

DOI: 10.5846/stxb201711172056

李路, 常亚鹏, 许仲林. 天山雪岭云杉林土壤 CNP 化学计量特征随水热梯度的变化. 生态学报, 2018, 38(22): - .

Li L, Chang Y P, Xu Z L. Stoichiometric characteristics of *Picea schrenkiana* forests with a hydrothermal gradient and their correlation with soil physicochemical factors on Tianshan Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(22): - .

天山雪岭云杉林土壤 CNP 化学计量特征随水热梯度的变化

李 路^{1,2}, 常亚鹏^{1,2}, 许仲林^{1,2,*}

1 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046

2 新疆大学资源与环境科学学院绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046

摘要:生态化学计量学是研究有机体所需碳(C)、氮(N)、磷(P)等营养元素之间多重平衡关系的科学。本研究以天山雪岭云杉林为研究对象,分析土壤 C、N、P 化学计量的特征及其与温度和降水的关系,并利用冗余分析(Redundancy analysis, RDA)技术分析了土壤 C、N、P 化学计量特征与理化因子的关系。结果表明,0—10 cm 层 C、N、P 含量的变化范围分别是 44.6—143.4、0.190—0.940、0.086—0.286 g/kg, 10—30 cm 层 C、N、P 含量分别介于 23.0—131.0、0.122—0.589、0.032—0.178 g/kg 之间, 30—80 cm 层三者的变化范围分别为 14.5—67.0、0.149—0.397、0.062—0.169 g/kg。0—10 cm 层 C、N、P 含量与年均温度存在显著的相关关系, 0—10 cm 和 10—30 cm 层 P 含量与年降水量之间的相关性显著; 0—10 cm 层 C:P 比与年均温度之间存在显著线性关系, 0—10 cm 与 10—30 cm 层 N:P 比均随年均温度和年降水量的增大而增大。冗余分析结果表明,在 0—30 cm 层中,土壤含水量和容重是土壤 C、N、P 化学计量特征的主要驱动因子,土壤含水量与 C:P 和 N:P 值成正相关关系,容重与 N:P 值成负相关关系;在 30—80 cm 层中,土壤含水量和土壤粘粒含量是土壤 C、N、P 化学计量特征的主要驱动因子,土壤含水量与 N 和 P 值成正比,容重与 C、C:N、C:P 和 N:P 成正比,与 N 和 P 成反比;电导率和 pH 对土壤 C、N、P 化学计量特征的影响并未达到显著程度,可能是研究区土壤的电导率和 pH 的差异较小。

关键词:雪岭云杉林;化学计量特征;年均温度;年降水量;理化因子

Stoichiometric characteristics of *Picea schrenkiana* forests with a hydrothermal gradient and their correlation with soil physicochemical factors on Tianshan Mountain

LI Lu^{1,2}, CHANG Yapeng^{1,2}, XU Zhonglin^{1,2,*}

1 College of Resource and Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

2 Key Laboratory of Oasis Ecology, College of Resource and Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

Abstract: Ecological stoichiometry focuses on the equilibrium relationships among carbon (C), nitrogen (N), phosphorus (P), and other nutrients that required by organisms. The present study firstly investigated the soil C, N and P concentrations and their stoichiometric characteristics in *Picea schrenkiana* (Schrenk's spruce) forests. Then we evaluated the relationships between these concentrations and stoichiometric characteristics with mean annual temperature (MAT) and mean annual precipitation (MAP). Finally, redundancy analysis (RDA) was used to study relationships between soil stoichiometry and soil C, N and P stoichiometry. The results showed that the C, N, and P concentrations in the 0—10 cm soil layer were 44.6—143.4, 0.190—0.940, and 0.086—0.286 g/kg, respectively; the concentrations were lower with 23.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41361098, 31500398)

收稿日期:2017-11-17; **网络出版日期:**2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: galinwa@gmail.com

0—131.0 g/kg for C, 0.122—0.589 g/kg for N, and 0.032—0.178 g/kg for P in 10—30 cm depth, compare with 0—10 cm depth. In 30—80 cm depth, C, N, and P concentrations were 14.5—67.0, 0.149—0.397, and 0.062—0.169 g/kg, respectively. C, N, and P concentrations in 0—10 cm soils were significantly correlated with MAT, P concentrations in 0—10 and 10—30 cm soils have significant relationships with MAP. C:P ratios of 0—10 cm soils was linearly correlated MAT. N:P ratios in 0—10 and 10—30 cm soils increased with MAT and MAP. The RDA showed that in the 0—30 cm soils, C, N, and P stoichiometry were mainly affected by soil moisture content and bulk density, soil moisture content was positively correlated with C:P and N:P ratios, soil bulk density was negatively correlated with the N:P ratio. In 30—80 cm soils, C, N, and P stoichiometry were primarily driven by soil moisture content clay content. Specifically, soil moisture content was positively correlated to N and P concentrations, bulk density was positively correlated to C, C:N, C:P, and N:P ratio and negatively to N and P concentrations. Additionally, we did not found significant relationships between electrical conductivity and pH with C, N, and P stoichiometry, which could be due to the non-significant difference in soil EC and pH in our study area.

Key Words: *Picea schrenkiana* forests; stoichiometric characteristics; average annual temperature; average annual precipitation; physicochemical factor

生态化学计量学最早被海洋生态学家和地球化学家用以理解养分限制和养分循环^[1]。近年来,生态化学计量学成为了陆地生态系统生物化学、土壤化学领域的新方向,是研究土壤—植物相互作用与碳(C)、氮(N)、磷(P)等元素循环的新思路^[2]。目前,生态化学计量学已被广泛应用于凋落物分解、种群动态、限制性元素的判断、养分利用效率、生态系统比较分析等生态学领域的研究^[3]。生态化学计量学是当前全球变化生态学和生物地球化学循环的探究热点^[4],土壤化学计量比是反映土壤内部 C、N、P 相对含量的主要指标,研究土壤化学计量比有助于确定土壤生态过程对全球变化的响应^[5],其对揭示植被养分的获取过程及 C、N、P 等元素的循环和平衡机制具有重要的意义^[6]。

天山雪岭云杉林生态系统位于我国西北干旱半干旱区,是干旱区生态系统的重要组成部分,目前关于天山雪岭云杉林土壤养分的研究已有报道,但相关研究主要关注生态化学计量比的整体特征^[7],对于雪岭云杉林不同土层生态化学计量特征与气候因子(如温度和降水)和环境因子之间关系的研究较少。本研究系统分析了雪岭云杉林不同土层 C、N、P 化学计量特征及其与温度和降水的关系,并结合数量生态学的冗余分析(Redundancy analysis, RDA)技术分析了化学计量特征与理化因子的相关性,来探究年均温度和年降水量对雪岭云杉林不同土层养分供应的决定作用,以及对理化因子的响应关系,为进一步探究干旱半干旱区植被与土壤化学计量特征的关系奠定基础。

1 研究区概况

天山山脉横亘新疆全境,位于准葛尔盆地以南,塔里木盆地北缘,跨 80°—89°E, 42°—45°N。属于温带大陆性干旱气候,年均温度范围为-0.66—3.75℃,气温年较差较大,年降水量为 400—600 mm,降水多集中在 5—9 月份。天山北坡植被类型多样,由山脚至山顶依次为山地草原、山地草甸草原、针叶林、高山草原、高山垫状植物和积雪冰川。天山北坡(阴坡)的森林带范围是 1600 m 到 2800 m,主要树种为雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)林。

2 材料与方法

2.1 样品采集与分析

本研究选取昭苏、精河、沙湾、尼勒克、乌鲁木齐南山、阜康等地的天山北坡雪岭云杉林作为采样区域进行土壤样本的采集(图 1)。野外采样工作中,选取海拔梯度连续的坡面,以 50 m 海拔高度为间隔,设置 20 m×

20 m 的样方,在样方内随机选取 3 个点利用土钻采集 0—80 cm(10 cm 间隔)的土样,分层将 3 点的土样混合均匀后装入自封袋。在 5 个坡面共钻取了 89 个土壤剖面,得到 606 个土壤样本。将采集的土壤样本自然风干,磨细后过 0.149 mm 筛,送实验室分析。土壤有机 C 采用重铬酸钾氧化-外加热法测定;全 N 采用凯氏定 N 仪测定;全 P 采用 $\text{HClO}_4\text{--H}_2\text{SO}_4$ 法测定^[8]。

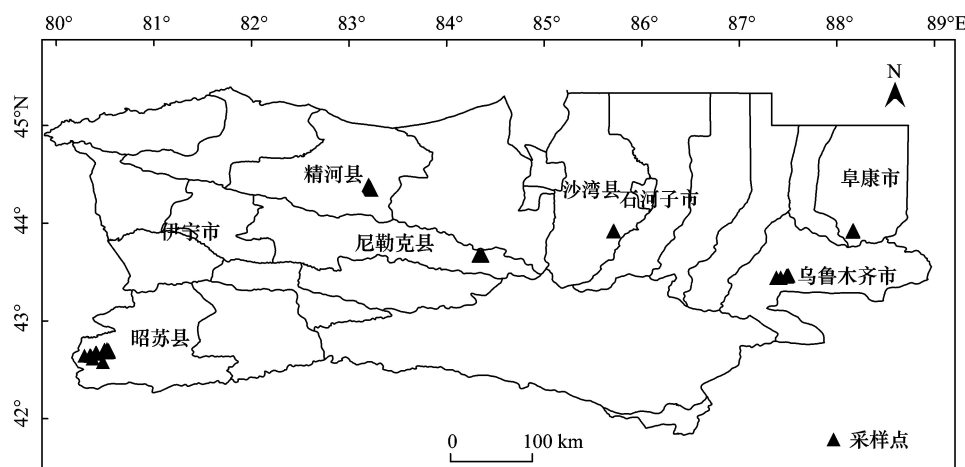


图 1 采样点分布图

Fig.1 Distribution of sampling sites

2.2 数据处理

本研究使用的年均温度和年降水量来自于 Worldclim 数据集^[9]。利用 Excel 2010 整理所有数据的平均值和标准差,运用 Pearson 相关系数评估土壤 C、N、P 含量及其与化学计量比之间的相关性,采用 Origin 8.5 软件拟合线性与非线性响应关系并制图,并对各土壤层的 C、N、P 含量以及生态化学计量比对年均温度和年降水量的响应趋势进行显著性分析。

本研究使用的土壤理化因子数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)。将土壤 C、N、P 化学计量特征作为研究对象,以土壤砾石含量、黏土含量、pH、土壤容重和电导率作为环境因子,通过 CANOCO 4.5 软件分析研究对象与环境因子的相关关系。分析表明各层(0—30 cm 和 30—80 cm)土壤 C、N、P 化学计量特征与环境因子的变异膨胀系数均小于 20,说明上述均可作为环境因子变量进行分析。除趋势对应分析(Detrended correspondence analysis, DCA)表明各层最大的排序轴梯度长度(Lengths of gradient, LGA)分别为 0.987 和 0.862(LGA<3),说明适合线性排序法,可以采用 RDA 技术分析各层土壤 C、N、P 化学计量特征与环境因子的关系。

3 结果

3.1 不同深度土壤层 C、N、P 含量及生态化学计量比之间的相关性

如表 1 所示,0—10 cm 层 C、N、P 含量变化范围分别是 44.6—143.4、0.190—0.940、0.086—0.286 g/kg,平均值分别为 80.1、0.577、0.171 g/kg,变异系数分别为 57%、68%、47%;10—30 cm 层三者的变化范围分别是 23.0—131.0、0.122—0.589、0.032—0.178 g/kg,平均值分别为 51.8、0.495、0.135 g/kg,变异系数分别为 53%、64%、45%;30—80 cm 层 C、N、P 含量的变化范围分别 14.5—67.0、0.149—0.397、0.062—0.169 g/kg,平均值分别为 33.3、0.258、0.111 g/kg,变异系数分别为 54%、66%、40%。以上结果显示,土壤 C、N、P 含量及标准差均随土壤深度增加而降低。就变异性而言,土壤表层(0—10 cm)和深层(30—80 cm)C、N 含量的变异性高于中层(10—30 cm),P 含量的变异性随土壤深度的增加而降低。

不同土壤深度 C、N、P 含量的相关性呈现出一定的差异。由表 2 可知,0—10 cm 层的 C 与 N、P 含量及 N:P 比均呈不同程度的正相关,但仅与 N 含量的相关性达到极显著水平($P<0.01$)。该层 N 含量与 P 含量呈

正相关,与 C:P 比负相关,其中,与 P 含量的相关性显著。P 含量与 C:N 比呈负相关。

表 1 不同土壤深度土壤 C、N、P 含量变化特征

Table 1 Variation characteristics of soil C, N and P contents in different soil depths

项目 Item	土层深度 Soil depth/cm	均值 Mean/cm	标准差 SD	变异系数 CV/%	最小值 Min/cm	最大值 Max/cm
C/(g/kg)	0—10	80.1	45.7	57	44.6	143.4
	10—30	51.8	27.6	53	23.0	131.0
	30—80	33.3	18.1	54	14.5	67.0
N/(g/kg)	0—10	0.577	0.391	68	0.190	0.940
	10—30	0.395	0.252	64	0.122	0.589
	30—80	0.258	0.170	66	0.149	0.397
P/(g/kg)	0—10	0.171	0.080	47	0.086	0.286
	10—30	0.135	0.061	45	0.032	0.178
	30—80	0.111	0.044	40	0.062	0.169

10—30 cm 土壤层的 C 与 N、P 含量及 N:P 比均呈不同程度的正相关,且与 N、P 含量的相关性显著($P<0.05$,表 2)。该层 N 与 P 含量呈正相关,与 C:P 比呈负相关,其中,与 P 含量的相关性显著。P 含量与 C:N 比呈负相关。

30—80 cm 深度土壤中,C、N、P 含量及其化学计量比之间的相关系数,结果显示,该层 C 与 N、P 含量、N:P 比呈不同程度的正相关,其中,与 N 含量、N:P 比相关性显著($P<0.05$,表 2)。N 与 P 含量呈正相关,与 C:P 比呈负相关,且与 P 含量的相关性极显著($P<0.01$)。P 含量与 C:N 比呈负相关。

表 2 不同土壤深度中 C、N、P 含量及其计量比之间相关系数

Table 2 The correlation coefficient of soil C, N, P content and stoichiometry in different soil depths

土层深度 Soil depth/cm	C	N	P	C:N	C:P	N:P
C	0—10	1	0.22 **	0.09	—	0.04
	10—30	1	0.30 **	0.23 *	—	0.13
	30—80	1	0.33 **	0.15	—	0.22 *
N	0—10	1	0.25 *	—	-0.11	—
	10—30	1	0.28 *	—	-0.15	—
	30—80	1	0.41 **	—	-0.04	—
P	0—10	1	1	-0.07	—	—
	10—30	1	1	-0.14	—	—
	30—80	1	1	-0.17	—	—

*. 表示显著相关($P<0.05$); **. 表示极显著相关($P<0.01$); “—”表示存在自相关关系,不能进行相关分析

整体来看,不同土壤深度中的 C、N、P 含量及其计量比之间均存在相关关系。具体而言,C 含量与 N、P 含量及 N:P 比均正相关,其中与 N 含量的相关性极显著;N 含量与 P 含量呈极显著正相关,与 C:P 比呈负相关;P 含量与 C:N 比呈负相关。

3.2 土壤 C、N、P 化学计量特征随温度和降水的变化趋势

曲线拟合关系表明,土壤 C 含量随着年均温度的升高呈现先上升后下降的趋势(图 2),就不同深度土壤而言,0—10 cm 和 10—30 cm 层的 C 含量与年均温度之间的曲线拟合关系达到极显著水平($P<0.01$),30—80 cm 中二者的曲线拟合关系不显著($P>0.05$)。随年降水量的增加,各层(0—10、10—30 cm 和 30—80 cm)土壤 C 含量的曲线拟合关系均不显著($P>0.05$,图 2)。0—10 cm 层土壤 N 含量随着年均温度的升高也呈现先上升后下降的趋势(图 2),且曲线拟合关系达到显著水平($P<0.05$),10—30 cm 层和 30—80 cm 层中 N 含量

与年均温度之间的曲线拟合关系均不显著。在不同深度土壤中, N 含量对年降水量的响应与 C 含量类似(图 2)。0—10 cm 层的 P 含量随着年均温度的升高呈现显著下降的趋势($P < 0.05$, 图 2), 10—30 cm 和 30—80 cm 层中二者的曲线拟合关系不显著($P > 0.05$)。随年降水量的增加, 0—10 cm 和 10—30 cm 层的 P 含量也呈现出下降的趋势, 且曲线拟合关系显著($P < 0.05$)。30—80 cm 层的 P 含量与年降水量无明显的相关关系(图 2)。

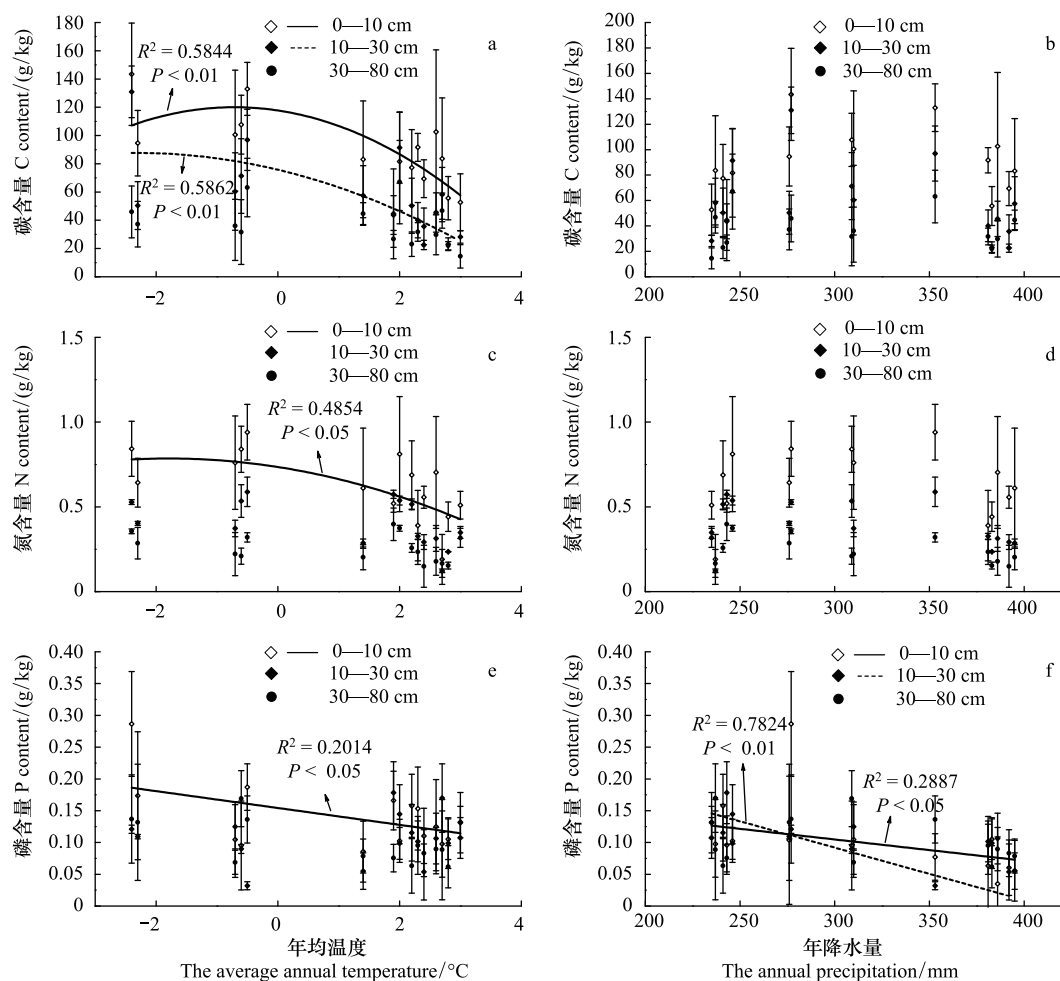


图 2 土壤 C、N、P 含量随年均温度和年降水量的变化规律

Fig. 2 Variation of soil C, N and P contents in soils with the average annual temperature and precipitation

雪岭云杉林 0—10 cm 土壤层的 C:P 比随年均温度呈现出显著的上升趋势($P < 0.05$), 其他各层土壤的 C:N 比和 C:P 比随年均温度和年降水量的增加未显示出明显的变化趋势(图 3); 随着年均温度的升高, 0—10 cm 和 10—30 cm 层土壤的 N:P 比均线性升高, 且线性关系显著($P < 0.05$); 30—80 cm 层土壤的 N:P 比未表现对年均温度变化的明显响应。与 N:P 比对年均温度的响应类似, 随年降水量的增加, 0—10 cm 和 10—30 cm 层的 N:P 比也线性升高且响应关系达到显著水平($P < 0.05$); 30—80 cm 层土壤的 N:P 比同样未表现出对年降水量变化的明显响应。

3.3 土壤 C、N、P 化学计量特征与土壤理化因子的相关性

除温度和降水外, 土壤理化因子之间的相互作用也影响土壤 C、N、P 化学计量特征。因此, 本研究通过 RDA 技术来分析各层土壤 C、N、P 化学计量特征与环境因子之间的相关关系。0—30 cm 层中, 土壤 C、N、P 化学计量特征在第 I 轴和第 II 轴的解释变量分别为 58.3% 和 3.5%, 第 III 轴和第 IV 轴的解释变量之和为 1.2%,

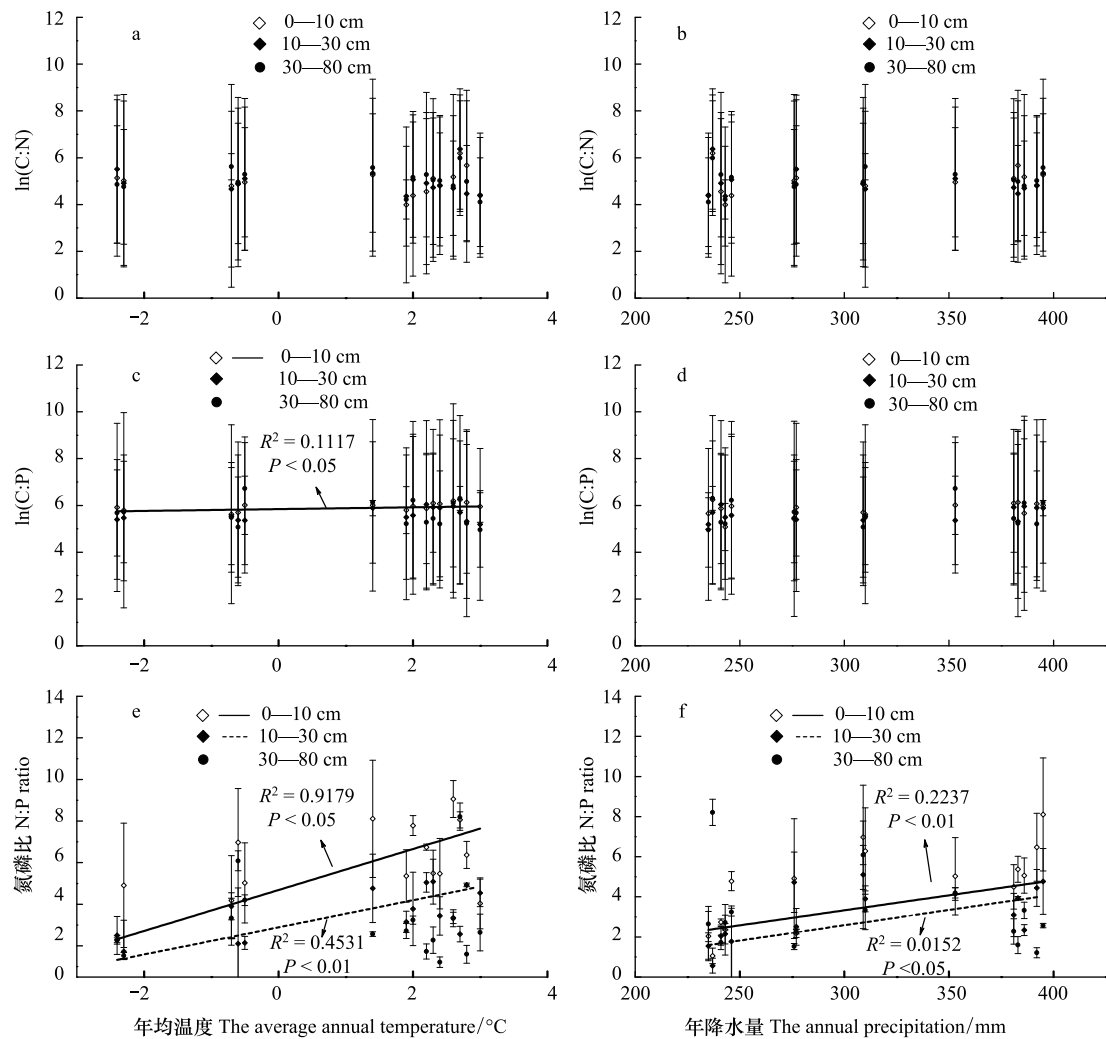


图3 土壤CNP比随年均温度和年降水量的变化规律

Fig.3 Variation of soil C : N : P in soils with the average annual temperature and precipitation

对土壤C、N、P化学计量特征和环境因子关系的累积解释变量为98.5%,由此知0—30 cm层土壤C、N、P化学计量特征与环境因子的关系主要由第Ⅰ轴决定。30—80 cm层中,土壤C、N、P化学计量特征在第Ⅰ轴和第Ⅱ轴的解释变量分别为43.0%和1.2%,累积解释土壤C、N、P化学计量特征变量为44.7%,且对土壤C、N、P化学计量特征和环境因子关系的累积解释变量为97.2%,由此知前两轴能够较好地说明土壤C、N、P化学计量特征与环境因子的关系,并且主要由第Ⅰ轴决定。

进一步得到0—30 cm层和30—80 cm层土壤C、N、P化学计量特征与理化因子的二维排序图(图4)。从图4可以看出,在0—30 cm层中,土壤含水量与容重的箭头连线最长,由此可知土壤含水量与容重对0—30 cm层土壤C、N、P化学计量特征变异有很好的解释。土壤含水量与C:P和N:P值成正比,与其他化学计量特征值成反比;容重与N:P值成反比,与其他化学计量特征值成正比,且与P的相关性最大。

从图4可以看出,在30—80 cm层中,土壤含水量和土壤粘粒含量的箭头连线最长,可知土壤含水量和土壤粘粒含量对30—80 cm层土壤C、N、P化学计量特征变异有很好的解释。土壤含水量与N和P值成正比,与其他化学计量特征值成反比;容重、土壤粘粒含量、电导率与C、C:N、C:P和N:P成正比,与N和P成反比。

综上所述,由二维排序图可以看出不同土壤层理化环境因子对土壤C、N、P化学计量特征的影响存在显著差异性。进一步对理化环境因子进行Monte-Carlo检验,得到0—30 cm和30—80 cm层土壤理化因子影响

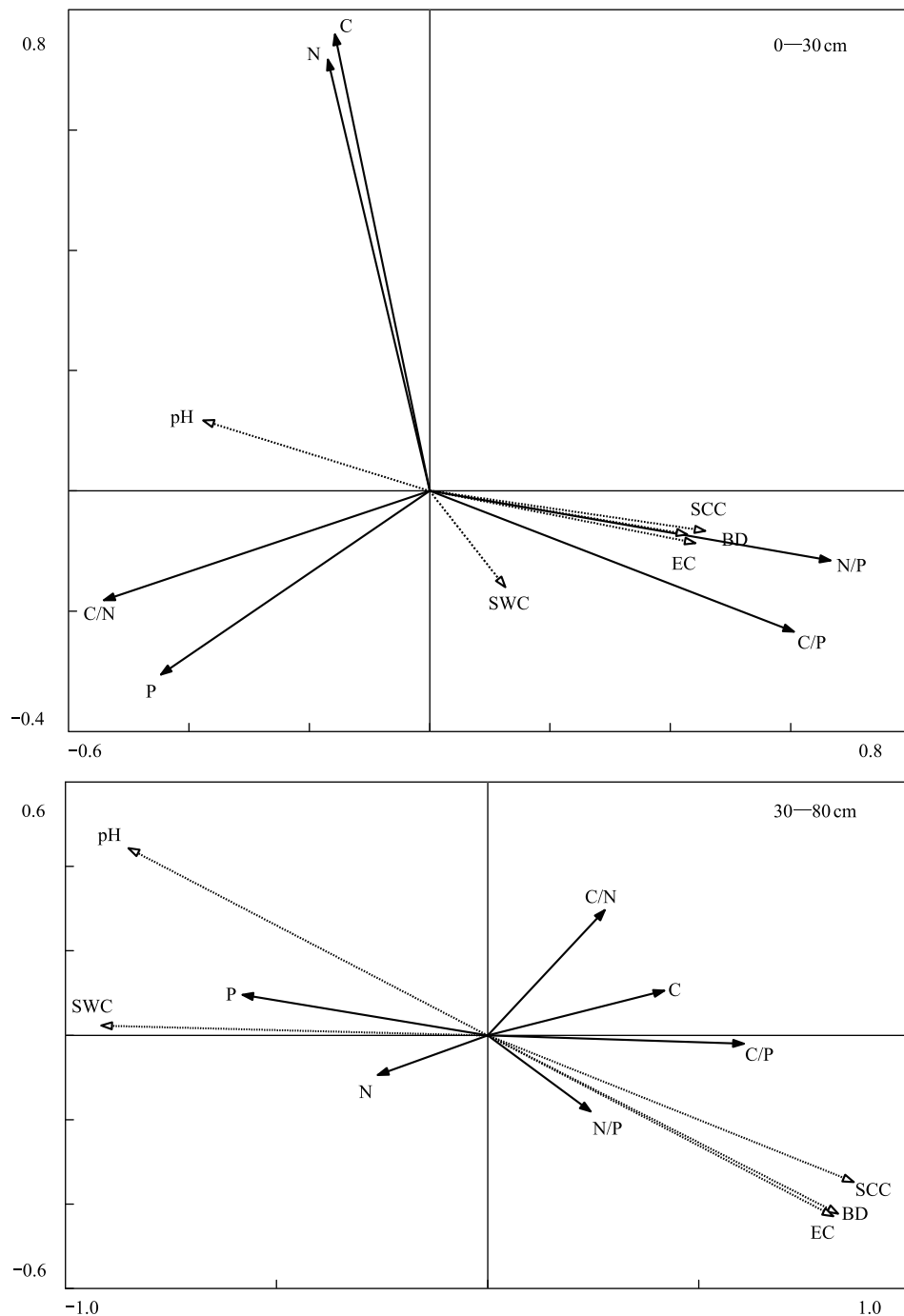


图 4 0—30 cm 和 30—80 cm 层土壤 C、N、P 化学计量特征与理化因子关系的冗余分析二维排序图

Fig.4 Bidimensional ordering chart of the RDA of relationships of stoichiometric characteristics of soil C, N and P with physicochemical factors in 0—30 cm and 30—80 cm

SWC:土壤含水量 Soil water content; SCC:土壤粘粒含量 Soil clay content; BD:容重 Bulk density; EC:电导率 Electrical conductivity

图中用实心箭头和实线表示土壤 C、N、P 化学计量特征,用空心箭头和虚线表示土壤理化因子。排序轴与箭头连线的夹角表示相关性的 大小,夹角越小,表明相关性越大。箭头连线的长短表示土壤 C、N、P 化学计量特征与土壤理化因子关系的大小,连线越长,表明相关性越大。 箭头连线之间的夹角表示土壤 C、N、P 化学计量特征与环境因子之间相关性大小

程度的排序(表 3)。0—30 cm 层土壤理化因子的重要性由大到小排序为:土壤含水量、容重、pH、土壤粘粒含 量、电导率,土壤含水量和容重对土壤 C、N、P 化学计量特征影响极显著($P<0.01$)。30—80 cm 层土壤理化因 子的重要性由大到小排序为:土壤含水量、土壤粘粒含量、电导率、容重、pH,其中土壤含水量对土壤 C、N、P

化学计量特征影响极显著 ($P = 0.001 < 0.01$), 土壤粘粒含量对 C、N、P 化学计量特征影响显著 ($P = 0.024 < 0.01$)。

表 3 0—30 cm 和 30—80 cm 层土壤理化环境变量解释的重要性排序和显著性检验结果

Table 3 Importance sequencing and Duncan test of physicochemical factors in 0—30 cm and 30—80 cm

土层深度 Soil depth/cm	指标 Index	重要性排序 Importance sequencing	<i>F</i>	<i>P</i>
0—30	土壤含水量	1	14.83	0.002
30—80	土壤含水量		12.97	0.001
0—30	容重	2	10.96	0.003
30—80	土壤粘粒含量		11.27	0.024
0—30	pH	3	10.42	0.057
30—80	电导率		9.76	0.062
0—30	土壤粘粒含量	4	8.29	0.06
30—80	容重		6.11	0.08
0—30	电导率	5	4.83	0.08
30—80	pH		2.05	0.35

4 讨论

4.1 温度和降水对土壤 C、N、P 含量及化学计量特征的影响

由于不同地区的年均温度和年降水量存在差异,使得 C、N、P 含量的空间分布不同。张亚茹等人通过对鼎湖山季风常绿阔叶林土壤有机 C 和全 N 的研究表明土壤有机 C 和全 N 含量存在着较显著的空间自相关性^[10],艾丽等人的研究表明在不考虑海拔差异的情况下,有机 C 和全 N 含量相关系数较高^[11]。本研究对雪岭云杉林内土壤有机 C 和全 N 进行了研究,结果表明二者呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$),这与上述结果相一致。相关研究证明,土壤 C 的主要来源是凋落物的分解和有机质^[12],而土壤全 N 的主要来源是凋落物合成的有机质^[13],因此,土壤 C 和 N 均与生物因素相关,且两者之间的呈显著正相关,两者的空间分布具有一致性^[14],这在本研究所涉及的天山雪岭云杉林也不例外,二者也具有极显著的正相关关系。大量研究表明,土壤表层有机 C 和全 N 的含量均大于深层^[15-16],本研究结果与其相一致。表层土壤有机 C 和全 N 主要来源于地表形成的枯枝落叶层^[17],并且凋落物与动植物残体基本集中在土壤表层,0—10 cm 层的生物量占整个土壤剖面的 90% 以上,因此表层土的有机 C 和全 N 的含量相对较高。气候是影响有机 C 垂直分布的主要因素^[18],0—10 cm 土壤层更容易受到温度和降水的影响,从而影响进入表层的植物残体和微生物活性,使得表层土壤的有机 C 和全 N 含量变异性大于深层。

研究表明,土壤全 P 的垂直变异性低于土壤有机 C 和全 N^[19]。在本研究中,0—10 cm 土壤层全 P 含量为 0.171 g/kg,低于我国 0—10 cm 土壤层全 P 含量均值 0.78 g/kg^[20],并且土壤全 P 含量的垂直分布和空间分布差异性均较小,这是由于土壤全 P 主要来自于岩石风化且迁移率很低,具有沉积性^[21-22]。本研究中 0—10 cm 和 10—30 cm 土壤层全 P 含量随着年均温度和年降水量的增加而显著降低 ($P < 0.05$),这与前人的研究相一致^[23]。气候影响土壤风化速率和养分元素的淋溶强度^[24],是影响全 P 空间分布的重要因素。温度升高会加快土壤风化速率,降水会加速 P 元素的淋溶过程^[12],从而导致土壤全 P 含量的降低,因此全 P 含量随着年均温度和年降水量的增加而减小。

曾全超等人研究表明 C:N 比受气候的影响较小^[25],本研究中 C:N 比总体随年均温度和年降水量没有明显的变化趋势,这是由于虽然土壤有机 C 和全 N 具有较大的空间变异性^[26],但是由于土壤有机 C 和全 N 随温度和降水变化的空间分布性一致,从而导致了整个土壤层中 C:N 比较为稳定。

0—10 cm 和 10—30 cm 层 C:P 随着年均温度和年降水量的增大而增大,这是由于湿热的地方生产力较高,从而使得土壤 C 和全 N 的含量较高,相对而言,由淋溶导致的 P 流失降低了 0—10 cm 和 10—30 cm 土层

中的 P 含量。土壤全 N 和全 P 是植物生长所必需的矿物质营养元素,也是生态系统中较为常见的限制性元素^[27],一些研究表明,土壤全 P 的有效性由土壤有机质的分解速率决定,C:P 值较小时说明 P 的有效性较高^[28]。在本研究区中,雪岭云杉林分布的西部地区年均温度和年降水量均较高,而东部的年均温度较高,年降水量较低(图 5),因此,与中东部雪岭云杉林分布区相比,西部地区土壤中 P 有效性会更高,中部和东部地区土壤 P 的有效性还需进一步对云杉林叶片的化学计量进行研究。水热组合条件是影响土壤 C、N、P 的主要因素之一,其与天山雪岭云杉林的分布有着密切的关系。

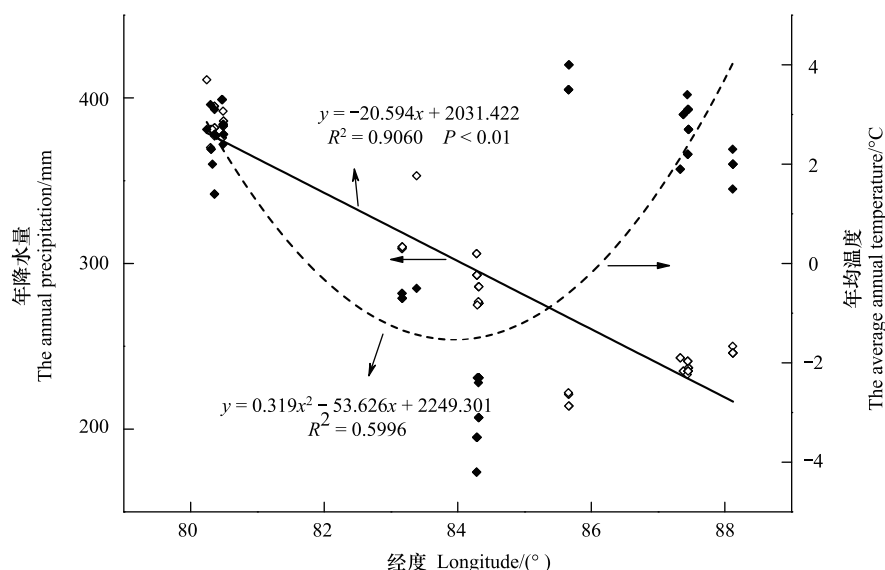


图 5 年均温度和年降水量随经度的变化关系

Fig.5 The relationships of mean annual temperature and annual precipitation with longitude

4.2 土壤 C、N、P 化学计量特征与其他理化因子的关系

土壤是植物吸收各种养分的载体,土壤中理化性质的改变对元素循环有重要的影响。丁小慧等人研究表明土壤含水量与土壤碳、氮、磷含量显著相关^[29]。肖烨等人对沼泽湿地土壤碳、氮、磷化学计量特征的研究表明土壤含水量是影响化学计量比的关键因素^[30]。本研究表明 0—30 cm 和 30—80 cm 层中土壤含水量均对土壤 C、N、P 化学计量特征起着最重要的作用,与上述研究结果相一致。相关研究表明,土壤水分是土壤系统元素循环的主要载体,它对土壤的特性和植物的生长有直接的影响^[31]。研究区降水差异较大,并且不同土壤层之间的含量不同,因此,土壤含水量存在差异,使得土壤含水量成为影响土壤 C、N、P 化学计量特征最主要的因素。土壤容重是土壤紧实度的敏感性指标,土壤越疏松多孔,容重越小,土壤越紧实,容重越大。其影响植物的生长过程,进而影响元素在土壤中的积累过程^[32]。相关研究表明,土壤容重小有利于土壤中元素的积累^[33],王维奇等人研究表明土壤容重大对凋落物的分解有一定的影响,进而抑制土壤元素的积累^[34]。研究区 0—30 cm 层土壤的容重相对较小,适宜土壤元素的积累,因此,0—30 cm 层中容重也是影响土壤 C、N、P 化学计量特征的因素之一。土壤粘粒含量指土壤中不同大小直径的矿物质颗粒的组合状况,对土壤的通透性、保蓄性以及养分含量等都有很大的影响。土壤质地包含砂粒、粗粉粒、中细粉粒、粘粒含量,相关研究表明,各养分含量与各粒径组成之间的相关性是由土壤颗粒的粗细程度决定的^[35]。30—80 cm 层土壤粘粒含量的差异性较大,因此,土壤粘粒含量是影响土壤 C、N、P 化学计量特征的因素之一。电导率和 pH 对 0—30 cm 层和 30—80 cm 层土壤 C、N、P 化学计量特征的影响均未达到显著水平。对于电导率和 pH 如何影响土壤 C、N、P 化学计量特征的研究较少,本研究区 0—30 cm 层和 30—80 cm 层土壤均偏中性,且盐碱程度差距不大,盐分的空间差异性小,因此,电导率和 pH 对土壤 C、N、P 化学计量特征的影响不大。从土壤含水量、土壤粘粒含量、容重等多角度对土壤 C、N、P 化学计量特征进行分析,有助于明确干旱区土壤 C、N、P 化学计量特征对理

化因子的响应,也是对于干旱区森林土壤元素与理化因子关系研究的有效尝试。进一步应探究土壤 C、N、P 化学计量特征及其理化因子对雪岭云杉林叶片 C、N、P 化学计量特征,进而了解干旱区森林生态系统的内稳性。

参考文献 (References):

- [1] 陈蕾, 李超伦. 海洋浮游生物的生态化学计量学研究进展. 应用生态学报, 2014, 25(10): 3047-3055.
- [2] Yu Q, Chen Q S, Elser J J, He N P, Wu H H, Zhang G M, Wu J G, Bai Y F, Han X G. Linking stoichiometric homeostasis with ecosystem structure, functioning and stability. Ecology Letters, 2010, 13(11): 1390-1399.
- [3] Homann P S. Convergence and divergence of nutrient stoichiometry during forest litter decomposition. Plant and Soil, 2012, 358(1/2): 251-263.
- [4] 冯德枫, 包维楷. 土壤碳氮磷化学计量比时空格局及影响因素研究进展. 应用与环境生物学报, 2017(2): 400-408.
- [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] 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.
- [7] 谢锦, 常顺利, 张毓涛, 王慧杰, 宋成程, 何平, 孙雪娇. 天山北坡植物土壤生态化学计量特征的垂直地带性. 生态学报, 2016, 36(14): 4363-4372.
- [8] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [9] E Waltari, R Schroeder, K McDonald, RP Anderson, A Camaval. Bioclimatic variables derived from remote sensing: assessment and application for species distribution modelling. Methods in Ecology and Evolution, 2014, 5(10): 1033-1042.
- [10] 张亚茹, 欧阳旭, 褚国伟, 张倩媚, 刘世忠, 张德强, 李跃林. 鼎湖山季风常绿阔叶林土壤有机碳和全氮的空间分布. 应用生态学报, 2014, 25(1): 19-23.
- [11] 艾丽, 吴建国, 刘建泉, 裴伟, 田自强, 常学向, 李捍东, 刘贤德. 土壤有机碳和全氮含量及其与海拔、植被和气候要素的关系——以祁连山中段北坡为研究对象. 中国园艺文摘, 2010, 26(3): 27-34.
- [12] 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.
- [13] 李博, 杨持, 林鹏. 生态学. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [14] 宫立, 刘国华, 李宗善, 叶鑫, 王浩. 川西卧龙岷江冷杉林土壤有机碳组分与氮素关系随海拔梯度的变化特征. 生态学报, 2017, 37(14): 4696-4705.
- [15] 杨敏, 杨飞, 杨仁敏, 杨帆, 张甘霖. 祁连山中段土壤有机碳剖面垂直分布特征及其影响因素. 土壤, 2017, 49(2): 386-392.
- [16] 王凯博, 时伟宇, 上官周平. 黄土丘陵区天然和人工植被类型对土壤理化性质的影响. 农业工程学报, 2012, 28(15): 80-86.
- [17] 李金芬, 程积民, 刘伟, 古晓林. 黄土高原云雾山草地土壤有机碳、全氮分布特征. 草地学报, 2010, 18(5): 661-668.
- [18] Yang Y H, Mohammad A, Feng J M, Zhou R, Fang J Y. Storage, patterns and environmental controls of soil organic carbon in China. Biogeochemistry, 2007, 84(2): 131-141.
- [19] 李玮, 郑子成, 李廷轩. 不同植茶年限土壤团聚体碳氮磷生态化学计量学特征. 应用生态学报, 2015, 26(1): 9-16.
- [20] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, Melillo J M, Hall C A S. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data. Biogeochemistry, 2010, 98(1/3): 139-151.
- [21] 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.
- [22] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 陈利顶. 黄土高原小流域土壤养分的时空变异及其影响因素. 自然科学进展, 2004, 14(3): 294-299.
- [23] 汪涛, 杨元合, 马文红. 中国土壤磷库的大小、分布及其影响因素. 北京大学学报: 自然科学版, 2008, 44(6): 945-952.
- [24] Delgado-Baquerizo M, Maestre F T, Gallardo A, Bowker M A, Wallenstein M D, Quero J L, Ochoa V, Gozalo B, García-Gómez M, Soliveres S, García-Palacios P, Berdugo M, Valencia E, Escolar C, Arredondo T, Barraza-Zepeda C, Bran D, Carreira J A, Chaieb M, Conceição A A, Derak M, Eldridge D J, Escudero A, Espinosa C I, Gaitán J, Gatica M G, Gómez-González S, Guzman E, Gutiérrez J R, Florentino A, Hepper E, Hernández R M, Huber-Sannwald E, Jankju M, Liu J, Mau R L, Miriti M, Moneris J, Naseri K, Noumi Z, Polo V, Prina A, Pucheta E, Ramírez E, Ramírez-Collantes D A, Romão R, Tighe M, Torres D, Torres-Díaz C, Ungar E D, Val J, Wamiti W, Wang D, Zaady E. Decoupling of soil nutrient cycles as a function of aridity in global drylands. Nature, 2013, 502(7473): 672-676.
- [25] 曾全超. 黄土高原不同植被生态系统土壤微生物多样性及其影响因素研究[D]. 杨陵: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2015.
- [26] 蒋芳. 中亚热带落叶阔叶林和常绿阔叶林土壤有机碳、全氮空间异质性比较[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2016.
- [27] 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.
- [28] 冯德枫, 包维楷. 土壤碳氮磷化学计量比时空格局及影响因素研究进展. 应用与环境生物学报, 2017, 23(2): 400-408.
- [29] 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.
- [30] 肖烨, 商丽娜, 黄志刚, 张文广, 薛振山, 张仲胜, 吕宪国. 吉林东部山地沼泽湿地土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量学特征. 地理科学, 2014, 34(8): 994-1001.
- [31] 李红林, 贡璐, 朱美玲, 刘曾媛, 解丽娜, 洪毅. 塔里木盆地北缘绿洲土壤化学计量特征. 土壤学报, 2015, 52(6): 1345-1355.
- [32] 赵一婷, 曹扬, 陈云明, 彭守璋. 黄土丘陵沟壑区森林生态系统生态化学计量特征. 生态学报, 2017, 37(16): 5451-5460.
- [33] 贡璐, 张海峰, 吕光辉, 杜东伟. 塔里木河上游典型绿洲不同连作年限棉田土壤质量评价. 生态学报, 2011, 31(14): 4136-4143.
- [34] 王维奇, 王纯, 曾从盛, 仝川. 闽江河口不同河段芦苇湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征. 生态学报, 2012, 32(13): 4087-4093.
- [35] 桑巴叶, 朱玉伟, 刘康, 陈启民, 褚奋飞. 伊犁河谷不同森林模式下土壤的营养特征和粒径组成. 水土保持通报, 2017, 37(5): 328-332.