 素的不足,衡量植物生长过程中养分的供应状况^[3],土壤 N:P 随降水增加而显著增加,表明刺槐人工林地随着降水增加,土壤 N 素限制减弱,P 素限制不断加强,这与赵姍宇等^[14]研究结果一致。土壤 C:P 可以反映 P 素的有效性^[17],较高的 C:P 是磷有效性低的一个指标^[44],对黄土高原南北样带而言,南部气候高温多雨,属于半湿润区;北部气候寒冷干燥,属于半干旱区^[24]。高温多雨可加快岩石风化及磷素的淋溶^[33],所以研究区从北向南 C:P 呈增加趋势。

植物地上部分元素含量通常与土壤有着密切的关系^[3,26],但本研究中,只有土壤 TP 与植物叶片 N 含量存在显著相关性($P < 0.05$),植物碳磷及化学计量与土壤 C:N、C:P、N:P 均无显著相关性,这与相关研究结果相似^[45-46]。这可能是由于植物对土壤中矿质元素的吸收以及在体内的运输是一个极其复杂的过程,会受到土壤水分、pH、营养元素以及微生物活性等多种因素的影响^[18]。其次,土壤全磷、全氮的含量只代表了土壤中元素的总量,其中只有部分元素能被植物吸收利用。本研究中叶片 P 含量与土壤速效磷呈极显著正相关,叶片 N 含量与土壤铵态氮含量呈显著正相关关系正好能说明这一点。最后,这可能是由于采样点不同、土壤生物以及人为干扰的影响。其中,地形会影响到土壤的微气候条件^[47],如坡度会影响到土壤养分的堆积迁移,坡向制约生境的光照与水分状况^[48],不同的水热条件会导致植物生长状况和养分利用状况不同,并且植物群落和种类也会在一定程度上影响植物体化学元素的含量^[32]。凋落物作为联系土壤与植物的纽带,对于养分归还起到了重要作用,但目前在黄土高原南北样带降雨梯度下植物-凋落物-土壤之间养分循环还不清楚,在以后应该展开更深入的研究。

4 结论

(1) 黄土高原南北样带刺槐叶片 C、N 含量与降雨量存在着显著的相关关系,叶片 C、N 含量随着降雨量的增加而显著升高,但叶片 P 含量增加趋势不明显。叶片 C:N、C:P、N:P 随降雨量的变化不显著,叶片 N:P > 16,说明黄土高原刺槐生长主要受 P 元素限制。

(2) 黄土高原南北样带刺槐林地土壤 C、N 含量随着降雨量的减少而显著减少,说明土壤 C、N 含量在空

间分布上具有一致性;土壤 P 含量在 0—10 cm 土层随着降雨量的减少而显著减少,在 10—20 cm 土层无显著变化。土壤碳氮磷化学计量学特征的变化也不同,土壤 C:P 和 N:P 随着降雨量的增加而显著增加,而 C:N 比的变化则不显著。

(3)刺槐林地土壤 TP 与植物叶片 N 含量存在显著相关性($P<0.05$),其他叶片的化学计量特征均与土壤 C、N、P 没有显著的相关关系,这可能是由于选取的采样点不同、土壤生物、人为干扰以及生境因子的影响。未来研究可结合同位素技术,阐明养分在植物-土壤系统中不同组分间的来源和转移,有助于理解各组分之间的相关关系。

参考文献(References):

- [1] 吴建平,韩新辉,许亚东,任成杰,杨改河,任广鑫. 黄土丘陵区不同植被类型下土壤与微生物 C, N, P 化学计量特征研究. 草地学报, 2016, 24(4): 783-792.
- [2] 吕金林,闫美杰,宋变兰,关晋宏,时伟宇,杜盛. 黄土丘陵区刺槐、辽东栎林地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征. 生态学报, 2017, 37(10): 3385-3393.
- [3] 汪宗飞,郑粉莉. 黄土高原子午岭地区人工油松林碳氮磷生态化学计量特征. 生态学报, 2018, 38(19): 6870-6880.
- [4] 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(10): 3622-3630.
- [5] 卢同平,史正涛,牛洁,张文翔. 我国陆生生态化学计量学应用研究进展与展望. 土壤, 2016, 48(1): 29-35.
- [6] Yue K, Fornara D A, Yang W Q, Peng Y, Li Z J, Wu F Z, Peng C H. Effects of three global change drivers on terrestrial C:N:P stoichiometry: a global synthesis. Global Change Biology, 2017, 23(6): 2450-2463.
- [7] 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.
- [8] He M Z, Dijkstra F A, Zhang K, Li X R, Tan H J, Gao Y H, Li G. Leaf nitrogen and phosphorus of temperate desert plants in response to climate and soil nutrient availability. Scientific Reports, 2015, 4(1): 6932.
- [9] 何茂松,罗艳,彭庆文,杨思琪,李凯辉,韩文轩. 新疆 67 种荒漠植物叶碳氮磷计量特征及其与气候的关系. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2171-2180.
- [10] 姜沛沛,曹扬,陈云明,赵一婷. 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.
- [11] Luo W T, Elser J J, Lü X T, Wang Z W, Bai E, Yan C F, Wang C, Li M H, Zimmermann N E, Han X G, Xu Z W, Li H, Wu Y N, Jiang Y. Plant nutrients do not covary with soil nutrients under changing climatic conditions. Global Biogeochemical Cycles, 2015, 29(8): 1298-1308.
- [12] 李喜霞,杜天雨,魏亚伟,周永斌. 阔叶红松林生态化学计量学特征及其对纬度梯度的响应. 生态学报, 2018, 38(11): 3952-3960.
- [13] 吴昊,邹梦茹,王思芊,万洪秀. 秦岭松栎林土壤生态化学计量特征及其对海拔梯度的响应. 生态环境学报, 2019, 28(12): 2323-2331.
- [14] 赵姗宇,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): 7189-7197.
- [15] 李一春,余海龙,王攀,牛玉斌,樊瑾,朱湾湾,黄菊莹. 降水量对荒漠草原植物群落多样性和 C:N:P 生态化学计量特征的影响. 中国草地学报, 2020, doi: 10.16742/j.zgcedxb.20190194.
- [16] 朱湾湾,王攀,樊瑾,牛玉斌,余海龙,黄菊莹. 降水量及 N 添加对宁夏荒漠草原土壤 C:N:P 生态化学计量特征和植被群落组成的影响. 草业学报, 2019, 28(9): 33-44.
- [17] 王誉陶,李建平,井乐,张翼,张娟. 降雨控制对黄土高原典型草原土壤生态化学计量及微生物多样性的影响. 生态学报, 2020, 40(5): 1517-1531.
- [18] 丁小慧,罗淑政,刘金巍,李魁,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.
- [19] 刘海威. 黄土丘陵区草地群落生物学及生态化学计量学特征对降水改变的响应分析评价[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2018.
- [20] Bai X J, Wang B R, An S S, Zeng Q C, Zhang H X. Response of forest species to C:N:P in the plant-litter-soil system and stoichiometric homeostasis of plant tissues during afforestation on the Loess Plateau, China. CATENA, 2019, 183: 104186.
- [21] 邓健,张丹,张伟,任成杰,郝雯晖,刘冲,韩新辉,杨改河. 黄土丘陵区刺槐叶片-土壤-微生物碳氮磷化学计量学及其稳态性特征. 生态学报, 2019, 39(15): 5527-5535.
- [22] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental

Panel on Climate Change. Cambridge; Cambridge University Press, 2013.

- [23] 马鹏里, 杨金虎, 卢国阳, 朱颀, 刘卫平. 西北地区东部气候的转折性变化. 高原气象, 2020(2019-12-07). <https://www.cnki.net/KCMS/detail/62.1061.P.20191206.0937.002.html>.
- [24] 李佳佳, 樊妙春, 上官周平. 黄土高原南北带刺槐林土壤碳、氮、磷生态化学计量特征. 生态学报, 2019, 39(21): 7996-8002.
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [26] 曾昭霞, 王克林, 刘孝利, 曾馥平, 宋同清, 彭晚霞, 张浩, 杜虎. 桂西北喀斯特森林植物凋落物-土壤生态化学计量特征. 植物生态学报, 2015, 39(7): 682-693.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] Koerselman W, Meuleman A F M. The vegetation C:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation. *Journal of Applied Ecology*, 1996, 33(6): 1441-1450.
- [32] 张萍, 章广琦, 赵一娉, 彭守璋, 陈云明, 曹扬. 黄土丘陵区不同森林类型叶片凋落叶-土壤生态化学计量特征. 生态学报, 2018, 38(14): 5087-5098.
- [33] 李婷, 邓强, 袁志友, 焦峰. 黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征. 环境科学, 2015, 36(8): 2988-2996.
- [34] 曾全超, 李鑫, 董扬红, 李娅芸, 程曼, 安韶山. 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, 30(5): 870-879.
- [35] 李慧. 陕北黄土丘陵区不同降雨量区土壤-植物生态化学计量学特征研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [36] 周才平, 欧阳华, 刘金福. 温度和湿度对暖温带落叶阔叶林土壤氮矿化的影响. 植物生态学报, 2001, 25(2): 204-209.
- [37] Müller M, Oelmann Y, Schickhoff U, Böhner J, Scholten T. Himalayan treeline soil and foliar C:N:P stoichiometry indicate nutrient shortage with elevation. *Geoderma*, 2017, 291: 21-32.
- [38] 赵晓单, 曾全超, 安韶山, 方璞, 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.
- [39] 朱仁欢, 李玮, 郑子成, 李廷轩, 洪月, 何秋佳, 田宗渠. 退耕植茶地土壤碳氮磷生态化学计量学特征. 浙江农林大学学报, 2016, 33(4): 612-619.
- [40] 章广琦. 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及其变化[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [41] Zhang K, Su Y Z, Yang R. Variation of soil organic carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry and biogeographic factors across the desert ecosystem of Hexi Corridor, northwestern China. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(1): 49-57.
- [42] 刘倩, 王书丽, 邓邦良, 郑翔, 黄立君, 郭晓敏, 张学玲, 张令. 武功山山地草甸不同海拔凋落叶-土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量特征. 应用生态学报, 2018, 29(5): 1535-1541.
- [43] 李相楹, 张维勇, 刘峰, 张珍明, 何腾兵, 林昌虎. 不同海拔高度下梵净山土壤碳、氮、磷分布特征. 水土保持研究, 2016, 23(3): 19-24.
- [44] 李丹维, 王紫泉, 田海霞, 和王祥, 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.
- [45] 张亚亚. 青藏高原植物-土壤碳氮磷化学计量特征及其对环境因子的响应[D]. 天津: 天津师范大学, 2017.
- [46] 谭海霞, 金照光, 孙富强, 耿世刚. 滦河口湿地植物-土壤生态化学计量相关性研究. 水土保持研究, 2019, 26(2): 68-73.
- [47] 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.
- [48] Mären I E, Karki S, Prajapati C, Yadav R K, Shrestha B B. Facing north or south: Does slope aspect impact forest stand characteristics and soil properties in a semiarid trans-Himalayan valley? *Journal of Arid Environments*, 2015, 121: 112-123.