

滨海盐碱地土壤化学计量特征与群落物种多样性及其相关关系

陈小雪¹, 李红丽¹, 董智¹, 张起利², 陈鹏¹, 王勇²

(1. 山东农业大学 林学院 山东泰山森林生态系统国家定位研究站,

山东 泰安 271018; 2. 潍坊市自然资源和规划局, 山东 潍坊 261000)

摘要:为揭示滨海盐碱地林地土壤生态化学计量特征及其群落物种多样性,以山东寿光机械林场 5 种纯林和 4 种混交林为研究对象,运用生态化学计量手段,对比分析营林过程中林地间土壤营养元素差异和群落物种多样性变化,并通过 CCA 和 RDA 排序探讨了影响植物多样性的关键因子。结果表明:(1) 各林地 0—20 cm 表层土壤有机碳(SOC)和全氮(N)占整个剖面的 41.76%~54.56% 和 40.51%~51.46%,全磷(P)除旱柳林外其余林地各层无显著差异,全钾(K)在 0—60 cm 土层无明显分层规律,表层 SOC 和 N 可作为表征盐碱地林地最敏感的养分指标。(2) 造林后林地土壤 C/N 由逐渐降低演变为先升高后降低的分布规律,C/P,N/P,N/K 由先降低后升高的分布特征呈逐渐降低的分布规律,C/K,P/K 无明显变化,造林前后均呈逐渐降低趋势。盐碱地养分含量普遍偏低,N 和 P 对滨海盐碱地存在不同程度的限制,纯林更易受到 N,P 养分的限制。(3) 各林地土壤养分间具有极显著非线性耦合关系,SOC,N,P 与 K 相互影响,SOC,N 与 P 相互影响,SOC,N 间表现为相互促进、协同增长的正相关关系。(4) 林地灌草群落大致可分为 3 个类群,其中耐盐碱植物的分布与 P 有效性关系密切相关,一年生草本喜肥沃土壤,多年生草本更倾向于低养分土壤。灌草层植物多样性与土壤 K 和 C/N 呈显著正相关关系。综上,滨海盐碱地林地养分含量普遍偏低,旱柳林、黑杨林、白蜡臭椿林和皂角臭椿林,蓄肥保墒效果优越,可以改善盐碱地土壤贫瘠现象,造林还可以改变养分在不同土层的吸收利用及分布规律,且 N 和 P 对滨海盐碱地存在不同程度的限制。各林地土壤养分及生态化学计量比间呈极显著耦合关系,同时生态化学计量特征又影响盐碱地灌草植物的分布与多样性变化。

关键词:土壤生态化学计量特征; 耦合关系; 物种多样性; 滨海盐碱地

中图分类号:S153; S727.22

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)06-0037-09

Characteristics of Soil Stoichiometry and Species Diversity of Community and Their Coupling Relationship in Coastal Saline-Alkali Land

CHEN Xiaoxue¹, LI Hongli¹, DONG Zhi¹, ZHANG Qili², CHEN Peng¹, WANG Yong²

(1. Mountain Tai Forest Ecosystem Research Station of State Forestry Administration,

Forestry College, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China;

2. Weifang Natural Resources and Planning Bureau, Weifang, Shandong 261000, China)

Abstract: In order to reveal the characteristics of soil stoichiometry and species diversity in coastal saline-alkali land forestland, five pure forests and four mixed forests in Shouguang mechanical forest farm of Shandong Province were selected as the research sites. Ecological stoichiometry was used to compare and analyze the difference of soil nutrient elements and change of species diversity among woodlands in the process of plantation. The CCA and RDA were used to explore the key factor on species diversity. The results show that: (1) the surface soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (N) of 0—20 cm layer in different forestlands accounted for 41.76%~54.56% and 40.51%~51.46% of the whole section; there was no significant difference in total phosphorus (P) among all the forestland layers except upland *Salix matsudana*; there was

收稿日期:2019-10-22

修回日期:2020-02-22

资助项目:山东省林业科技创新项目(LYCX03-2018-17);山东省林业厅资助项目“欧洲投资银行贷款山东沿海防护林工程项目监测与评价”(SCSFP-JP)

第一作者:陈小雪(1994—),女,山东济南人,在读硕士,研究方向为水土流失综合治理。E-mail:chenxx12@126.com

通信作者:李红丽(1972—),女,内蒙古赤峰人,教授,硕士生导师,主要从事荒漠化防治与植物恢复研究。E-mail:hlh@sdaa.edu.cn

no obvious stratification rule of total potassium (K) in 0—60 cm soil layer; surface soil organic carbon and total nitrogen can be used as the most sensitive fertility index in forestlands; (2) after afforestation, C/N in forestlands evolved from gradually decreasing to first increasing and then decreasing; the distribution characteristics of C/P, N/P and N/K present the decrease and then increase to gradual decrease; C/K and P/K are no significant change, but show the decreasing trend before and after afforestation; the nutrient content of saline-alkali soil is generally low, and total nitrogen and total phosphorus have different limits on coastal saline-alkali land; pure forests are more restricted by nitrogen and phosphorus nutrients; (3) soil nutrients in each forestland have a highly significant nonlinear coupling relationship with each other; SOC, N, P and K interact with each other, SOC, N and P interact with each other, and SOC and N show the positive correlation of synergistic growth; (4) the plant community can be roughly divided into three groups, among which the distribution of salt-tolerant plants is closely related to the availability of P; annual herb prefers the fertile soil, while perennial herb prefers the low-nutrient soil; there is a significant positive correlation between species diversity and soil K and C/N. In conclusion, the nutrient content of coastal saline-alkali forestland is generally low. The effects of *Salix matsudana*, *Populus deltoides*, *Fraxinus chinensis*-*Ailanthus altissima* and *Gleditsia sinensis*-*Ailanthus altissima* forest lands on soil fertility are both excellent, which can alleviate the soil barrenness of saline-alkali land. Afforestation can change the absorption, utilization and distribution of nutrients in different soil layers, and N and P have different degrees of restrictions on coastal saline-alkali land. Soil nutrients and ecostochiometry in each forestland have a highly significant nonlinear coupling relationship with each other. And ecostochiometry also affects the distribution and diversity of shrub and grass plants in saline alkali land.

Keywords: soil ecological stoichiometric characteristics; coupling relationship; species diversity; coastal saline-alkali land

土壤有机碳(SOC)、全氮(N)、全磷(P)、全钾(K)是土壤养分的主要组成部分,也是衡量土壤肥力和质量的重要指标。研究多种化学元素 C,N,P,K 的质量平衡和对生态系统的交互作用则称为生态化学计量学^[1],其为研究生态系统能量平衡和元素间特征关系提供了理论依据^[2]。探究生态化学计量元素间动态变化趋势,可以对植物个体生长、种群动态和限制元素进行判断,进而可以预测指示植被的演替、恢复状况以及生态系统稳定性^[3]。目前国内对生态化学计量的研究主要集中于对植物组织元素的研究,而对土壤养分的生态化学计量研究较少^[4],将生态化学计量运用到土壤中,不仅可了解土壤质量,探究土壤养分之间的耦合关系,还可以揭示土壤养分的可获得性^[5]。

土壤生态化学计量特征对植物群落物种多样性的研究一直是生态学研究的热点问题,近年来,国内外学者通过对沙地^[6-7]、湿地^[8]、林地^[9]等不同生态系统进行研究并取得大量可观成果。杨祥祥等^[6]研究发现土壤的 C : N : P 能够影响沙地植物群落的物种多样性。宁志英等^[7]对科尔沁沙地研究后进一步指出 N : P 可以更好地反映沙地土壤养分平衡对群落物种多样性的调控作用。罗琰等^[8]对辉河湿地草甸

植被研究后认为 P 对物种多样性、生长和生物量影响较小。孙千惠等^[9]对马尾松人工林研究后发现, P,K,N 与林下物种多样性指数的相关性最为密切。目前虽尚未有一致的定论,但我们可以肯定的是,土壤生态化学计量特征与物种多样性间具有密不可分的联系,且不同生态系统间规律各有差异。

山东省滨海盐碱地主要分布在黄河三角洲及海岸线附近,地下水埋深较浅,土壤含盐量高,水分有效性差,土壤盐渍化现象普遍^[10]。盐碱生境下,土壤养分动态转化调节能力随着植被类型的不同在空间上表现出较大差异性^[11]。但目前国内对盐碱地区的研究主要集中在对盐渍化土壤改良和生态治理方面^[12],对揭示盐碱地区土壤养分循环规律、物种多样性特征及二者相关性的研究鲜有报道。探索滨海盐碱地林地土壤养分组分变化和植物群落分布特征规律,不仅有助于揭示盐碱地区 C,N,P,K 平衡机理和盐碱地物种多样性的维持机制,而且有助于揭示土壤养分限制情况及林地生态系统可持续经营管理^[13]。基于此,本研究以山东寿光机械林场盐碱地 5 种纯林和 4 种混交林为研究对象,以未造林裸地为对照,分析不同林地内土壤生态化学计量的空间分异特征和

植被类群的分布规律,阐明土壤营养元素分布差异和彼此间耦合关系,并对影响物种多样性的土壤生态化学计量因子进行判断,以期为该地生态系统的管理、保护及造林树种的选择和配置提供一定的数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山东省寿光市机械林场,地理坐标为 37°7′2″—37°17′8″N,118°42′12″—118°44′54″E,濒临渤海莱州湾,是典型的滨海盐碱地,属暖温带大陆性季风气候,年平均气温 12.7℃,极端最低气温—22.3℃,极端最高气温 41.0℃,平均降水量 593.8 mm,季节性降水高度集中于 6—8 月,年蒸发量 1 834.0 mm,年平均日照时数 2 548.8 h。研究区地

处滨海平原,地势低平,土壤质地以壤土为主,土壤类型以盐化潮土为主,土壤 pH 值>8.0~9.5,土体深厚,盐分类型以 NaCl 为主,含盐量为 0.3%~1.0%,局部地块高达 2.0%。选择研究区内 10 种(含对照)典型林地研究对象,分别为美洲黑杨(*Populus deltoides*)林、白蜡(*Fraxinus chinensis*)林、旱柳(*Salix matsudana*)林、三球悬铃木(*Platanus orientalis*)林、怪柳(*Tamarix chinensis*)林、皂角(*Gleditsia sinensis*)臭椿(*Ailanthus altissima*)混交林、国槐(*Sophora japonica*)臭椿混交林、白蜡臭椿混交林、白蜡怪柳混交林。各造林树种均于 2015 年春季营造,造林时树龄为 3 a,各林地均采用相同的抚育措施。2019 年调查时,各样地树高、根径、胸径、冠幅、土壤 pH 值和电导率见表 1。

表 1 样地基本情况

造林模式	树种	树高/ m	根径/ cm	胸径/ cm	冠幅/m		密度/ (株·hm ⁻²)	土壤 pH 值	电导率/ (μS·cm ⁻¹)
					东西	南北			
黑杨纯林	黑杨	9.96	11.05	8.95	2.92	3.18	2666	8.56	222.4
白蜡纯林	白蜡	3.99	4.70	3.38	1.48	1.34	2500	8.18	1365.7
旱柳纯林	旱柳	7.76	9.58	8.13	2.63	3.20	1666	8.37	230.7
悬铃木纯林	悬铃木	10.18	8.59	7.29	2.40	2.13	2000	8.40	152.5
怪柳纯林	怪柳	2.28	2.35		1.23	1.61	3125	9.05	947.1
	皂角	5.03	10.38	8.18	1.86	1.77	1250	8.57	325.2
	臭椿	5.32	13.05	10.20	2.21	2.35	1250		
国槐臭椿混交林	国槐	4.81	6.25	4.63	3.00	3.54	1200	8.57	253.3
	臭椿	6.31	8.40	6.50	2.80	3.30	1470		
白蜡臭椿混交林	白蜡	3.90	5.08	3.98	2.25	2.70	1333	8.62	193.6
	臭椿	6.35	9.95	8.03	1.70	1.80	1333		
白蜡怪柳混交林	白蜡	4.27	5.65	4.11	2.00	1.80	1666	9.02	1216.5
	怪柳	1.19	1.29		1.02	1.27	1250		

1.2 植被调查、土样采集与测定

2019 年 8 月,在寿光机械林场进行植被样方调查和土壤采集。在每个林地内设置一条 100 m 的样线,在 0,25,50,75,100 m 处各设置一个 2 m×2 m 灌草层样方,共设置灌草样方 45 个。调查样方内植物群落组成与结构,详细记录每种植物的种名、高度、密度、盖度,并计算物种多样性指数。选取林场内裸地为对照(CK),在各林地及 CK 内设置 3 个小区,每个小区按“品”字形随机设 3 个土壤取样点,共设置 90 个样点。在每个取样点分别用土钻取 0—20,20—40,40—60 cm 的土样带回实验室,将同一样地相同土层采集的土样等比例混合,然后自然风干,挑去动植物残体和石块等杂物,过筛后装瓶以进行土壤化学指标的分析测定。SOC 采用重铬酸钾外加热氧化法测定;N 采用半微量凯氏定氮法测定;P 采用硫酸—高氯酸—钼锑抗比色法测定;K 采用碱融—火焰光度计法测定^[14]。以上各项指标每样品测定 3 次重复。

1.3 数据处理与分析

重要值(IV)以相对密度(RD)、相对盖度(RC)和相对高度(RH)计算,即 IV=RD+RC+RH。

林下植物群落多样性采用 Patrick 丰富度指数、Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数、Pielou 均匀度指数进行分析计算,计算公式如下:

Patrick 丰富度指数=S

Margalef 丰富度指数=(S-1)/lgN

Shannon-Wiener 多样性指数=-∑P_ilnP_i

Simpson 多样性指数=1-∑P_i²

Pielou 均匀度指数=-∑P_ilnP_i/lnS

式中:S 为群落总物种数(个);N 为所有物种个数总数(个);P_i=N_i/N;P_i为第 i 种的相对重要值;N_i为第 i 个物种的个体总数(个)。

林地生态化学计量比采用质量比进行计算;采用 CANOCO 5.0 对环境因子和物种多样性进行 DCA

分析,根据分析结果选择合适的排序方法进行冗余分析(RDA)和典范对应分析(CCA);采用 SPSS 19.0 统计分析软件对数据进行方差分析和相关分析,相关分析过程中对各林地 0—60 cm 土层均值进行拟合,选择线性函数、指数函数、幂函数等模型对 SOC, N, P, K 含量彼此间进行线性与非线性拟合,根据 R^2 选出最优拟合模型;采用最小显著极差法(LSD)进行多重比较($\alpha=0.05$),用字母标记法表示各组数据间的差异显著性;采用 Origin 8.0 软件作图,图中数据为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 林地土壤生态化学计量特征

由图 1 可知,不同林地 SOC, N, P 和 K 含量均显著高于对照裸地($p<0.05$)。旱柳林较其他纯林在土壤 N, P, K 中含量均为最高,黑杨林较其他纯林在 SOC 中含量最高,白蜡臭椿林在 4 种混交林中表现最好。纯林各林地 SOC 含量介于 1.47~6.27 g/kg,且彼此间差异显著($p<0.05$);土壤 N 含量变化与 SOC 相似,各林地含量介于 0.20~0.83 g/kg。黑杨林和旱柳林在纯林 0—60 cm 土层中平均 SOC, N 含量均较高,黑杨林 SOC 和 N 分别为 6.27, 5.79 g/kg,是含量最低的桤柳林的 4.27, 3.94 倍,旱柳林 SOC 和 N 为 0.78, 0.83 g/kg,是含量最低的桤柳林的 3.93, 4.20 倍。白蜡臭椿林在混交林 0—60 cm 土层中 SOC, N 含量最高,但整体含量略低于黑杨林和旱柳林。土壤 P 含量在旱柳林中出现最高值 0.75 g/kg,而其他林地 P 集中于 0.33~0.40 g/kg,彼此间相差无几。各林地 K 含量分布于 9.73~11.5 g/kg,除桤柳林和悬铃木林较低外,其他 3 种纯林和 4 种混交林间并无显著差异($p>0.05$)。从土壤垂直方向来看,各林地 SOC 和 N 最高值均出现在 0—20 cm 土层内,0—20 cm 表层 SOC 和 N 占整个剖面总量的 41.76%~54.56%和 40.51%~51.46%,表现出土壤碳氮的表聚效应。这是由于受外界环境因素及植被枯落物养分归还的影响,导致营养元素首先在表层土壤密集,然后再随水或其他介质向下层迁移扩散。而混交林中皂角臭椿林和国槐臭椿林的最大值则出现在土壤中下层,这可能是因为臭椿属深根系树种,主侧根系发达,植物分泌物及残体主要分布于深层土壤,对 SOC 的释放有一定的活化作用。除旱柳林和桤柳林 P 含量最高值出现在 40—60 cm 层且与其他土层差异显著外,其余林地上中下 3 层土壤 P 无显著差异($p>0.05$)。各林地土壤 K 在 0—60 cm 土层无明显分层规律。

由图 2 可以看出,随土层深度的增加,对照裸地

在土壤 C/N, C/K, P/K 中表现为逐渐递减,在 C/P, N/P, N/K 中则表现为先降低后增加,对照裸地各项生态化学计量比整体低于各林地,表明盐碱地造林可以明显提高土壤养分利用效率。各林地土壤生态化学计量特征在 0—60 cm 土层内表现出不同的规律,无论纯林还是混交林土壤 C/N 最大值多出现在 20—40 cm 土层中, C/P, C/K, N/P, N/K 最大值多出现在 0—20 cm 表层土壤中, P/K 在不同土层间波动较小,多集中于 0.029 3~0.036 4。白蜡臭椿林较各林地在 0—60 cm 土层中平均土壤 C/N 最高,为 10.42,混交林土壤 C/N 为 7.90~10.42,纯林 C/N 为 7.45~9.68。黑杨林较各林地平均土壤 C/P, C/K, N/P 最高,分别为 18.5, 0.56, 2.29,桤柳林在 C/P, C/K, N/P 中均为最低,分别为 4.61, 0.15, 0.62,前者是后者的 4.01, 3.73, 3.69 倍。除黑杨林外,纯林的 C/P 和 N/P 分别介于 4.61~9.92, 0.62~1.12,混交林则介于 11.61~13.79, 1.21~1.63。旱柳林在各林地 0—60 cm 土层中平均 N/K 最高为 0.075,黑杨林次之为 0.069,两者没有显著差异($p>0.05$),其余纯林则在 0.021~0.036,混交林则在 0.035~0.054。在 P/K 中,旱柳林最高为 0.066,其余林地彼此间并无明显差别。

2.2 土壤养分及生态化学计量比间相关性分析

由图 3 可知,各林地 0—60 cm 平均土壤养分彼此间具有良好的非线性耦合关系。各林地 SOC 与 N, P, K 均呈极显著幂函数关系($p<0.01$),其中 SOC 和 N 在各养分间相关性最高,和 K 相关性次之,和 P 相关性最弱,随着 SOC 的增加,土壤 N, P, K 表现出递增趋势。各林地 N 与 P 呈极显著指数函数关系,随着 N 的增加, P 也随之增大,表现出正相关关系。N, P 与 K 均呈极显著二次函数关系,拟合度较好,曲线呈倒“U”型,随着 N, P 的增加, K 表现出先逐渐增大后减小的趋势。由图 4 可知, SOC 与 C/P, C/K 和 N 与 N/P, N/K 以及 K 与 C/K, N/K 均为幂函数关系, P 与 P/K 为二次函数关系, SOC, N, P 与其生态化学计量比拟合度较高, K 的拟合度较差。各函数在其域值内均单调递增,因此,随着 SOC, N, P, K 的增大,其生态化学计量比也随之增加。土壤 P 与其生态化学计量比相关性较弱, P 与 C/P, N/P 均无显著关系, C/N 与 SOC, N 和 P/K 与 K 也无显著关系($p>0.05$)。

SOC 与 N, P, K 呈正相关幂函数关系, N 和 P 呈正相关指数函数关系,总体上 SOC 与 N, P, K 以及 N 与 P 表现为相互促进,协同增长的关系。此外, SOC 与 C/K, N 与 N/K, P 与 P/K 均表现出极为紧密的关系, R^2 分别为 0.980 9, 0.978 5, 0.926 5,表明 SOC,

N,P 与 K 相互影响,K 随 SOC 的增加而增加,K 随 N,P 的增加先增后减。同时 SOC 与 C/P,N 与 N/P 关系也较为紧密, R^2 分别为 0.783 3,0.781 8,表明

SOC,N 与 P 相互影响,P 随着 SOC,N 的增加也呈现递增趋势。而 SOC,N 之间呈极显著幂函数关系,表现为协同增长的正相关关系。

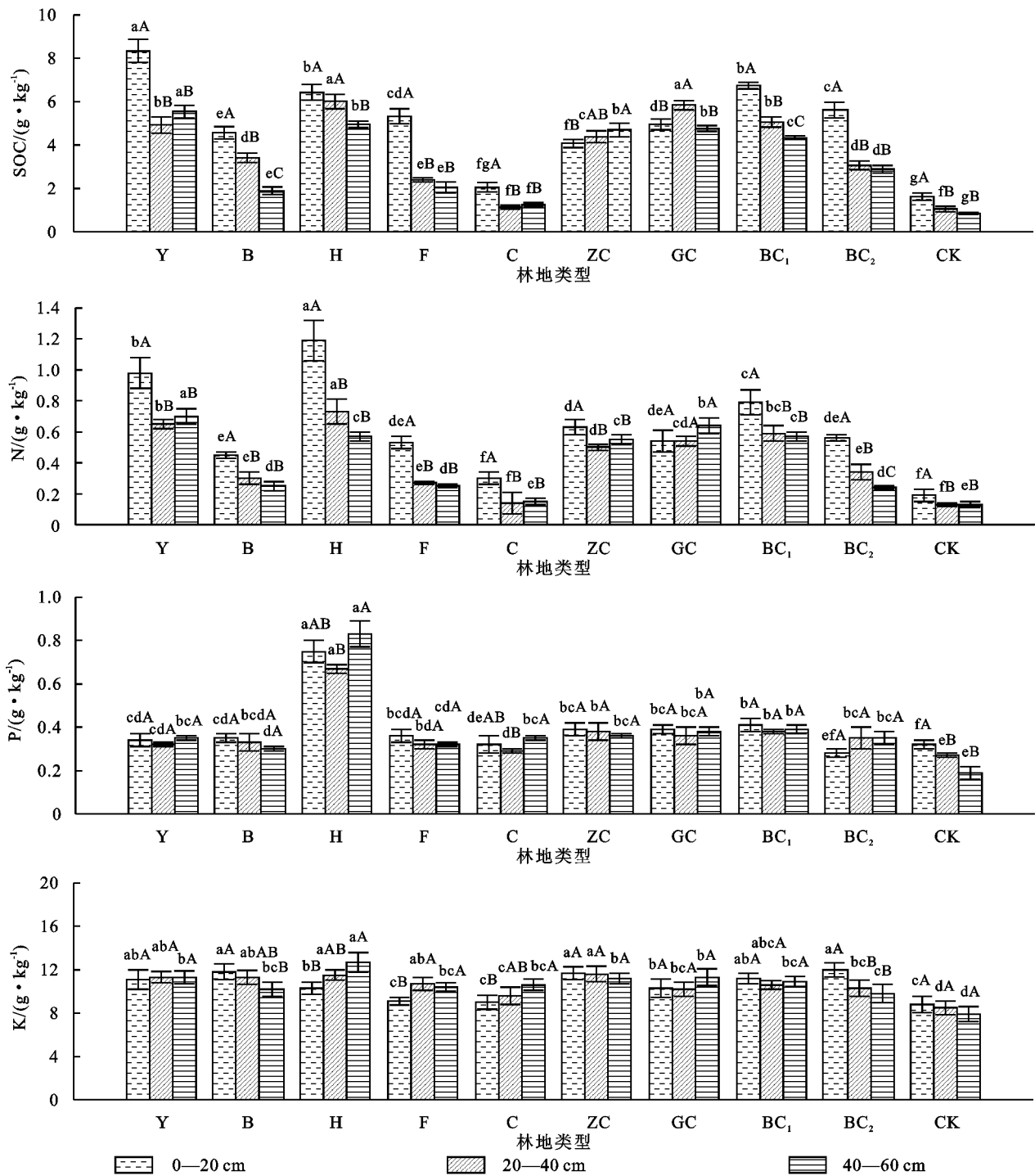
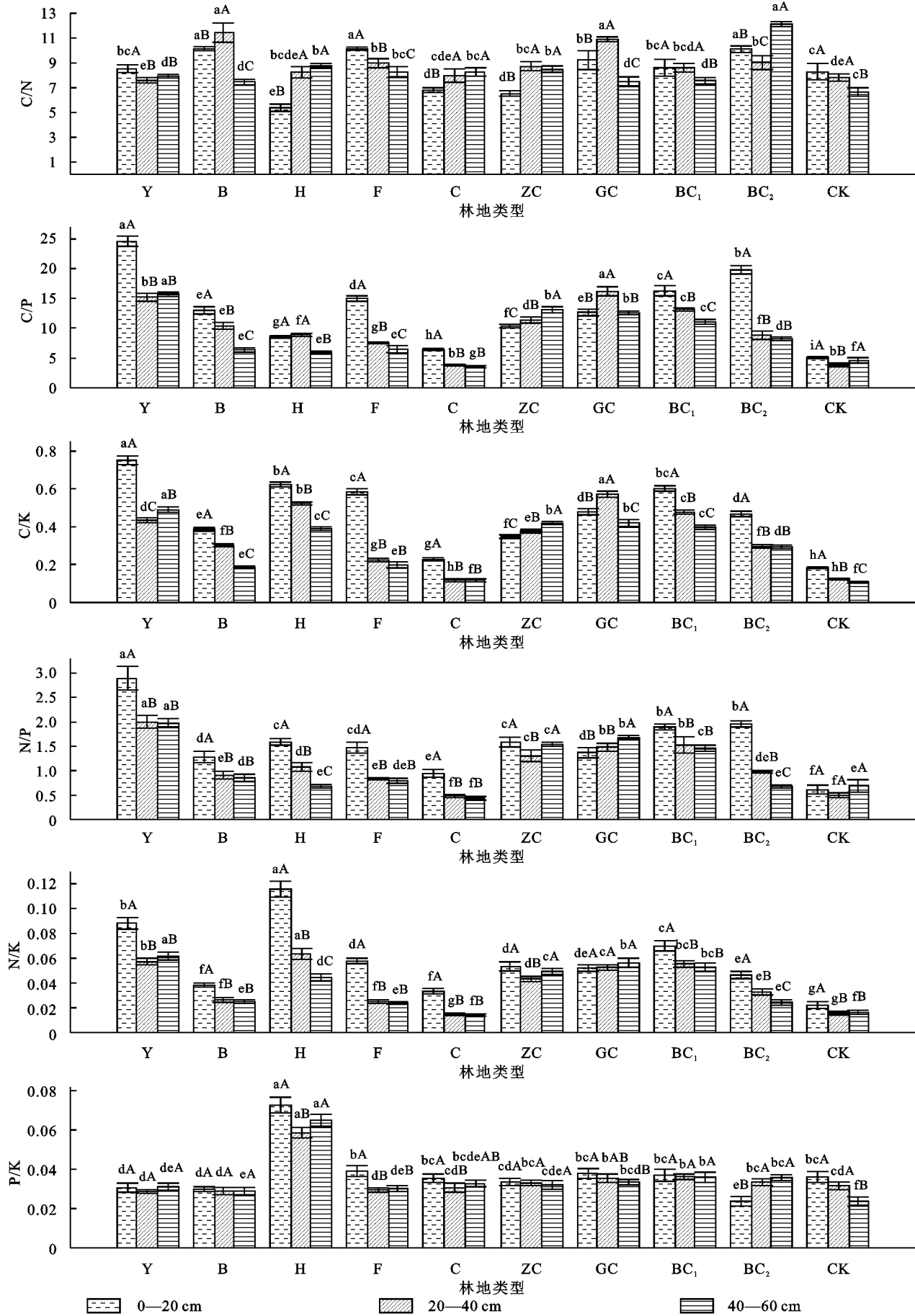


图 1 不同林地土壤养分含量

2.3 林地土壤生态化学计量特征对物种多样性影响
物种组成作为反映植物群落结构的重要指示因子,是了解群落基础和动态演替的关键。土壤是植物群落的主要环境变量之一,土壤的性质与植物群落结构和多样性有着紧密的关系^[9]。滨海盐碱地调查样

区林下草本植物共 12 科 20 属 25 种,多为一年生和多年生草本,其中以禾本科、菊科和藜科为主要建群种,以苣荬菜、稗和猪毛菜为主要优势种,3 种植物拥有较大的生态位宽度和重要值,在植物群落发展过程中占据关键地位。



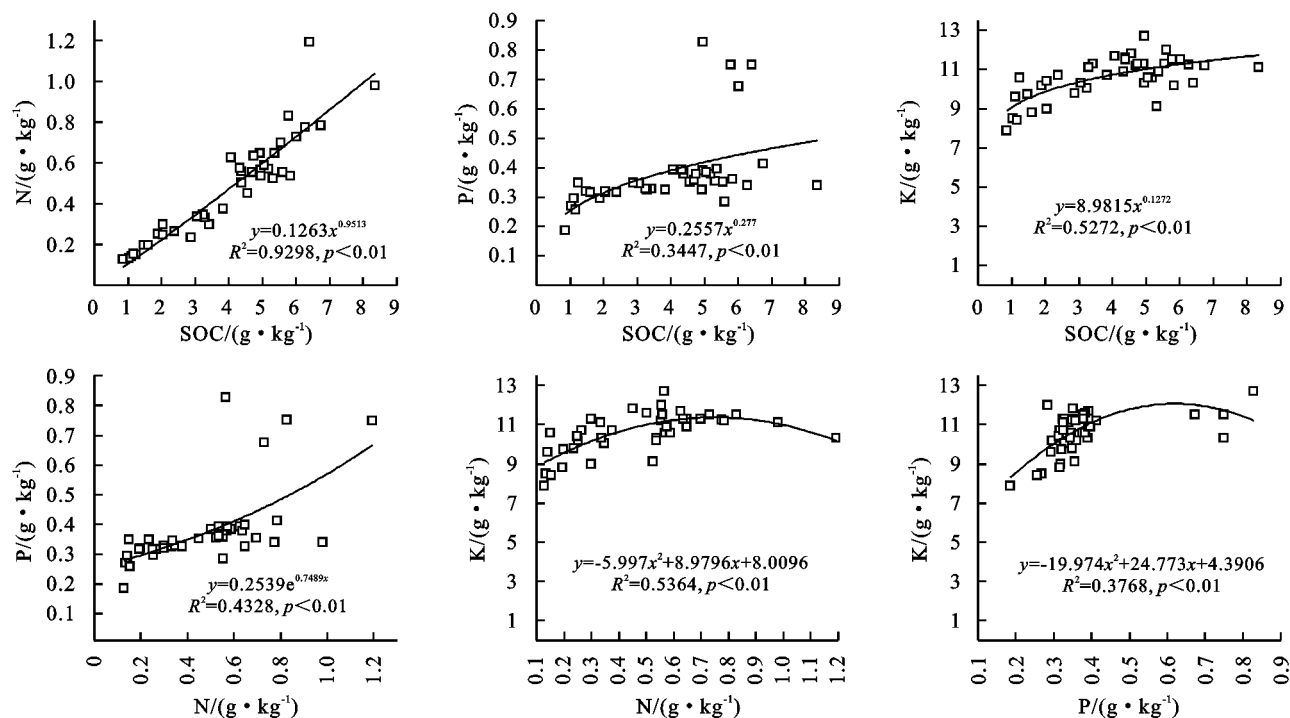


图3 0—60 cm 平均土壤 SOC,N,P,K 之间的回归关系

盐碱地 0—60 cm 平均土壤生态化学计量与植被因子 CCA 排序如图 5A 所示,图中 4 轴的变异解释量分别为 20.9%,18.8%,17.6%,13.5%,累计解释了林地土壤生态化学计量与植被信息的 70.8%,表明盐碱地植被分布与土壤生态化学计量特征密切相关。根据 CCA 排序图可将盐碱地植被划分为 3 个类群,第 I 类群主要为耐盐碱的一年生草本,与 C/P 密切相关,包括稗(*Echinochloa crusgalli*)、牛筋草(*Eleusine indica*)、盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)、地肤(*Kochia scoparia*)和苋(*Amaranthus tricolor*)等,主要为禾本科和藜科一年生草本植物,分布于 C/P 较高的样区;第 II 类群为喜肥沃的一年生草本,主要受 SOC,N,K 的影响,包括铁苋菜(*Acalypha australis*)、小藜(*Chenopodium serotinum*)、马齿苋(*Portulaca oleracea*)、反枝苋(*Amaranthus retroflexus*)等苋科一年生草本植物,主要沿养分梯度分布;第 III 类群为多年生草本和灌木,与 SOC,K,C/K 呈负相关关系,主要为多年生草本植物,包括魁蒿(*Artemisia princeps*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、苣荬菜(*Sonchus arvensis*)、茜草(*Rubia cordifolia*)等,分布于养分含量较低的样区。由图 5A 可知,SOC,C/K,K 与第一排序轴相关性最强(r 分别为 0.84,0.75,0.72),是影响群落植被分布的主要土壤生态化学计量因子,而 P/K 与 C/P 与第二排序轴显著相关(r 分别为 0.72,−0.36)。

盐碱地土壤生态化学计量与物种多样性 RDA 排序如图 5B 所示,图中前 2 轴的变异解释量分别为

97.4%,2.3%,两者累计解释了样区 99.7% 的总变异,表明盐碱地土壤生态化学计量是影响物种多样性的主要因素。Patrick 指数与 C/N 呈正相关关系,与 P/K 呈负相关关系;Margalef 指数、Simpson 指数和 Shannon 指数与 K 正相关,与 P/K 负相关;Pielou 指数与 N 关系较为紧密,两者呈正相关关系。由图 5B 可知,K,C/N 与第一排序轴相关性最强(r 分别为 −0.50,−0.45),是影响盐碱地林下植物多样性的正向主要影响因子,研究区土壤贫瘠,养分含量极低,在一定程度上限制了植物群落的发展,但各林地中土壤 K 含量相对较为丰富,C/N 相对较高,且两者变化幅度平稳,对盐碱地早期植物生长起到了良好的促进作用。P/K,N/K 相关性次之(r 分别为 0.30,0.27),P/K,N/K 是盐碱地林下植物多样性的逆向次要影响因子,相比于单纯的 N 和 P 元素,其更能贴切地反映植物本身对 N,P 元素的需求和对养分的持留能力。而这也植物群落方面表明了 P 和 N 是影响滨海盐碱地的限制性元素,且 P 比 N 的限制作用更强。

3 讨论

盐碱生境下,土壤养分动态转化调节能力随着植被类型的不同,表现出较大的空间异质性^[15]。本研究结果表明,滨海盐碱地不同林地土壤养分差异明显,纯林和混交林各有特征,与对照裸地的差别也各有不同。纯林间土壤养分含量波动剧烈,其中旱柳林土壤养分含量最高,黑杨林次之,柽柳林最低,表明旱柳林和黑杨林地土壤营养元素储备充足,更有利于保

肥保墒。混交林间土壤养分整体趋于稳定,其中白蜡臭椿林和皂角臭椿林表现优异且养分分布特征较为相近,这表明混交林林内结构稳固,营养元素分布均匀。SOC 和 N 在 0—60 cm 垂直方向上表现出“倒金字塔”式的表聚现象,这与康健等^[15]的研究结果相符,可能是由于较高程度的植物活体凋落物覆盖为表

层养分的保育、固持等提供了物质基础和有效屏障^[2]。根据国家土壤第二次普查养分分级标准^[16],滨海盐碱地土壤养分瘠薄,整体为中等偏下水平,因此,可通过种植旱柳林、黑杨林、白蜡臭椿林和皂角臭椿林保育表土肥力,增加优质养分含量,改善盐碱地土壤贫瘠现象。

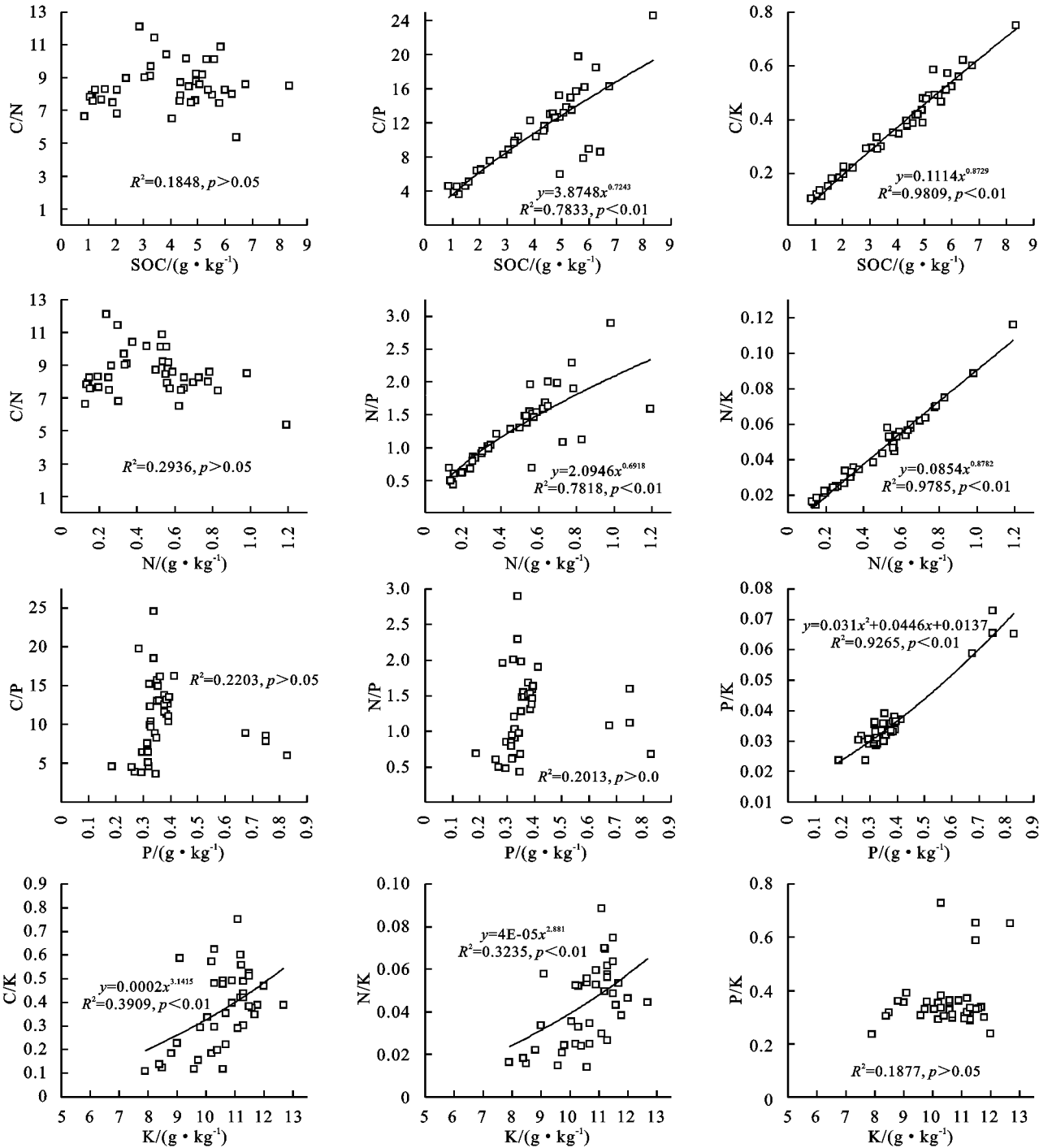


图 4 0—60 cm 平均生态化学计量比分别与 SOC,N,P,K 含量之间的回归关系

在土壤生态化学计量中,C/N 可以反映植物养分利用效率、评价土壤 N 的有效性以及反映有机质的矿化速度,对生态系统中碳氮循环起着决定性作用。C/P 是判断土壤 P 矿化能力以及评价土壤 P 有

效性的重要指标^[17]。N/P 可表征养分对生产力的限制性作用,常用于判断 N 饱和以及确定养分限制阈值^[3,5]。生产中常使用 C/N,C/P 和 N/P 作为评价林地养分释放利用能力的有效指标。

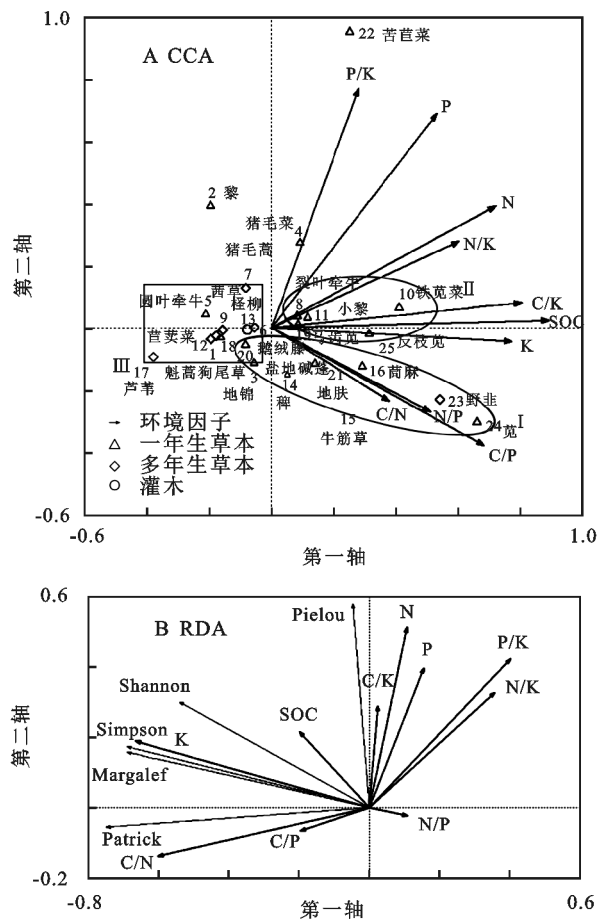


图 5 土壤生态化学计量特征与物种多样性 CCA 和 RDA 排序

本研究表明造林后盐碱地土壤生态化学计量特征发生了一系列改变,相较于对照裸地,各林地 0—60 cm 土层内土壤 C/N 由逐渐降低演变为先升高后降低的变化特征,在 20—40 cm 土层获得最大值。这可能是由于 C 和 N 在积累和消耗过程中的不同步行为,即中下层土壤中 N 的消耗速率要高于 C,导致 C/N 呈现先升高后降低趋势,这也侧面验证了中下层土壤中 N 的有效性较低的结论。而林地会受到 N 养分的限制是因为微生物为了自身的繁殖会在分解凋落物过程中保留从分解基质中获得的 N,此外也从土壤中直接吸收无机 N 加以补充,而 N 从有机物转化到生物可利用状态的过程落后于植物凋落物的分解过程^[18]。各林地 C/N 介于 7.45~10.42(8.63),略低于全国平均水平(11.2)^[3],林地土壤有机层的 C/N 较低表明有机质具有较快的矿化速率。C/P, N/P, N/K 由先降低后升高的分布特征演变为逐渐降低的分布规律, C/K, P/K 无明显变化,造林前后均呈逐渐降低趋势。说明随着土层深度的降低,土壤 P 的有效性正逐渐下降。各林地平均 N/P 介于 0.62~2.29(1.32),远低于全国平均水平(5.20)^[3],而 N 和 P 平均含量为 0.66, 0.40 g/kg, 也均处于较低水平,在 N 没有饱和而 P 和 N/P 处于相对较低的水平时,当地林木生长过程中会受到 N, P 养

分的限制。此外,混交林的 C/P, N/P 整体上高于纯林且变化幅度较小,这表明相较于混交林,纯林更易受到土壤 N, P 养分的限制。

4 结论

滨海盐碱地林地养分含量普遍偏低,纯林中旱柳林、黑杨林和混交林中白蜡臭椿林、皂角臭椿林,蓄肥保墒效果优越,土壤营养元素储备充足,可增加优质养分含量,改善盐碱地土壤贫瘠现象。

各林地 0—60 cm 土层内土壤 C/N 呈先升高后降低的变化特征, C/P, N/P, N/K, C/K, P/K 均呈逐渐降低趋势,与造林前各有差异,造林可以改变土壤养分在不同土层的吸收利用及分布规律,且 N 和 P 对滨海盐碱地存在不同程度的限制,纯林更易受到土壤 N, P 养分的限制。

各林地土壤养分彼此间具有极显著非线性耦合关系, SOC, N 彼此间相互促进,有序增长, SOC, N 与 P 相互影响, SOC, N, P 与 K 相互影响。同时土壤生态化学计量特征又影响盐碱地灌草植物的分布与多样性变化, K 和 C/N 与物种多样性指数关系最为密切,耐盐碱植物的分布与土壤 P 有效性紧密相关,一年生草本植物喜肥沃土壤,多年生草本植物更易在低养分土壤聚集。

参考文献:

- [1] 任璐璐,张炳学,韩凤朋,等.黄土高原不同年限刺槐土壤化学计量特征分析[J].水土保持学报,2017,31(2): 339-344.
- [2] 姜超,陈志彪,陈志强,等.红壤侵蚀区崩岗土壤养分化学计量特征分异规律[J].水土保持学报,2016,30(6): 193-200.
- [3] 淑敏,姜涛,王东丽,等.科尔沁沙地不同林龄樟子松人工林土壤生态化学计量特征[J].干旱区研究,2018,35(4):789-795.
- [4] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils; a synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry, 2010, 98(S1/3):139-151.
- [5] 李梦天,秦燕燕,曹建军,等.青藏高原草地管理方式对土壤化学计量特征的影响[J].生态学杂志,2018,37(8): 2262-2268.
- [6] 杨祥祥,李梦琦,何兴东,等.沙地土壤 C : N : P 比对早期植物群落物种多样性的影响[J].土壤学报,2019,56(1):242-249.
- [7] 宁志英,李玉霖,杨红玲,等.沙化草地土壤碳氮磷化学计量特征及其对植被生产力与多样性的影响[J].生态学报,2019,39(10):3537-3546.

(6):16-19.

[27] Fu B J, Wang J, Chen L D, et al. The effects of land use on soil moisture variation in the Danangou catchment of the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2003, 54(1/2):197-213.

[28] Hawley M E, Jackson T J, McCuen R H. Surface soil moisture variation on small agricultural watersheds [J]. Journal of Hydrology, 1983,62(1/4):179-200.

[29] Zhu Y J, Shao M A. Variability and pattern of surface moisture on a small-scale hillslope in Liudaogou catchment on the northern Loess Plateau of China [J]. Geoderma, 2008,147(3/4):185-191.

[30] 徐学选,刘文兆,高鹏,等.黄土丘陵区土壤水分空间分布差异性探讨[J].生态环境学报,2003,12(1):52-55.

[31] 莫保儒,王子婷,蔡国军,等.半干旱黄土区成熟柠条林地剖面土壤水分环境及影响因子研究[J].干旱区地理,2014,37(6):1207-1215.

[32] 张继光,陈洪松,苏以荣,等.喀斯特山区坡面土壤水分变异特征及其与环境因子的关系[J].农业工程学报,2010,26(9):87-93.

[33] 付国珍,摆万奇,姚丽娜.拉萨河流域耕地不同尺度土壤水分影响因子[J].应用生态学报,2015,26(7):2115-2122.

[34] 郭欣欣,付强,卢贺.东北黑土区农林混合利用坡面土壤水分空间异质性及主控因素[J].农业工程学报,2018,34(19):123-130.

[35] 姚雪玲,傅伯杰,吕一河.黄土丘陵区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因子[J].生态学报,2012,32(16):4961-4968.

[36] 黄奕龙,陈利顶,傅伯杰,等.黄土丘陵小流域地形和土地利用对土壤水分时空格局的影响[J].第四纪研究,2003,23(3):334-342.

[37] 许德生.不同带间距柠条林根系和土壤水分特征及其植物多样性的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2009.

[38] 邵明安,贾小旭,王云强,等.黄土高原土壤干层研究进展与展望[J].地球科学进展,2016,31(1):14-22.

(上接第 45 页)

[8] 罗琰,苏德荣,纪宝明,等.辉河湿地不同草甸植被群落特征及其与土壤因子的关系[J].草业学报,2018,27(3):33-43.

[9] 孙千惠,吴霞,王媚臻,等.林分密度对马尾松林林下物种多样性和土壤理化性质的影响[J].应用生态学报,2018,29(3):732-738.

[10] 王合云,李红丽,董智,等.滨海盐碱地不同造林树种林地土壤盐碱化特征[J].土壤学报,2015,52(3):706-712.

[11] 夏江宝,陈印平,王贵霞,等.黄河三角洲盐碱地不同造林模式下的土壤碳氮分布特征[J].生态学报,2015,35(14):4633-4641.

[12] 王倩姿,王玉,孙志梅,等.腐植酸类物质的施用对盐碱地的改良效果[J].应用生态学报,2019,3(15):1-13.

[13] Wang W Q, Tong C, Jia R X, et al. Ecological stoichiometry characteristics of wetland soil carbon, nitrogen and phosphorus in different water-flooded frequency [J]. Journal of Soil & Water Conservation, 2010, 24(3): 238-242.

[14] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2013.

[15] 康健,孟宪法,许妍妍,等.不同植被类型对滨海盐碱土壤有机碳库的影响[J].土壤,2012,44(2):260-266.

[16] 董悦,张永清,刘彩彩.晋中市土壤养分空间分布与影响因子的相关性[J].生态学报,2018,38(23):8621-8629.

[17] 曾全超,李鑫,董扬红,等.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[J].自然资源学报,2015,30(5):870-879.

[18] 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,2005,29(6):1007-1019.

(上接第 51 页)

[17] 谈正鑫,万福绪,张涛.盱眙人工林枯落物及土壤水文效应研究[J].水土保持研究,2015,22(4):184-188.

[18] 剪文灏,李淑春,陈波,等.冀北山区 3 种典型森林类型枯落物水文效应研究[J].水土保持研究,2011,18(5):144-147.

[19] 刘凯,贺康宁,王先棒,等.青海高寒区不同密度白桦林枯落物水文效应[J].北京林业大学学报,2018,40(1):89-97.

[20] 石媛,鲁绍伟,陈波,等.河北雾灵山不同密度油松人工林枯落物及土壤水文效应[J].水土保持学报,2014,28(3):92-97.

[21] 周巧稚,毕华兴,孔凌霄,等.晋西黄土区不同密度刺槐林枯落物层水文生态功能研究[J].水土保持学报,2018,32(4):115-121.

[22] 赵阳,余新晓,吴海龙,等.华北土石山区典型森林枯落物层和土壤层水文效应[J].水土保持学报,2011,25(6):148-152.

[23] 吴迪,辛学兵,赵明扬,等.北京九龙山不同林分枯落物及土壤水文效应[J].林业科学研究,2014,27(3):417-422.