

DOI: 10.5846/stxb201810222279

喻阳华, 钟欣平, 李红. 黔中石漠化区不同海拔顶坛花椒人工林生态化学计量特征. 生态学报, 2019, 39(15): - .

Yu Y H, Zhong X P, Li H. Ecological stoichiometry of *Zanthoxylum planispinum* var. *dintanensis* plantation at different altitudes in rocky desertification area of central Guizhou. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(15): - .

黔中石漠化区不同海拔顶坛花椒人工林生态化学计量特征

喻阳华^{1,*}, 钟欣平², 李 红²

1 贵州师范大学喀斯特研究院/国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001

2 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550025

摘要:了解黔中石漠化区不同海拔顶坛花椒 (*Zanthoxylum planispinum* var. *dintanensis*) 人工林的生态化学计量特征, 有助于深入认识其养分循环规律和元素丰缺状况。本研究对顶坛花椒人工林叶片、凋落物和土壤 C、N、P、K 含量进行了测定, 分析了生态化学计量特征及之间的关系。结果表明: (1) 顶坛花椒人工林叶片 OC、TN、TP、TK 分别为 228.11—446.81、0.96—5.69、2.17—5.60、6.42—17.74 g/kg, 凋落物 OC、TN、TP、TK 依次为 239.19—415.25、1.70—4.62、1.83—2.63、1.80—4.26 g/kg, 土壤 OC、TN、TP、TK 分别为 29.69—53.17、2.99—6.41、0.18—1.52、15.01—21.14 g/kg, 土壤养分呈现低 N 高 P 格局; (2) 叶片、凋落物、土壤 C、N、P、K 生态化学计量随海拔的分异规律不完全一致, 其变化特征能够表明 C、N 来源多样, P、K 来源相对固定; (3) 土壤养分含量与叶片养分含量、生态化学计量之间多表现出显著相关, 表明叶片养分主要来自土壤; 总体上, 土壤养分含量及其生态化学计量与凋落物养分含量具有弱的相关性, 与凋落物养分生态化学计量具有强的相关性, 表明凋落物和土壤之间存在一定的养分转换强度但是并非完全继承。

关键词:生态化学计量学; 叶片; 凋落物; 土壤; 顶坛花椒人工林; 黔中石漠化区

Ecological stoichiometry of *Zanthoxylum planispinum* var. *dintanensis* plantation at different altitudes in rocky desertification area of central Guizhou

YU Yanghua^{1,*}, ZHONG Xinping², LI Hong²

1 School of Karst Science/State Engineering Technology Institute for Karst Decertification Control, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China

2 School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China

Abstract: Understanding the ecological stoichiometry of *Zanthoxylum planispinum* var. *dintanensis* plantation at different altitudes in the rocky desertification area of central Guizhou is helpful to know the regularity of nutrient circulation and the status of element abundance and deficiency. In this study, the contents of C, N, P, and K in the leaves, litter and soil of the *Zanthoxylum planispinum* var. *dintanensis* plantation were determined. The ecological stoichiometry and the relationship between them were analyzed. The results showed that: (1) the organic carbon (OC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and total potassium (TK) of the leaves of *Zanthoxylum planispinum* var. *dintanensis* plantation were 228.11—446.81, 0.96—5.69, 2.17—5.60, 6.42—17.74 g/kg, respectively. The OC, TN, TP, and TK of litter were 239.19—415.25, 1.70—4.62, 1.83—2.63, 1.80—4.26 g/kg, respectively. The OC, TN, TP, and TK in the soil were 29.69—53.17, 2.99—6.41, 0.18—1.52, 15.01—21.14 g/kg, respectively. The soil nutrients showed the pattern of “low N and high P”. (2) The differentiation of C, N, P, and K in leaves, litter, and soil was not exactly consistent with the difference

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFC0502603); 贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2016]2610号)

收稿日期:2018-02-22; **网络出版日期:**2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuyanghua2003@163.com

of altitude. Its change characteristics showed that the sources of C and N were diverse, but the sources of P and K were relatively fixed. (3) There was a significant correlation between nutrient content and the ecological stoichiometry in soil and leaves, which indicated that the nutrients in the leaves were mainly from the soil. In general, soil nutrient content and its ecological stoichiometry had a weak correlation with litter nutrient content, but strongly correlated with litters nutrient ecological stoichiometry. It indicated that there was a certain nutrient conversion strength between litter and soil but not complete inheritance.

Key Words: ecological stoichiometry; leaf; litter; soil; *Zanthoxylum planispinum* var. *dintanensis* plantation; rocky desertification area of central Guizhou

石漠化是指在脆弱喀斯特生态环境下人类过度干扰诱发地表出现类似于荒漠化景观的演变过程或结果,导致生态系统结构退化和功能降低,植被恢复成为黔中石漠化地区生态治理的首选。贞丰县北盘江镇、关岭县花江镇自 1992 年起大规模种植顶坛花椒 (*Zanthoxylum planispinum* var. *dintanensis*),在石漠化地区退化生态系统恢复和山区社会经济发展中发挥了显著作用,顶坛花椒被认为是喀斯特石漠化山区恢复较好的物种选择^[1]。碳(C)是植物结构性元素,氮(N)、磷(P)是功能限制性元素^[2],它们作为土壤中不可替代的生源要素,是表征土壤肥力质量的重要因子^[3];作为植物基本化学元素,在其生长和各种生理调节机制中发挥着积极作用^[4]。生态化学计量学是研究生态系统能量和多重化学元素平衡及其对生态系统功能效应关系的科学^[5],统一了不同生物学科层次,结合了物理学、化学和生物学等多种学科理论,为研究生态系统养分限制与循环提供了新思路和新手段^[6-7]。

诸多学者开展了人工林生态化学计量学的研究。汪宗飞和郑粉莉^[8]研究揭示了人工油松 (*Pinus tabulaeformis*) 林植物、凋落物和土壤生态化学计量之间的互动关系,表明各层次生态化学计量特征随林龄的变化趋势各异。Zhang 等^[9]研究了不同年龄梭梭 (*Haloxylon ammodendron*) 叶片的生态化学计量和形态特征,通过二者结合能够反映梭梭的退化趋势。Fan 等^[4]研究了亚热带桉树人工林土壤生态化学计量特征与林龄的关系,发现化学计量受到森林生长和物种组成影响。Cao 和 Chen^[10]研究了黄土高原刺槐林的土壤生态化学计量特征,揭示了刺槐林生长衰退规律。在生态化学计量特征的海拔分异规律研究方面,许雪贇等^[11]研究了青藏高原火绒草叶片生态化学计量特征的海拔变异特征,结果显示其随海拔升高而降低。Feng 等^[12]的研究结果显示,海拔 2600—3500 m 的滇东高山栎 (*Q. aquifolioides*) 叶片氮含量随海拔升高而升高,印证了海拔影响叶片生态化学计量特征^[13]。付作琴等^[14]研究表明武夷山黄山松老叶较新叶对不同海拔土壤养分状况响应更敏感,更能指示土壤肥力特征;同时,黄山松细根 C、N 受海拔影响不显著,P、N:P 受海拔影响显著^[15]。由此可见,生态化学计量可以表征植物的生态策略,是指示植物生长、生产力和生态系统功能的重要指标^[16]。通过探讨元素的化学计量特征,能够在一定程度上反映植物的营养利用效率,判断限制生产力的元素类型^[17-18],在探究花椒人工林养分限制状况与生产力方面具有重要意义。

但是,目前未见同一人工林生态化学计量特征随海拔变化的报道,且植物生态化学计量特征随海拔的分异规律尚无确切定论。基于此,本文以黔中喀斯特石漠化地区顶坛花椒人工林为对象,研究其植物、凋落物、土壤的 C、N、P、钾(K)含量,试图回答以下 3 个科学问题:1) 揭示顶坛花椒人工林生态化学计量特征及其海拔分异规律;2) 探讨顶坛花椒人工林“植物-凋落物-土壤”主要元素计量特征的内在关联;3) 阐明顶坛花椒人工林养分丰缺特征。这对于我们更深入地认识顶坛花椒人工林的养分循环规律和元素丰缺机制具有科学价值。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

位于黔西南州贞丰县北盘江镇查耳岩村一带(105°38'48.48"E,25°39'35.64"N),生境具有明显的独特性。

主要表现为:(1)干热气候,气候类型主要为亚热带湿润季风气候,年均降雨量约 1100 mm,季节分配不均匀,冬春旱及伏旱严重,年均温为 18.4℃,年均极端最高温为 32.4℃,年均极端最低温为 6.6℃,年总积温达 6542.9℃,冬春温暖干旱、夏秋湿热,热量资源丰富。(2)河谷地形,区域内河谷深切,地下水深埋,海拔高度 530—1473 m,垂直高差约 940 m。(3)石漠化发育,属北盘江流域花江段,森林覆盖率较低,基岩裸露率在 50%—80%之间,碳酸盐岩类岩石占 78.45%,土壤以石灰岩为成土母质的石灰土为主,地表破碎,多处于中度、重度石漠化等级。

该区花椒种植年限近 30 a,但由于花椒的寿命普遍为 10—12 a,因此多次进行补植,使人工建植群落内包含了幼树、成年树和老树等不同年龄的植株,森林生态系统处于快速演替状态,稳定性较低。种植采用“见缝插针”的方式,密度约为 1100—1300 株/hm²。由于石漠化深山区小生境发育典型、组合类型丰富,耕作成本较高,加之青壮年劳动力外出务工,因而未对花椒林地进行深耕,施肥以复合肥为主,除草剂与农药等使用量大、频次高,花椒苗圃地使用塑料薄膜进行保温、保墒。花椒经营、管理方式较为粗放,未采取整形修枝、水肥协同供应等标准化种植措施,制约了顶坛花椒人工林生态经济效益的发挥。

1.2 样地设置与实验设计

2018 年 6 月顶坛花椒旺盛生长季节内,根据海拔变化并结合植物生长状况,将花椒种植区域划分为 5 个样地。每个样地内,按照海拔、坡度、坡位、坡向、土壤厚度等立地条件,以及林龄、植株长势等生长条件较为近似的原则,设置 3 个 10 m×10 m 的标准样方,每个样方之间距离>10 m。测定样地的海拔、经度、纬度、土壤厚度、种植密度、平均树高、平均冠幅(各样地基本信息见表 1)。

表 1 各样地基本信息

Table 1 Basic information of plots

样点 Site	海拔 Altitude/m	经度 Longitude	纬度 Latitude	土壤厚度 Soil depth/cm	平均密度 Density/m	平均树高 Height/m	平均冠幅 Crown/m
YD1	582	105°38'15"E	25°39'16"N	15	2×2	2.2	2×3
YD2	670	105°38'35.5"E	25°39'23.2"N	25	2×2.5	4.2	3×2.8
YD3	722	105°39'5.2"E	25°39'37.4"N	20	2.5×2.5	2.8	2×2.5
YD4	814	105°39'5.2"E	25°39'43.2"N	22	2×2.5	2.5	3×2.5
YD5	877	105°39'34.2"E	25°40'2.6"N	18	2×1.8	2.1	2×2.2

YD1—YD5:花椒样地 1—5

1.3 样品采集与指标测定

在每个标准样方内随机选取 3 株成熟花椒,分别采集 20—30 片生长健康、完全展开的成熟叶片,混合后取 60—80 g 左右作为一份样品。每个样方下按照梅花五点法收集凋落物,同时在采集凋落物样品的地方,采集 0—20 cm 表层土壤(由于研究区土层浅薄,不足 20 cm 的以实际深度为准)。由于顶坛花椒根系为浅根系,且多栽培于石沟、石缝、石槽等小生境,人为施肥通常距离树干 10—30 cm 范围内,因而取样时尽量避开这一区域,减少施肥、除草等经营管理措施的干扰。5 个样地共采集到植物叶片、凋落物和土壤样品各 15 份(5 个样地×3 个标准样方作为重复),样品充分混合均匀后带回实验室。叶片、凋落物样品置于恒温干燥箱中 65℃ 烘干至恒质量,研细并充分混匀;土壤剔除可见石粒、根系及动植物残体,自然风干后研磨至 95% 样品通过 2 mm 筛。制得样品于玻璃瓶中密封保存,用于养分分析。

叶片、凋落物和土壤有机碳(Organic carbon, OC)采用重铬酸钾外加热法测定,全氮(Total nitrogen, TN)采用高氯酸-硫酸消煮后用半微量凯氏定氮法测定,全磷(Total phosphorus, TP)采用高氯酸-硫酸消煮-钼锑抗比色-紫外分光光度法测定,全钾(Total potassium, TK)采用氢氟酸-硝酸-高氯酸消解-火焰光度计法测定。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2010 软件进行数据初步整理;使用 SPSS 20.0 软件对数据进行分析,采用单因素方差分析(one

-way ANOVA)对植物、凋落物、土壤养分含量以及生态化学计量比进行差异性检验,并使用最小显著差数(LSD)法进行多重比较,采用 Pearson 相关分析法探究各组分养分含量及其生态化学计量特征之间的相关关系。数据表达形式为平均值 \pm 标准差,显著性水平均设定为 $P=0.05$,极显著性水平均设定为 $P=0.01$ 。利用 OriginPro 8.5.1 制图。

2 结果与分析

2.1 植物、凋落物、土壤 C、N、P、K 含量特征

2.1.1 植物叶片 C、N、P、K 含量特征

叶片 OC 以样地 4 最小(228.10 g/kg),显著低于样地 1—3 和样地 5,且除样地 4 外,其他 4 个样地之间差异不显著;TN 随海拔升高表现出先降低后显著增加的变化特征;TP 以样地 5 最低(2.16 g/kg),样地 2—3 最高,随海拔的变化趋势与 TN 相反;TK 在不同海拔样地之间差异显著,与 TP 表现出相似的变化规律(图 1)。

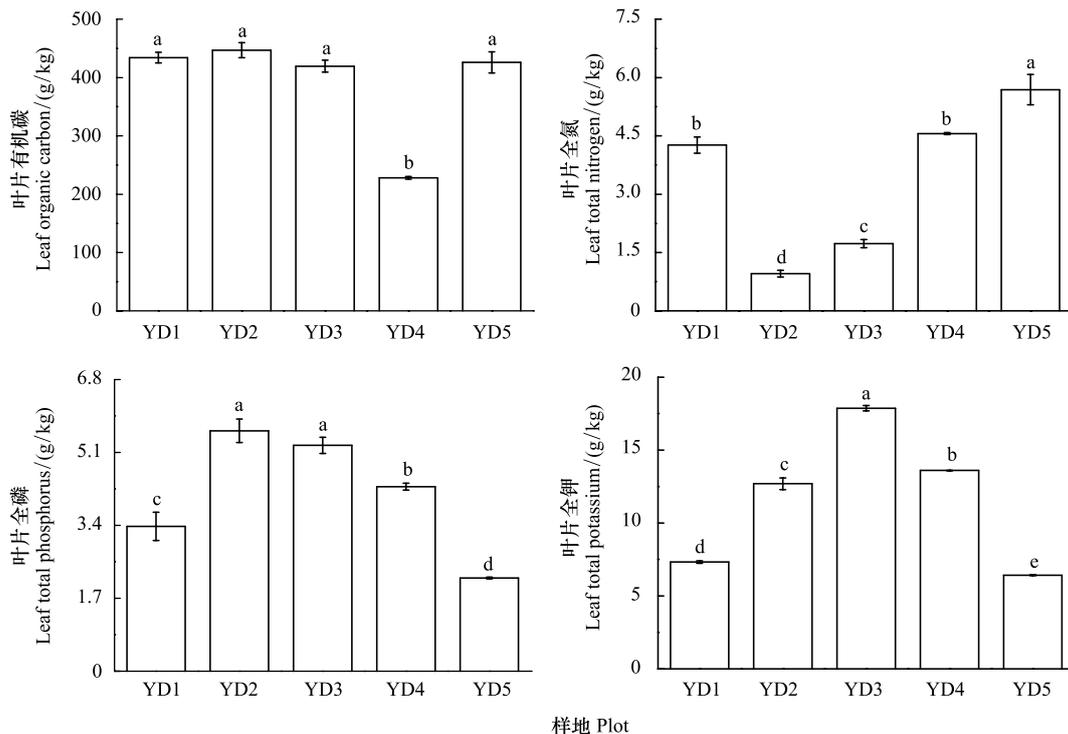


图 1 不同海拔花椒人工林叶片有机碳、全氮、全磷、全钾含量

Fig.1 Content of organic carbon, total nitrogen, total phosphorus and total potassium in leaf of *Zanthoxylum planispinum* var. *dintanensis* plantation at different altitudes

字母表示养分之间的差异显著性,相同字母表示未达到显著水平($P < 0.05$);YD1—YD5:花椒样地 1—5

2.1.2 凋落物 C、N、P、K 含量特征

凋落物 OC、TP 含量随海拔的变化规律均不明显;TN 以样地 5 为最高(4.65 g/kg),样地 3 为最低(1.31 g/kg),各样地之间均呈显著差异;TK 以样地 4 最高、样地 5 最低,样地 1、样地 3 之间差异不显著,与其余样地均呈显著差异(图 2)。

2.1.3 土壤 C、N、P、K 含量特征

土壤 OC 为 29.70—53.17 g/kg,样地 1、样地 5 显著高于样地 2—4;土壤 TN 为 2.99—6.41 g/kg,除样地 3—4 差异不显著外,均表现出显著差异;土壤 TP 以样地 5 最高、样地 1 次之,样地 2 最低,5 个样地之间均呈现显著性差异;土壤 TK 变化与 OC、TN、TP 的趋势基本相反,表明不同土壤养分随海拔的变化规律不一致(图 3)。

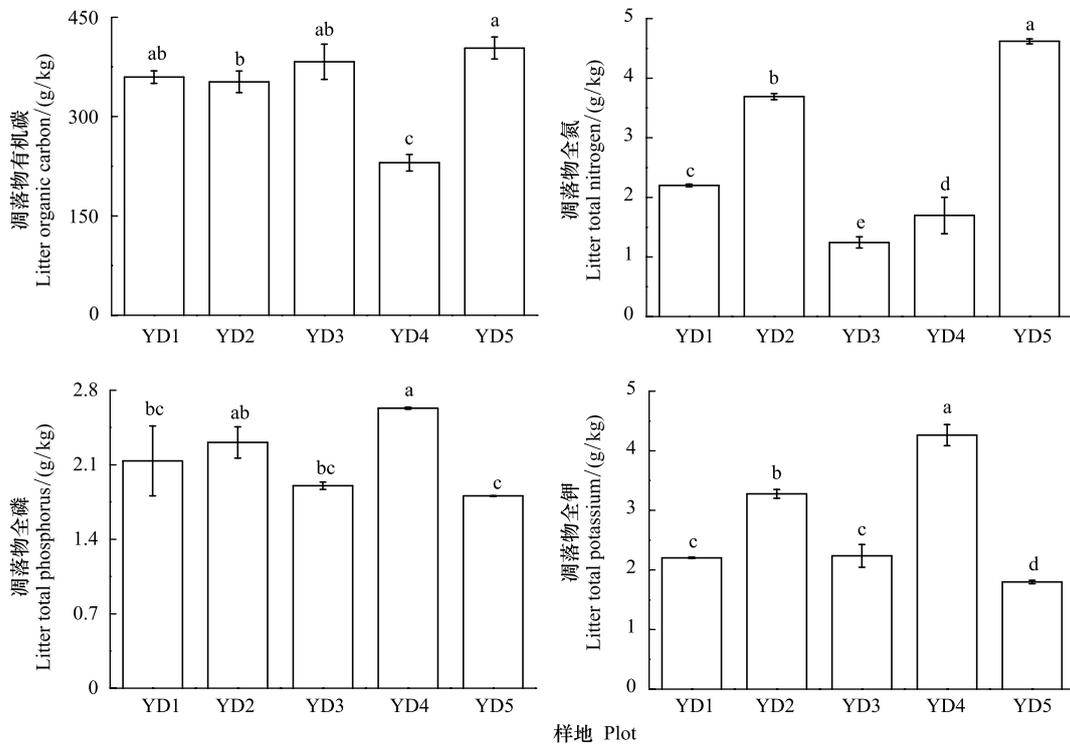


图 2 不同海拔花椒人工林凋落物有机碳、全氮、全磷、全钾含量

Fig.2 Content of organic carbon, total nitrogen, total phosphorus and total potassium in litter of *Zanthoxylum planispinum* var. *dintanensis* plantation at different altitudes

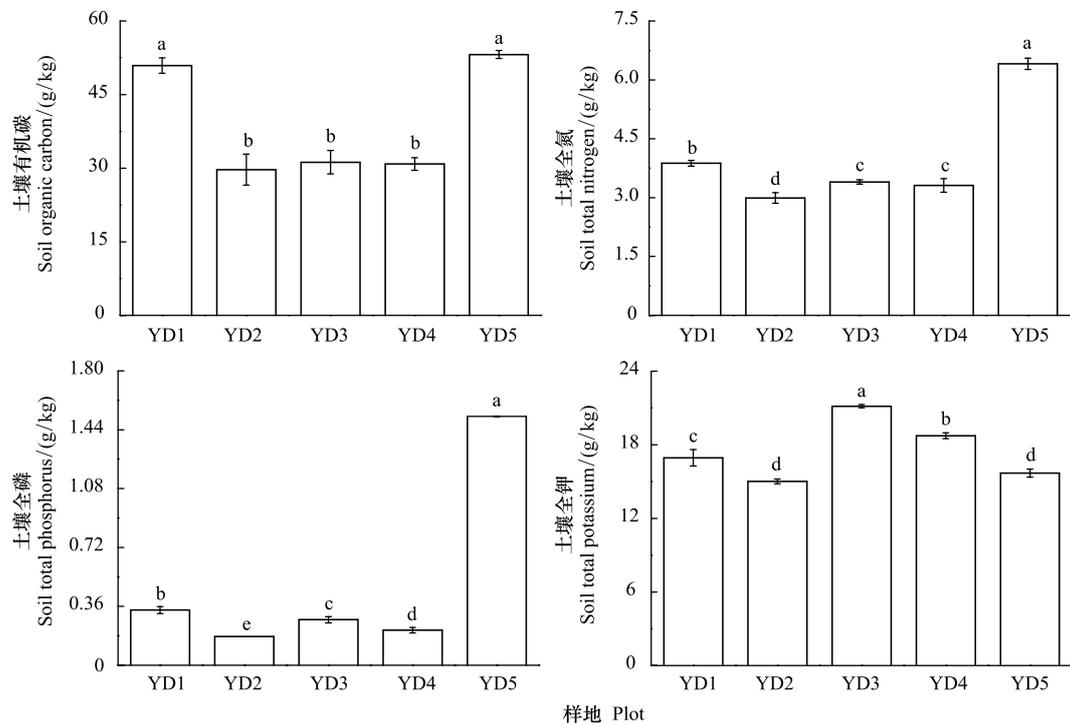


图 3 不同海拔花椒人工林土壤有机碳、全氮、全磷、全钾含量

Fig.3 Content of organic carbon, total nitrogen, total phosphorus and total potassium in soil of *Zanthoxylum planispinum* var. *dintanensis* plantation at different altitudes

2.2 植物、凋落物、土壤 C、N、P、K 生态化学计量特征

2.2.1 叶片 C、N、P、K 生态化学计量特征

叶片 C:N 以样地 2 最高、样地 3 次之,样地 1、样地 4—5 较低且差异不显著;C:P、C:K 的变化规律相似,均随海拔上升先降低后升高,并以样地 5 为最高;N:P、N:K 的变化规律相同,呈先降低后升高的趋势(样地 2—3 之间差异不显著);P:K 在样地 1—2 之间、样地 3—5 之间均呈不显著差异(图 4)。

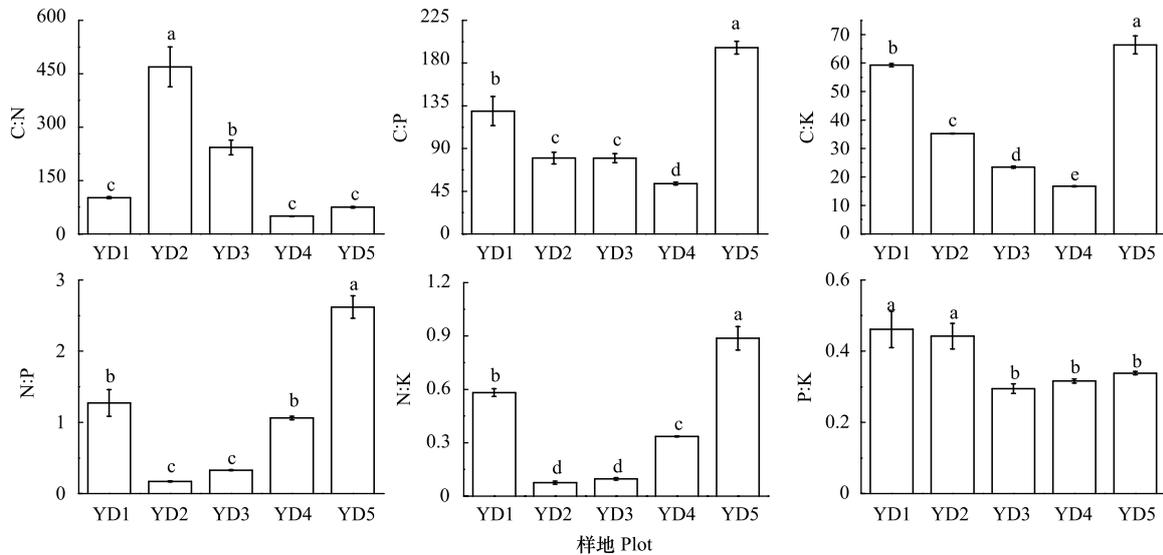


图 4 不同海拔花椒人工林叶片生态化学计量特征

Fig.4 Ecological stoichiometry characteristics in leaf of *Zanthoxylum planispinum* var. *dintanensis* plantation at different altitudes

2.2.2 凋落物 C、N、P、K 生态化学计量特征

凋落物 C:N 以样地 3 最大,随海拔的变异规律不明显;C:P 在样地 3、样地 5 最高,样地 4 最低;C:K、N:K 均以样地 5 最高、样地 4 最低;N:P 以样地 5 最高、样地 3—4 最低;P:K 在样地 1、样地 3 和样地 5 之间,样地 2—3 之间,以及样地 2 与样地 4 之间均无显著差异(图 5)。

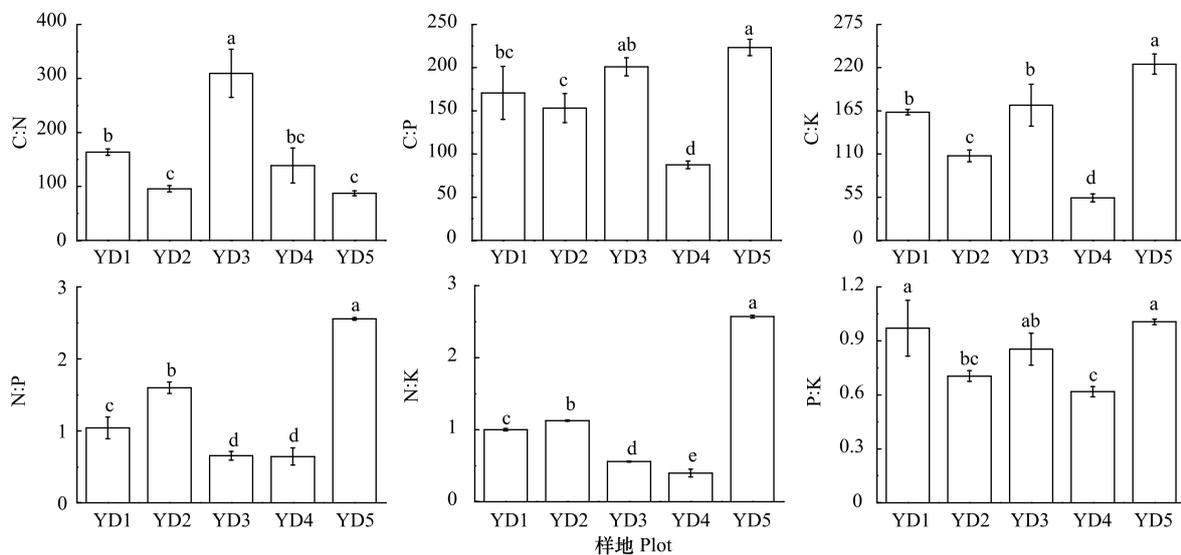


图 5 不同海拔花椒人工林凋落物生态化学计量特征

Fig.5 Ecological stoichiometry characteristics in litter of *Zanthoxylum planispinum* var. *dintanensis* plantation at different altitudes

表 2 花椒林地土壤及叶片 C、N、P、K 含量与生态化学计量之间的相关性

Table 2 Correlation between C, N, P, K contents and ecological stoichiometry in soil and leaf of *Zanthoxylum planispinum* var. *dintanensis* plantation at different altitudes

土壤 Soil	叶片 Leaf									
	OC	TN	TP	TK	C:N	C:P	C:K	N:P	N:K	P:K
OC	0.372	0.718*	-0.908**	-0.882**	-0.531	0.899**	0.930**	0.826**	0.914**	0.253
TN	0.233	0.727*	-0.880**	-0.693*	-0.499	0.928**	0.760*	0.937**	0.895**	-0.178
TP	0.241	0.658*	-0.820**	-0.639*	-0.413	0.901**	0.714*	0.897**	0.837**	-0.209
TK	-0.353	-0.160	0.339	0.726*	-0.240	-0.486	-0.620	-0.351	-0.395	-0.624
C:N	0.235	-0.044	-0.025	-0.290	0.006	-0.047	0.261	-0.186	0.010	0.678*
C:P	-0.144	-0.572	0.673*	0.362	0.466	-0.746*	-0.493	-0.776**	-0.686*	0.448
C:K	0.431	0.652*	-0.874**	-0.951**	-0.369	0.924**	0.972**	0.817**	0.894**	0.361
N:P	-0.307	-0.659*	0.828**	0.589	0.524	-0.893**	-0.734*	-0.849**	-0.833**	0.210
N:K	0.303	0.665*	-0.851**	-0.785**	-0.360	0.940**	0.822**	0.907**	0.877**	-0.005
P:K	0.248	0.652*	-0.819**	-0.661*	-0.391	0.904**	0.726*	0.896**	0.837**	-0.177

** 极显著相关 ($P < 0.01$), * 显著相关 ($P < 0.05$)

表 3 花椒林地土壤及凋落物 C、N、P、K 含量与生态化学计量之间的相关性

Table 3 Correlation between C, N, P, K contents and ecological stoichiometry in soil and litter of *Zanthoxylum planispinum* var. *dintanensis* plantation at different altitudes

土壤 Soil	凋落物 Litter									
	OC	TN	TP	TK	C:N	C:P	C:K	N:P	N:K	P:K
OC	0.459	0.472	-0.479	-0.683*	-0.335	0.504	0.691*	0.578	0.717*	0.810**
TN	0.493	0.668*	-0.606	-0.620	-0.370	0.621	0.744*	0.807**	0.910**	0.655*
TP	0.505	0.715*	-0.591	-0.597	-0.382	0.621	0.731*	0.843**	0.931**	0.623
TK	-0.197	-0.861**	0.005	0.069	0.881**	-0.094	-0.112	-0.756*	-0.642*	-0.117
C:N	-0.055	-0.264	0.223	-0.079	0.017	-0.197	-0.100	-0.330	-0.282	0.227
C:P	-0.517	-0.454	0.656*	0.618	0.040	-0.667*	-0.753*	-0.630	-0.753*	-0.600
C:K	0.472	0.677*	-0.440	-0.617	-0.539	0.487	0.643*	0.742*	0.825**	0.724*
N:P	-0.600	-0.459	0.681*	0.775**	0.079	-0.709*	-0.855**	-0.633*	-0.795**	-0.819**
N:K	0.493	0.818**	-0.544	-0.566	-0.550	0.580	0.687*	0.914**	0.971**	0.600
P:K	0.499	0.748*	-0.577	-0.582	-0.424	0.608	0.715*	0.866**	0.944**	0.608

2.2.3 土壤 C、N、P、K 生态化学计量特征

据图 6 可知,土壤 C:N 在样地 2—5 之间差异不显著,且均与样地 1 呈显著差异;C:P 在样地 1、样地 2 和样地 4 之间,样地 3 和样地 4 之间未达到显著差异;C:K、N:K、P:K 均以样地 5 为最高;N:P 以样地 2 和样地 4 最高、样地 5 最低,随海拔的变化规律不明显。研究结果表明 P、K 来源相对稳定。

2.3 植物叶片、凋落物、土壤养分含量与生态化学计量的相关性

2.3.1 叶片与土壤养分含量及生态化学计量的相关性

根据表 2 可知,土壤 C、N、P 与叶片 N、P、K 含量表现出显著或极显著相关,表明叶片养分与土壤养分之间存在较强的依赖关系;土壤 C、N、P 与叶片 C:P、C:K、N:P、N:K 之间呈现显著或极显著正相关关系;土壤 C:P、C:K、N:P、N:K、P:K 与叶片 C:P、C:K、N:P、N:K 之间均表现出显著或极显著的相关关系(土壤 C:P 与叶片 C:K 除外),表明土壤元素动态平衡能够影响叶片养分蓄存特征。

2.3.2 凋落物与土壤养分含量及生态化学计量的相关性

据表 3,土壤 N、P、C:K、N:P、N:K、P:K 与凋落物 C:K、N:P、N:K 之间均存在显著的相关性,说明凋落物与土壤之间存在较强的养分转换效率;但是土壤养分含量、化学计量与凋落物 C:N、C:P、P:K 的相关性总体

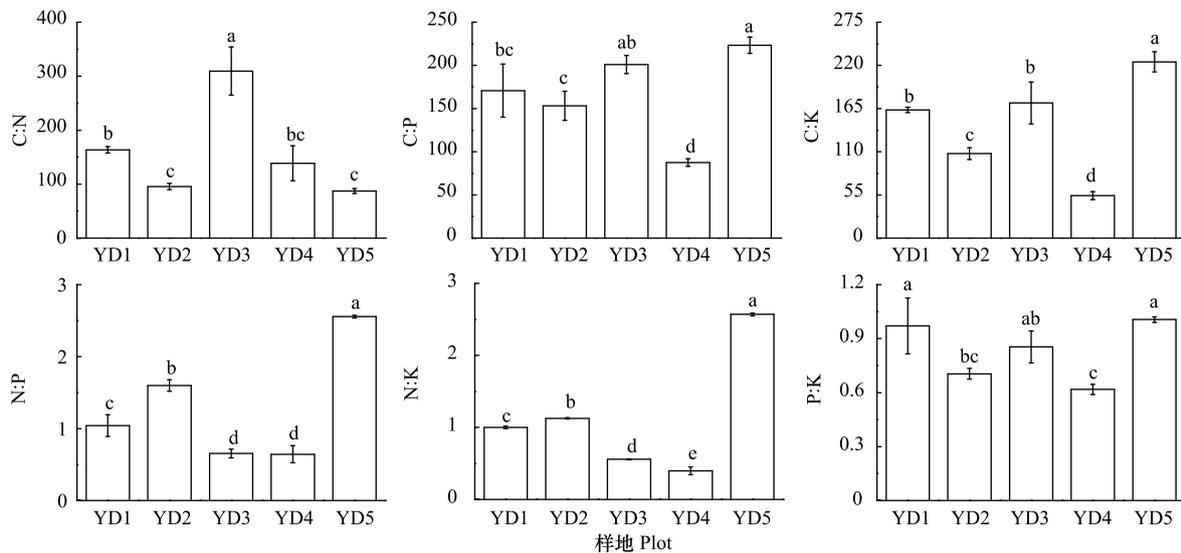


图6 不同海拔花椒人工林土壤生态化学计量特征

Fig.6 Ecological stoichiometry characteristics in soil of *Zanthoxylum planispinum* var. *dintanensis* plantation at different altitudes

偏弱,表明土壤并非完全继承凋落物中的养分。

3 讨论

3.1 顶坛花椒人工林生态化学计量特征

植物 C、N、P、K 含量及其生态化学计量特征受到环境和植物的共同影响,揭示了植物对养分亏缺、水分胁迫等不利生境的防御和适应策略^[19-20],指示元素限制状况^[21-22]。生态化学计量学应用的一个重要方面是根据植物叶片 N:P 值判断其生长的养分供应状况^[23],N:P<14 的植物生长主要受 N 元素限制,N:P>16 的植物生长主要受 P 元素限制,N:P 处于二者之间为 N、P 共同限制^[24-25],本文叶片 N:P 值为 0.17—2.62,表明顶坛花椒生长更多受到 N 元素限制,分析原因有:一是花椒林地土层浅薄、土壤肥力退化,加之地表—地下二元漏失加剧了干旱胁迫,阻碍养分溶解和运移,导致水肥供应不协同,肥效难以充分发挥,影响叶片养分积累;二是花椒林经营较为粗放,较少根据花椒生长发育特征进行养分管理,造成养分限制;三是大量使用化肥、农药和除草剂,不利于土壤微生物和小型动物生长,抑制系统自肥能力。花椒生长受 N 限制的结论与中国陆地植物生长普遍受到 P 元素限制不同^[26],这可能与人工林受到较多的人为干预有关,也可能与地质环境和植物的吸收利用有关。从养分含量上分析,研究区叶片 TN 明显低于全国 18.6 g/kg 和全球 20.6 g/kg 的水平,TP 高于全国 1.21 g/kg 和全球 1.99 g/kg 的水平^[26-27],表明植物器官 N 匮乏,补充土壤 N 元素尤为必要。该研究结果与依据生态化学计量特征得出的结论一致,表明生态化学计量学是揭示生态系统各组分养分比例调控机制的有效手段。

凋落物是生态系统中碎屑食物链的起点,作为有机碳和养分的储存库^[28],其降解为森林生长带来了 70%—90% 的养分^[29],为矿质养分归还土壤的主要途径,是土壤养分的重要来源。研究区凋落物 TN 相较于全球尺度的 10.9 g/kg 低,而 TP 较全球平均水平(0.90 g/kg)要高^[30],结合叶片的养分含量特征,综合分析说明凋落物和叶片的 N、P 格局较为一致,表明凋落物秉承了叶片的特性,这与王宝荣等^[31]在黄土高原子午岭林区的的结果一致。已有研究表明凋落物 N:P 值是影响其分解和养分归还速率的主要因素之一,较低的 N:P 值使凋落物更易分解,凋落物 N:P>25 则表明其分解较慢,有利于养分的存储^[32]。顶坛花椒人工林凋落物 N:P 值较低,表明易于分解,原因是顶坛花椒凋落物蓄积量较少,地被草本凋落成为林分凋落物层的主体,加速了凋落物的分解速率。林下草本层的生态效应包括养分竞争、覆土保墒、促进元素循环、提高物种丰富度等,人工林经营过程中应当对这些生态效应进行权衡与协同,合理配置和调整群落结构,优化对垂直空间资源

的利用。但是,较快的分解速率则不利于养分存储,因此应及时向顶坛花椒人工林土壤补充养分,尤其是1月底—2月初的保花保果肥、4—5月的壮果肥、8月的长枝肥和11月的催花肥。凋落物 C:N 越高,说明 N 含量越低,越不利于微生物对有机质的分解^[33],结果表明样地3的土壤环境对微生物的分解作用更为不利,原因可能是该区域使用除草剂和杀虫剂的频次更高,限制了部分生物活动。

土壤 N、P 是植物生长所必需的矿质养分和生态系统中常见的限制性元素,其比值能够有效预测养分限制类型。不同海拔顶坛花椒人工林样地土壤 C、N、P 虽然较全国平均水平 11.2、1.1、0.7 g/kg^[34]要高,但较广西喀斯特地区明显偏低^[23],表明仍需培育土壤养分,提高土壤对植物生长的养分供应潜力与能力。研究区土壤水分虽然长期处于亏缺状态,但 1100 mm 左右的年降水量和北盘江蓄水发电使区域内气态水资源愈加丰富,一定程度上优化了水热资源组合格局。土壤 C:N 与其分解速率成反比,其值较低表明有机质具有较快的矿化作用^[23],研究区土壤 C:N 为 8.29—13.14,与全国 10—12 和全球 14.3 的水平相当,表明土壤矿化速率处于平均水平。土壤矿质化指示了土壤养分转化潜力,说明该区土壤养分转化能力有待深入挖潜,尚需进一步协调植物与土壤的关系。较低的土壤 C:P 是 P 有效性高的一个指标^[35],对植物生长发育具有重要影响。研究区土壤 C:P 值较高,指示有效 P 的水平较低,原因是顶坛花椒属于浅根系,受生长空间限制,产生窝根现象,根系分泌物对养分的活化、提取能力较低;同时,有机肥补充数量不足,导致可供根系吸收的速效态养分含量较为有限。因此,了解顶坛花椒人工林养分吸收、利用策略以及土壤养分状况等信息,有助于深刻认识生态系统养分循环与系统稳定机制。

3.2 顶坛花椒人工林可持续经营策略

顶坛花椒人工林在石漠化地区生态、经济建设中发挥了举足轻重的作用,但是近年来发生以开黄花、出现黄叶、枯死等为典型标志的大面积快速生长衰退现象,花椒产量和品质下降,推测矿质养分数量亏缺和计量关系失衡是主要诱因,成为植被恢复建设所面临的重大生态环境问题之一,因而开展花椒人工林可持续经营具有重要的理论和现实意义。首先,在养管理上,顶坛花椒生长更多地受到 N 元素限制,应当施用有机肥特别是农家肥,提高矿质养分的回补量,实现元素含量丰富和生态化学计量平衡。其次,土壤速效养分不足且矿化速率不高,这与研究区土壤有机质含量偏少、微生物活性较低有关,也与植株根系的分布范围与分泌能力相关,因而培育土壤团粒结构,形成团聚体,是提高养分储存与供应潜力的有效措施。最后,在林分结构优化调控上,现有顶坛花椒林凋落物层数量少、分解快,不利于养分的蓄存,加之顶坛花椒人工林树种组成单一,生态系统稳定度低、抗逆性弱,配置矮杆构树等落叶阔叶灌木树种,营造混交林,优化植物群落结构,能够实现基于生物多样性的林分稳定。

4 结论

(1) 黔中石漠化区不同花椒人工林土壤主要受到 N 元素限制,土壤养分呈现低 N 高 P 格局。

(2) 叶片、凋落物、土壤层 C、N、P、K 及其生态化学计量特征随海拔的分异规律不完全一致,其变化规律表明 C、N 来源多样,P、K 来源相对稳定。

(3) 土壤养分含量和叶片养分含量、生态化学计量之间多呈现出显著相关性,表明叶片与土壤养分存在较强的依赖关系;总体上,土壤养分含量、生态化学计量与凋落物养分含量具有较弱的相关性,与凋落物生态化学计量具有强的相关性,表明凋落物和土壤之间存在一定的养分转换强度但是并非完全继承。

(4) 顶坛花椒人工林凋落物蓄积量低,群落出现生长衰退现象,配置落叶阔叶灌木树种,有利于群落结构优化,提高林分稳定性。

参考文献(References):

- [1] 龙健,廖洪凯,李娟,陈彩云. 基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究. 环境科学, 2012, 33(6): 2131-2138.
- [2] Güsewell S. N:P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance. The New Phytologist, 2004, 164(2): 243-266.
- [3] Spieles D J, Mitsch W J. Macroinvertebrate community structure in high-and low-nutrient constructed wetlands. Wetlands, 2000, 20(4): 716-729.

- [4] 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.
- [5] 陈军强, 张蕊, 侯尧宸, 马丽娜, 丁路明, 龙瑞军, 尚占环. 亚高山草甸植物群落物种多样性与群落 C、N、P 生态化学计量的关系. *植物生态学报*, 2013, 37(11): 979-987.
- [6] 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, 25(9): 1007-1019.
- [7] 贺金生, 韩兴国. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 2-6.
- [8] 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.
- [9] Zhang K, Su Y Z, Liu T N, Wang T. Leaf C: N: P stoichiometrical and morphological traits of *Haloxylon ammodendron* over plantation age sequences in an oasis-desert ecotone in North China. *Ecological Research*, 2016, 31(3): 449-457.
- [10] Cao Y, Chen Y M. Coupling of plant and soil C:N:P stoichiometry in black locust (*Robinia pseudoacacia*) plantations on the Loess Plateau, China. *Trees*, 2017, 31(5): 1559-1570.
- [11] 许雪贇, 秦海燕, 曹建军, 李梦天, 龚毅帆, 张小芳. 青藏高原火绒草叶片生态化学计量特征随海拔的变化. *应用生态学报*, 2018, 29(12): 3934-3940.
- [12] Feng Q H, Centritto M, Cheng R M, Liu S R, Shi Z M. Leaf functional trait responses of *Quercus aquifolioides* to high elevations. *International Journal of Agriculture & Biology*, 2013, 15(1): 69-75.
- [13] 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.
- [14] 付作琴, 吕茂奎, 李晓杰, 任寅榜, 聂阳意, 邓翠, 曾敏, 张康靖, 阮超越, 谢锦升. 武夷山不同海拔黄山松新叶和老叶氮磷化学计量特征. *生态学杂志*, 2019, 38(3): 648-654.
- [15] 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.
- [16] Cao Y, Zhang P, Chen Y M. Soil C:N:P stoichiometry in plantations of N-fixing black locust and indigenous pine, and secondary oak forests in Northwest China. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(4): 1478-1489.
- [17] Wang M, Murphy M T, Moore T R. Nutrient resorption of two evergreen shrubs in response to long-term fertilization in a bog. *Oecologia*, 2014, 174(2): 365-377.
- [18] 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.
- [19] 肖遥, 陶冶, 张元明. 古尔班通古特沙漠 4 种荒漠草本植物不同生长期的生物量分配与叶片化学计量特征. *植物生态学报*, 2014, 38(9): 929-940.
- [20] 王凯博, 上官周平. 黄土丘陵区燕沟流域典型植物叶片 C、N、P 化学计量特征季节变化. *生态学报*, 2011, 31(17): 4985-4991.
- [21] Yamazaki J, Shinomiya Y. Effect of partial shading on the photosynthetic apparatus and photosystem stoichiometry in sunflower leaves. *Photosynthetica*, 2013, 51(1): 3-12.
- [22] Pan F J, Zhang W, Liu S J, Li D J, Wang K L. Leaf N:P stoichiometry across plant functional groups in the karst region of southwestern China. *Trees*, 2015, 29(3): 883-892.
- [23] 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.
- [24] Aerts R, Chapin III F S. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns. *Advances in Ecological Research*, 1990, 30: 1-67.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 杨玉盛, 郭剑芬, 林鹏, 何宗明, 谢锦升, 陈光水. 格氏栲天然林与人工林枯枝落叶层碳库及养分库. *生态学报*, 2004, 24(2): 359-367.
- [29] 赵其国, 王明珠, 何园球. 我国热带亚热带森林凋落物及其对土壤的影响. *土壤*, 1991, (1): 8-15.
- [30] Kang H Z, Xin Z J, Berg B, Burgess P J, Liu Q L, Liu Z C, Li Z H, Liu C J. Global pattern of leaf litter nitrogen and phosphorus in woody plants. *Annals of Forest Science*, 2010, 67(8): 811.
- [31] 王宝荣, 曾全超, 安韶山, 张海鑫, 白雪娟. 黄土高原子午岭林区两种天然次生林植物叶片-凋落叶-土壤生态化学计量特征. *生态学报*, 2017, 37(16): 5461-5473.
- [32] 潘复静, 张伟, 王克林, 何寻阳, 梁士楚, 韦国富. 典型喀斯特峰丛洼地植被群落凋落物 C:N:P 生态化学计量特征. *生态学报*, 2011, 31(2): 335-343.
- [33] 马文济, 赵延涛, 张晴晴, Arshad A, 史青茹, 阎恩荣. 浙江天童常绿阔叶林不同演替阶段地表凋落物的 C:N:P 化学计量特征. *植物生态学报*, 2014, 38(8): 833-842.
- [34] 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.
- [35] 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.