

云南喀斯特断陷盆地 植物-土壤-微生物生态化学计量特征

张辰^{1,2,3}, 曾馥平^{1,3}, 张浩^{1,3}, 邹志刚^{1,2,3}, 鲁梦珍^{1,2,3}, 曾昭霞^{1,3}

- (1. 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 湖南 长沙 410125;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 广西 环江 547100)

[摘要]以不同海拔高度喀斯特断陷盆地的植物、土壤和微生物作为研究对象,运用单因素方差分析和典型相关分析法,对土壤理化因子、植物养分含量、微生物类群丰度以及微生物量进行了相关性分析。结果表明:1)土壤全氮、全磷和全钾在不同海拔高度下变化差异显著,变异系数均不超过10%,为弱变异性;土壤速效钾的变化是一个随海拔高度的增加逐渐变化的过程,只有当海拔达到一定高度时,差异才显著;土壤速效氮、速效磷、容重、pH值以及含水量在不同海拔高度下变化差异不显著。2)不同土壤层次下,土壤微生物类群数量与土壤理化因子之间的相关程度不同。在10—20 cm土层中,真菌、细菌、放线菌数量均与土壤速效氮呈显著或极显著正相关关系,且相关系数最大;在不同土层中的细菌数量与土壤全氮也有不同程度的正相关关系;但在不同土层中微生物三大类群丰度与土壤pH值没有显著相关性。3)微生物量碳、氮、磷与土壤磷钾比有不同程度的负相关关系,并且微生物量磷与微生物量氮、碳之间的正相关关系达到了极显著水平;植物全碳与微生物碳氮比有极显著正相关关系,而与微生物氮磷比以及土壤磷钾比呈显著负相关。可见,土壤营养状况、植物生长发育所需养分以及微生物群落结构与功能之间有直接联系。

[关键词]生态化学计量学;喀斯特断陷盆地;植物;土壤;微生物;相关性

[中图分类号] S714 **[文献标识码]** A

生态化学计量学是研究生态系统中多重化学元素关系及其随环境变化规律的科学,为揭示生态过程中元素耦合关系提供了一种综合方法。土壤是陆地生态系统的重要组成部分,是植物获取生长必需养分元素的主要来源。微生物可以促进土壤营养元素的循环和转化,是植物养分的“有效库”,是联系植物和土壤的关键因素。C是构成植物体内干物质的最主要元素,而N和P是各种蛋白质和遗传物质的重要组成元素,植物通过根系从土壤中吸收生长发育所需的养分,并以凋落物形式返还土壤,在微生物的作用下土壤养分状态得以转换,这是一个复杂的养分循环过程,不仅受植物自身类型、生理生化特征的影响,而且受生长环境、群落组成、土壤理化因子及土壤微生物等多方面影响。因此,研究“植物-土壤-微生物”营养元素特征具有十分重要的理论和现实意义。

西南喀斯特地区是中国四大生态环境脆弱区之一。根据大地构造和地貌格局,并结合岩溶发育的特征,可将西南喀斯特类型分为五大区,其中云南断陷盆地及周边山地喀斯特生态区具有碳酸盐岩层厚度大、分布连续的特点,因此当地土壤生态脆弱,生态服务功能下降。目前,出现的文章主要是针对水生、陆生生态系统不同结构层次(种群、群落以及生态系统)的生态化学计量特征的研究,以云南喀斯特断陷盆地尺度上植物、

土壤和微生物三者结合起来的生态化学计量学特征的研究整体较为少见,为进一步探寻云南喀斯特断陷盆地植物-土壤-微生物C、N、P、K等元素的化学计量特征的空间分布规律,本文选取不同海拔高度的喀斯特断陷盆地作为研究对象,通过对其植被营养元素含量、土壤理化性质的空间分布特征以及土壤微生物种群丰度和微生物量含量进行分析,探明云南喀斯特断陷盆地“植物-土壤-微生物”连续体元素计量特征之间的关系,以期为喀斯特断陷盆地退化生态系统的恢复和重建提供理论和实践价值依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区地处我国云南红河哈尼族彝族自治州(101°47'—104°16'E, 22°26'—24°45'N),位于云南南部,全州属亚热带高原型湿润季风气候,年均气温15.1—22.6℃,年平均降水量816—2286 mm,州内四季不甚分明,但干旱、多雨季节区分较为明显,每年5—10月为雨季,其中6—8月连续降雨强度较大,具有季节分配和时空分布极不均匀的特点。主要采样点位于红河州蒙自市和建水县,石漠化十分严重,自然植被分布有华山松(*Pinus armandii*)、华西小石积(*Osteomeles schwerinae*)和

[收稿日期] 2021-01-10

[基金项目] 国家重点研发课题(2016YFC0502505);国家自然科学基金(31870712, 32071846)。

[作者简介] 张辰(1998-),女,安徽安庆人,硕士研究生,研究方向:区域与景观生态。

[通讯作者] 曾昭霞(1978-),女,博士,研究方向:土壤生态学。E-mail: zhangchen@caas.ac.cn

© Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

万寿菊 (*Tagetes erecta*) 等。

1.2 样品采集

2016 年 11 月, 在蒙自市和建水县五个不同海拔高度 (1130 m、1360 m、1500 m、1800 m 和 2000 m) 样地中, 按梅花形对 0—10 cm、10—20 cm 及 20—30 cm 共三个垂直深度土层中土壤分别进行五点取样, 取样时去除土壤中肉眼可见的植物根系及砾石等杂物, 每个土层土壤充分混合后分成三份, 每个样地重复三次, 标记编号和日期。第一份土壤样品用铝盒保存, 用于土壤容重的测定; 第二份土壤样品用自封袋带回实验室后, 自然风干, 用于土壤理化性质分析; 第三份土壤样品用自封袋封装后临时保存于液氮罐中, 用于土壤微生物数量 (真菌、细菌、放线菌) 的测定。

同时, 在采集土壤样品的同一样方内, 随机选取样方中出现的植株, 采取适量的叶片及小枝, 将其装入封口袋置于低温箱中带回实验室进行 C、N、P 等元素含量的测定。

1.3 样品处理与测定

取回的土壤, 一部分过 20 目筛用于测定土壤理化指标 pH 值、土壤容重等, 另一部分过 100 目筛用于测定土壤有机质、全氮、全磷、全钾等。土壤含水量用烘干法测定、土壤容重用环刀法测定、土壤有机质采用重铬酸钾容量法进行测定、土壤 pH 的测定采用电位法、土壤全氮的测定采用重铬酸钾-硫酸消化法、土壤全磷的测定采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法、土壤全钾的测定采用 NaOH 熔融-火焰光度计法、用碱解-扩散测定土壤速效氮含量、用 0.5 mol·L⁻¹ 碳酸氢钠法测定土壤速效磷含量、用 1 mol·L⁻¹ 中性醋酸铵提取-火焰光度法测定土壤速效钾含量。

土壤微生物数量采用稀释平板-涂布法测定、土壤微生物量碳、氮、磷采用氯仿熏蒸法测定。

将收集到的植物样品用蒸馏水洗净, 放置烘箱中 75 °C 烘

至衡重, 研细用于养分分析。碳的测定采用外加热重铬酸钾容量法、采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮-流动注射仪法测定氮、采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮-钼锑抗比色法测定磷。

1.4 数据分析

采用 Excel 2010 对数据进行计算与作图, 用 SPSS 25.0 对数据进行单因素方差分析 (One-Way ANOVA), 用 LSD 法进行多重比较; 数据相关性分析采用 Pearson 相关系数, 采用双尾检验 (2-tailed)。

2 结果和分析

2.1 不同海拔高度下土壤理化性质的差异

由表 1 可知, 土壤全氮、全磷和全钾, 在不同海拔高度下变化差异显著, 并且它们的变异系数均不超过 10%, 为弱变异性, 即土壤全氮、全磷和全钾在海拔高度上保持相对稳定性; 土壤速效钾含量大体上随海拔的增加而逐渐变大, 但当海拔高度达 2000 m 时, 土壤速效钾含量急剧下降, 并且土壤速效钾在海拔高度为 1130 m、1360 m 与 1500 m 的样地之间差异不显著, 而与海拔高度 1800 m 和 2000 m 的样地间土壤速效钾差异显著, 体现出土壤速效钾变化是一个随海拔高度的增加逐渐变化的过程, 达到一定海拔高度时, 这种差异变得显著; 土壤速效氮、速效磷、容重、pH 值以及含水量在不同海拔间整体变化不大差异不显著; 在海拔 1360 m 的样地土壤有机质含量显著低于其它海拔高度的样地, 并且不同海拔高度样地的有机质含量变异系数在 10%<c.v.<100% 之间, 属于中等程度变异性。

2.2 不同土层土壤微生物数量与土壤理化性质的关系

对 0—10 cm、10—20 cm 和 20—30 cm 三种不同土层的土壤微生物数量与土壤理化性质进行 Pearson 相关性分析 (表 2), 结果表明: 0—10 cm 土层微生物三大类群与土壤速效氮、含水量均表现出正相关, 且细菌对速效氮和全磷的相关性极显著

表 1 不同海拔高度下土壤理化性质的差异

土壤属性	1130m		1360m		1500m		1800m		2000m	
	$\mu \pm SE$	CV (%)	$\mu \pm SE$	CV (%)	$\mu \pm SE$	CV (%)	$\mu \pm SE$	CV (%)	$\mu \pm SE$	CV (%)
速效氮 / (mg · kg ⁻¹)	144.67 ± 14.57b	10.1	106.17 ± 9.33a	15.2	115.50 ± 6.06a	9.1	113.17 ± 6.17a	9.4	119.00 ± 3.50a	5.1
速效磷 / (mg · kg ⁻¹)	14.73 ± 0.23a	2.7	10.67 ± 2.89a	46.9	14.06 ± 0.48a	5.9	12.22 ± 0.22a	3.1	8.79 ± 0.22a	4.3
速效钾 / (mg · kg ⁻¹)	132.58 ± 3.37b	4.4	124.46 ± 0.51b	0.7	141.79 ± 1.60b	2.0	162.98 ± 11.22c	11.9	96.25 ± 2.09a	3.8
全氮 / (g · kg ⁻¹)	0.87 ± 0.03a	6.3	1.38 ± 0.05c	5.8	1.50 ± 0.02d	2.1	1.22 ± 0.02b	3.5	1.61 ± 0.06d	6.0
全磷 / (g · kg ⁻¹)	1.10 ± 0.01c	1.6	0.96 ± 0.02ab	3.8	1.00 ± 0.04b	6.5	0.96 ± 0.02ab	3.6	0.88 ± 0.005a	0.9
全钾 / (g · kg ⁻¹)	22.65 ± 1.26b	9.6	18.67 ± 0.36a	3.4	19.42 ± 0.27a	2.4	30.10 ± 0.30c	1.7	22.80 ± 0.65b	4.9
有机质含量 / %	2.44 ± 0.48a	33.8	0.80 ± 0.18a	38.1	7.87 ± 1.28bc	28.2	4.30 ± 0.35ab	14.3	10.02 ± 2.37c	41.0
容重 / (g · cm ⁻³)	1.70 ± 0.12a	11.9	1.51 ± 0.06a	7.4	1.42 ± 0.07a	8.5	1.50 ± 0.10a	11.3	1.43 ± 0.04a	5.2
pH 值	7.43 ± 0.12b	2.8	7.80 ± 0.10b	2.2	7.47 ± 0.07b	1.5	6.43 ± 0.26a	7.0	7.23 ± 0.09b	2.1
含水量 / %	30.77 ± 1.94a	10.9	18.37 ± 4.26a	40.1	33.87 ± 10.94a	56.0	28.13 ± 1.10a	6.8	41.77 ± 2.61a	10.8

($P < 0.01$), 真菌与放线菌对速效钾以及细菌对全氮均呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 真菌和放线菌与有机质含量、含水量以及细菌与土壤容重的相关性显著 ($P < 0.05$)。10—20 cm 土层真菌与速效氮呈显著正相关, 而与全磷呈显著负相关 ($P < 0.05$); 细菌、放线菌与速效氮呈极显著正相关, 而细菌与全氮呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 放线菌与全磷呈显著负相关, 细菌与土壤容重呈显著正相关 ($P < 0.05$)。20—30 cm 土层微生物三大类群与土壤速效磷、全磷均表现出负相关, 其中真菌与全磷, 放线菌与速效磷、全磷均呈极显著相关 ($P < 0.01$), 真菌与速效磷, 细菌与全磷呈显著相关 ($P < 0.05$); 细菌与速效氮之间有极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 与土壤容重有显著正相关关系 ($P < 0.05$), 放线菌与速效氮也有显著正相关关系 ($P < 0.05$)。

2.3 植物-土壤-微生物 C、N、P、K 相关性

基于 Pearson 相关性分析来探讨五种不同海拔植物-土壤-微生物生态化学计量特征之间的关系 (表 3), 结果表明: (1) 微生物量碳、磷与海拔有极显著正相关关系, 而微生物量氮与海拔之间相关性不显著; 微生物量碳、氮、磷与土壤磷钾比有不同程度的负相关关系, 其中微生物量碳与土壤磷钾比呈极显著负相关关系; 并且土壤微生物量碳、氮与土壤微生物量磷之间的相关性也达到了极显著水平。微生物量氮与微生物量碳氮比有极显著负相关关系, 而与微生物量氮磷比呈极显著正相关。(2) 植物全氮与海拔、植物全碳、微生物量碳、微生物量磷均有显著正相关关系; 植物全碳与植物碳氮比、植物碳磷比以及微生物量碳氮比均有不同程度的显著正相关关系, 而与微生物量氮磷比、土壤磷钾比有不同程度的显著负相关关系; 植物全磷与土壤全钾呈极显著正相关, 但与植物氮磷比、土壤磷钾比呈显著负相关。(3) 土壤全氮与土壤全磷有极显著负相关关系, 与海拔、土壤氮磷比以及土壤氮钾比呈极显著正相关关系; 土壤全磷与海拔、土壤氮磷比有极显著负相关关系; 土壤全钾与植物全碳、植物全磷有不同程度的显著正相关关系, 而与土壤氮钾比、磷钾比有极显著负相关关系。

3 讨论

3.1 海拔对土壤养分的影响

探究海拔差异下土壤理化性质的异质性, 对于了解土壤与植物之间的关系有着重要作用。研究表明, 在不同海拔高度下, 土壤养分指标的变异系数无明显规律, 变异系数的平均值为: 土壤有机质含量 > 土壤含水量 > 土壤速效磷含量 > 土壤速效氮含量 > 土壤容重 > 土壤全氮含量 > 土壤速效钾含量 > 土壤全钾含量 > 土壤全磷含量 > 土壤 pH 值, 这与余新晓的研究结果不一致, 云南喀斯特断陷盆地的土壤相较于北京山区森林的土壤, 具有土壤贫瘠、生态涵养能力弱的特点。由于海拔高度的差异, 气候特征、林分类型和土壤类型等也随之改变, 最终引起土壤肥力的改变, 研究结果显示, 随着海拔高度的改变, 土壤有机质含量和土壤含水量的空间变异性较大, 原因可能是云南断陷盆地喀斯特地貌下不同海拔地区的环境因子不同, 直接影响了地上植被生物量, 进而影响了土壤中的有机质含量和土壤含水量。土壤磷含量主要受土壤母质风化的影响, 因此土壤磷含量相对稳定, 在不同海拔高度下的变异系数较小。

3.2 不同土层土壤微生物类群丰度与环境因子的关系

土壤理化因子和微生物群落特征等是评价土壤生态系统质量和退化程度的重要指标, 土壤中微生物数量可以反映土壤的养分水平。土壤性质对陆地生态系统土壤微生物群落结构和多样性的形成具有重要作用, 微生物群落通过分解和矿化土壤中的有机质来获取能量, 因此, 土壤中营养元素的供应对土壤微生物类群丰度有显著影响。研究结果表明, 在 10—20 cm 土层的微生物三大类群丰度与土壤速效氮呈正相关关系, 且其比另外两土层 (0—10 cm 和 20—30 cm) 显著程度要高。随土层的改变, pH 值也与微生物三大类群丰度有一些相关性, 但相关程度不显著, 这与刘旻霞等的研究结果一致, 随着土壤深度的改变, 土壤 pH 值波动范围较小, 研究区土壤偏弱碱性。研究得出速效磷和全磷在 0—10 cm 土层和 10—20 cm 土层中与细菌呈正相关关系, 而与土壤中真菌、放线菌呈负相关关系。且

表 2 不同土层土壤微生物数量与土壤理化性质的相关系数

土层	微生物类群	速效氮	速效磷	速效钾	全氮	全磷	全钾	有机质含量	pH 值	容重	含水量
0—10 cm	真菌	.231	-.442	-.750**	.273	-.400	.059	.561*	-.029	-.076	.529*
	细菌	.758**	.500	.010	-.793**	.779**	-.079	-.257	.200	.596*	.074
	放线菌	.425	-.254	-.706**	.111	-.161	-.039	.560*	.072	.024	.571*
10—20 cm	真菌	.604*	-.142	-.342	-.343	-.576*	.021	.252	.115	.457	-.144
	细菌	.901**	.258	.211	-.771**	.023	-.031	-.299	.350	.562*	-.274
	放线菌	.684**	-.108	-.368	-.328	-.526*	-.122.	.252	.248	.467	-.164
20—30 cm	真菌	-.011	-.605*	-.456	-.243	-.824**	-.145	.103	-.026	.328	.448
	细菌	.830**	-.220	.308	-.522*	-.604*	.133	-.254	.333	.607*	-.429
	放线菌	.544*	-.718**	.081	.029	-.700**	-.210	.315	.038	.358	.045

(C) 注: * 在 0.05 级别 (双尾), 相关性显著; ** 在 0.01 级别 (双尾), 相关性显著。All rights reserved. <http://www.cnki.net>

表 3 土壤、植物、微生物生物量之间 C、N、P、K 及化学计量比的相关系数

参数	海拔	植物全氮 (g·kg ⁻¹)	植物全碳 (g·kg ⁻¹)	植物全磷 (g·kg ⁻¹)	植物 C/N	植物 C/P	植物 N/P	微生物量碳/ (mg·kg ⁻¹)	微生物量氮/ (mg·kg ⁻¹)	微生物量磷/ (mg·kg ⁻¹)	微生物 C/N	微生物 C/P	微生物 N/P	土壤全氮/ (g·kg ⁻¹)	土壤全磷/ (g·kg ⁻¹)	土壤全钾/ (g·kg ⁻¹)	土壤 N/P	土壤 N/K	土壤 P/K
海拔	1																		
植物全氮 (g·kg ⁻¹)	.526*	1																	
植物全碳 (g·kg ⁻¹)	.486	.556*	1																
植物全磷 (g·kg ⁻¹)	.405	.298	.500	1															
植物 C/N	.370	.156	.895**	.429	1														
植物 C/P	.164	.299	.635*	-.313	.635*	1													
植物 N/P	.030	.449	.190	-.640*	.023	.763**	1												
微生物量碳/ (mg·kg ⁻¹)	.974**	.539*	.532*	.412	.436	.237	.054	1											
微生物量氮/ (mg·kg ⁻¹)	.365	-.057	-.513	-.088	-.490	-.442	-.171	.372	1										
微生物量磷/ (mg·kg ⁻¹)	.693**	.579*	.206	.299	.035	-.027	.054	.769**	.642**	1									
微生物 C/N	.233	.503	.874**	.328	.751**	.637*	.297	.263	-.773**	-.065	1								
微生物 C/P	.102	.299	.173	-.050	.319	.240	-.014	-.001	-.441	-.627*	.290	1							
微生物 N/P	-.048	.449	-.845**	-.304	-.719**	-.634*	-.309	-.099	.834**	.125	-.964**	-.170	1						
土壤全氮 (g·kg ⁻¹)	.669**	.217	.194	-.080	.192	.307	.280	.622*	.223	.289	.112	.381	.025	1					
土壤全磷 (g·kg ⁻¹)	-.807**	-.225	-.169	-.173	-.139	-.018	.051	-.755**	-.328	-.386	-.080	-.389	-.144	-.731**	1				
土壤全钾 (g·kg ⁻¹)	.442	.452	.605*	.717**	.455	-.019	-.275	.445	-.100	.364	.420	-.147	-.367	-.283	-.090	1			
土壤 N/P	.755**	.220	.154	-.018	.149	.205	.181	.709**	.338	.379	.048	.356	.122	.975**	-.856**	-.199	1		
土壤 N/K	.202	-.089	-.150	-.440	-.073	.264	.362	.160	.117	-.070	-.080	.415	.147	.852**	-.451	-.731**	.778**	1	
土壤 P/K	-.725**	-.470	-.539*	-.684**	-.404	.057	.286	-.719**	-.153	-.554*	-.312	.058	.178	-.042	.488	-.904**	-.178	.470	1

(注: *. 在 0.05 级别 (双尾), 相关性显著; **. 在 0.01 级别 (双尾), 相关性显著。)

在 20—30 cm 土层中的真菌、细菌以及放线菌与速效磷、全磷的相关程度要高于其它两土层。由于磷的迁移率低, 同时表层土壤的有机或无机胶体对土壤中的磷酸根有较强的吸附能力, 使得土壤底层磷含量要低于表层。随着土层的加深磷含量降低, 微生物三大类群丰度与磷的相关性增强。对比分析表 2 发现, 在 0—10 cm 土层中, 细菌和土壤养分之间 (除和速效磷) 的相关性与真菌、放线菌和土壤养分之间的相关性完全相反, 牛世全、范富等人研究表明细菌在微生物数量中占有绝对优势, 在有机质分解、养分循环、保持土壤肥力等方面承担着重要作用。

3.3 植物 - 土壤 - 微生物化学计量相关性分析

研究表明, 土壤全氮和土壤全磷呈极显著负相关关系, 这与曾昭霞等研究的关于桂西北喀斯特森林植物 - 凋落物 - 土壤生态化学计量特征所得出的结论一致, 而 Patel 等研究了印度西部拉贾斯坦邦乌代普尔干旱落叶林生态系统不同土地利用类型土壤的氮和磷的关系, 发现土壤全氮和全磷呈显著正相关关系, 因此可推测土壤氮、磷之间的关系可能会由于研究区内不同的地形地貌而改变, 并不具有统一的相关性。土壤全磷含量在不同土地利用类型土壤中受磷沉降、磷的迁移转化以及地势地貌等多种因子共同作用, 研究得出土壤全磷含量与海拔呈极显著负相关关系, 这与李婷、Brian K 等的研究结果一致。土壤全氮与微生物量碳呈显著正相关关系, 这与沈其荣等的研究结果一致。

土壤微生物量是联系植物与土壤的重要参数, 在土壤物质循环和能量转化等过程中具有重要的调控作用。Sharm 等研究表明, 土壤微生物碳、氮、磷含量呈现冬季最高雨季最低的特征, 这可能是由于植物处于生长旺盛期时对这些营养物质需求强烈。研究结果表明土壤微生物量碳、磷与海拔呈极显著正相关关系, 表明土壤微生物量碳、磷受海拔影响较大, 这与土壤微生物量在不同海拔高度下受植被类型、地形及气候因子的综合作用有关。与 Vance 等的研究结果不同, 本研究中植物全氮与微生物量氮呈负相关关系, 植物全磷与微生物量磷之间呈正相关关系, 并且它们都没有显著性, 而植物全碳与微生物量碳之间存在显著正相关关系, 这与植物体内元素含量的变化受土壤环境、微生物群落结构、气候因素以及其它生态因子的综合作用有关。研究得出植物全碳与全氮呈显著正相关关系, 这与植物能够主动地调节养分需求以适应周围环境的变化有关, 由于植物体内光合和矿质代谢之间的内在联系, 植物体内碳、氮、磷含量会随着环境而改变, 同时相互之间会有显著相关性。

上述分析表明, 植物 - 土壤 - 微生物养分的分布受气候、地形等多种生态因子的共同作用, 显现出较强的空间相关性, 植物 - 土壤 - 微生物各养分之间是相互关联的, 单一养分含量的变化, 也会引起其它养分供给的改变。

[参考文献]

[1] Elser J. J., Sterner R. W., Gorokhova E. et al. Biological stoichiometry

- from genes to ecosystems[J]. *Ecology Letters*, 2000, 3(6):540-550.
- [2] 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[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(01):2-6.
- [3] 宋长青, 吴金水, 陆雅海, 等. 中国土壤微生物学研究 10 年回顾[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(10):1087-1105.
- [4] Diego Cosentino, Claire Chenu, Yves Le Bissonnais. Aggregate stability and microbial community dynamics under drying - wetting cycles in a silt loam soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 38(8):2053-2062.
- [5] Hu Yufu, Shu Xiangyang, He Jia, et al. Storage of C, N, and P affected by afforestation with *Salix cupularis* in an alpine semiarid desert ecosystem[J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(1):188-198.
- [6] 杨荣, 塞那, 苏亮, 等. 内蒙古包头黄河湿地土壤碳氮磷含量及其生态化学计量学特征[J]. *生态学报*, 2020, 40(07):2205-2214.
- [7] Göran I. Ågren. The C:N:P stoichiometry of autotrophs - theory and observations[J]. *Ecology Letters*, 2004, 7(3):185-191.
- [8] 王克林. 生态脆弱区域农业与环境协调发展策略[J]. *中国生态农业学报*, 2001(03):90-92.
- [9] 彭晚霞, 王克林, 宋同清, 等. 喀斯特脆弱生态系统复合退化控制与重建模式[J]. *生态学报*, 2008(02):811-820.
- [10] 王世杰, 张信宝, 白晓永. 南方喀斯特石漠化分区的名称商榷与环境特点[J]. *山地学报*, 2013, 31(01):18-24.
- [11] 胡培雷, 王克林, 曾昭霞, 等. 喀斯特石漠化地区不同退耕年限下桂牧 1 号杂交象草植物-土壤-微生物生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2017, 37(03):896-905.
- [12] 俞月凤, 彭晚霞, 宋同清, 等. 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[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(04):947-954.
- [13] 王振南, 杨惠敏. 植物碳氮磷生态化学计量对非生物因子的响应[J]. *草业科学*, 2013, 30(06):927-934.
- [14] 国家林业局. 中华人民共和国林业行业标准——森林土壤分析方法[M]. 北京: 中国行业标准出版社, 2000.
- [15] 陶磊, 褚贵新, 刘涛, 等. 有机肥替代部分化肥对长期连作棉田产量、土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2014, 34(21):6137-6146.
- [16] 肖飞, 杜耘, 凌峰, 等. 长江中游四湖流域湖泊变迁与湖区土壤空间格局的关联分析[J]. *湿地科学*, 2012, 10(01):8-14.
- [17] 余新晓, 耿玉清, 牛丽丽, 等. 采样尺度对北京山区典型流域森林土壤养分空间变异的影响——以密云潮关西沟流域为例[J]. *林业科学*, 2010, 46(10):162-166.
- [18] 吕世丽, 李新平, 李文斌, 等. 牛背梁自然保护区不同海拔高度森林土壤养分特征分析[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(04):161-168+177.
- [19] Tian Hanqin, Chen Guangsheng, Zhang Chi, et al. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data[J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1-3):139-151.
- [20] Liu Jinliang, Dang Peng, Gao Yang, et al. Effects of tree species and soil properties on the composition and diversity of the soil bacterial community following afforestation[J]. *Forest Ecology and Management*, 2018, 427:342-349.
- [21] Zechmeister-Boltenstern Sophie, Keiblinger Katharina Maria, Mooshammer Maria, et al. The application of ecological stoichiometry to plant - microbial - soil organic matter transformations[J]. *Ecological Monographs*, 2015, 85(2):133-155.
- [22] Zhang Chao, Liu Guobin, Xue Sha, et al. Soil bacterial community dynamics reflect changes in plant community and soil properties during the secondary succession of abandoned farmland in the Loess Plateau[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 97:40-49.
- [23] 刘旻霞, 蒋晓轩, 李全弟, 等. 兰州北山不同植被土壤可培养微生物丰度变化特征及影响因素[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(06):2683-2691.
- [24] 代静, 司万童, 赵雪波, 等. 稀土尾矿库周边湿地土壤养分的垂直分布特征[J]. *环境工程*, 2016, 34(12):158-161+166.
- [25] 牛世全, 杨婷婷, 李君锋, 等. 盐碱土微生物功能群季节动态与土壤理化因子的关系[J]. *干旱区研究*, 2011, 28(02):328-334.
- [26] 范富, 张庆国, 马玉露, 等. 不同植物条件下盐碱地土壤微生物研究[J]. *内蒙古民族大学学报(自然科学版)*, 2017, 32(04):336-341.
- [27] 曾昭霞, 王克林, 刘孝利, 等. 桂西北喀斯特森林植物-凋落物-土壤生态化学计量特征[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(07):682-693.
- [28] Patel K., Kumar Nirmal J. I., Kumar, N. R., et al. Seasonal and temporal variation in soil microbial biomass C, N and P in different types land uses of dry deciduous forest ecosystem of Udaipur, Rajasthan, western India[J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2010, 8(4):377-390.
- [29] 李婷, 张世熔, 张林, 等. 横断山北部生态脆弱区土壤钾素的影响因素分析[J]. *水土保持学报*, 2006(03):102-105.
- [30] Brian Kozar, Rick Lawrence, Dan S. Long. Soil Phosphorus and Potassium Mapping Using a Spatial Correlation Model Incorporating Terrain Slope Gradient[J]. *Precision Agriculture*, 2002, 3(4):407-417.
- [31] 徐阳春, 沈其荣, 冉炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J]. *土壤学报*, 2002(01):83-90.
- [32] 赵先丽, 程海涛, 吕国红, 等. 土壤微生物生物量研究进展[J]. *气象与环境学报*, 2006(04):68-72.
- [33] Sharma P, Rai S.C, Sharma R, et al. Effects of land-use change on soil microbial C, N and P in a Himalayan watershed[J]. *Pedobiologia - International Journal of Soil Biology*, 2003, 48(1):83-92.
- [34] Vance E.D., Brookes P.C., Jenkinson D.S.. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. *Pergamon*, 1987, 19(6):703-707.
- [35] 曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索[J]. *植物生态学报*, 2005(06):141-153.
- [36] Sterner Robert W., Elser James J., Vitousek Peter. *Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to the Biosphere*[M]. Princeton Oxford: Princeton University Press, 2017-02-15.