

王浩伊, 俞潇, 辛智鸣, 等. 荒漠草原典型灌木群落土壤养分多年变化与驱动因子[J]. 中国沙漠, 2026, 46(4): 250–265.

荒漠草原典型灌木群落土壤养分 多年变化与驱动因子

王浩伊, 俞 潇, 辛智鸣, 马 媛, 罗凤敏, 李 星, 崔 健, 卢嘉华

(中国林业科学研究院 沙漠林业实验中心/内蒙古磴口荒漠生态系统定位观测研究站/乌兰布和荒漠绿洲内蒙古自治区野外科学观测研究站, 内蒙古 磴口 015200)

摘要: 阐明荒漠灌丛土壤养分的长期演变规律及其驱动机制, 对理解灌丛生态系统稳定性及生态恢复至关重要。本研究以库布齐沙漠3种典型灌丛驼绒藜、四合木、霸王为对象, 基于长期野外调查与室内测定数据, 分析了表层土壤养分C、N、P、K及其化学计量比的长期变化特征, 同步解析了气候与植被因子的变化趋势, 并采用随机森林模型与冗余分析量化了环境因子对土壤养分变异的相对贡献。结果表明: 2006—2021年, 3种灌丛土壤有机碳均显著增加, 但变化模式存在种间差异; 全氮变化各异, 全磷在驼绒藜和四合木中总体下降, 霸王先降后升; C:N、C:P、N:P比值总体升高。随机森林模型与RDA分析显示, 环境因子对土壤养分变异的解释力存在种间差异: 驼绒藜灌丛主要受气候因子中风速、降水量和植被因子中冠幅、高度共同影响; 霸王灌丛对气候因子敏感, 同时受物种丰富度显著影响; 四合木灌丛模型解释力相对较低, 降水量与风速贡献突出。3种灌丛土壤养分动态及其对环境因子的响应表现出明显的种间特异性。本研究为荒漠灌丛生态系统的恢复与管理提供了基于长期定位观测的数据支撑。

关键词: 荒漠灌丛; 土壤养分; 环境因子; 长期变化; 随机森林模型

文章编号: 1000-694X(2026)04-250-16

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2026.00070

中图分类号: S153

文献标志码: A

0 引言

荒漠草原地处荒漠与草原过渡地带, 是对气候变化响应极为敏感的脆弱生态系统^[1-2]。库布齐沙漠位于内蒙古鄂尔多斯高原北部, 分布典型的温带荒漠草原。近几十年气象观测显示, 该区域年均气温呈显著上升趋势, 降水量总体呈波动增加但年际变幅巨大, 呈现复杂的暖湿化特征^[3-4]。理解这一背景下生态系统的响应机制, 对于预测区域生态演变趋势具有重要科学意义。在资源贫瘠的荒漠草原环境中, 灌丛作为“生态系统工程师”, 通过冠层风沙拦截、凋落物分解及根系活动, 在冠层下形成养分、水分和微生物活性显著高于周围裸地的“沃岛效应”^[5-6]。这些“沃岛”是荒漠草原生物地球化学过程最活跃的热点区域, 其土壤养分变化直接反映生态系统功能的健全程度。因此, 揭示灌丛土壤养分的长期演变规律, 是理解荒漠草原生态系统对气候

变化响应的关键。

气候因子通过调控灌丛生长和土壤生物地球化学过程, 深刻影响灌丛土壤养分变化。温度升高在一定范围内会加速土壤有机质的矿化速率, 改变养分的有效供给^[7]; 降水增加理论上能够缓解水分胁迫, 促进灌丛生长和凋落物输入, 进而提升土壤养分库^[8]。这些气候因子通过耦合效应共同影响灌丛生态系统的养分动态^[9]。灌丛的高度、冠幅、密度直接影响其对风蚀物质的截获效率和凋落物的输入量, 进而决定养分富集的程度^[10]。物种丰富度的增加则通过多样化的凋落物输入和根系分泌物, 促进土壤微生物群落发展, 加速养分循环过程^[11]。更关键的是, 不同灌丛物种因其迥异的形态结构和生理生态策略, 在养分调控上表现出显著分异^[12]。刘源等^[13]研究库布齐东段典型人工固沙林土壤水分时空变化特征, 发现因植被生长特性差异, 土壤含

收稿日期: 2026-02-02; 改回日期: 2026-05-08

资助项目: 国家重点研发计划项目(2023YFE0121800); 内蒙古自治区科技计划项目(2025YFHH0262)

作者简介: 王浩伊(1997—), 男, 内蒙古鄂尔多斯人, 助理工程师, 主要研究方向为植物土壤生理生态。E-mail: why@caf.ac.cn

通信作者: 辛智鸣(E-mail: xinzhiming@caf.ac.cn)

水量表现不同;刘江等^[14]研究库布齐沙漠北缘不同人工灌木林地土壤肥力质量状况,发现不同人工灌木林对土壤理化特性的改善存在差异。

然而,针对库布齐沙漠典型天然灌丛长期演变中不同形态的灌丛如何差异化驱动土壤养分动态的研究较少。基于此,本文以库布齐沙漠驼绒藜、四合木、霸王3种灌丛为对象,根据野外调查与室内测定数据,系统揭示3种灌丛表层土壤养分含量及化学计量比的时间变化特征,解析气候与植被因子的长期变化趋势,并采用随机森林模型与冗余分析量化各环境因子对土壤养分变异的相对贡献率。通过阐明气候-植被-土壤系统的互作机制及不同灌丛的养分调控特异性,本研究期望为荒漠灌丛生态系统的恢复提供数据支持和理论支撑。

1 材料与方法

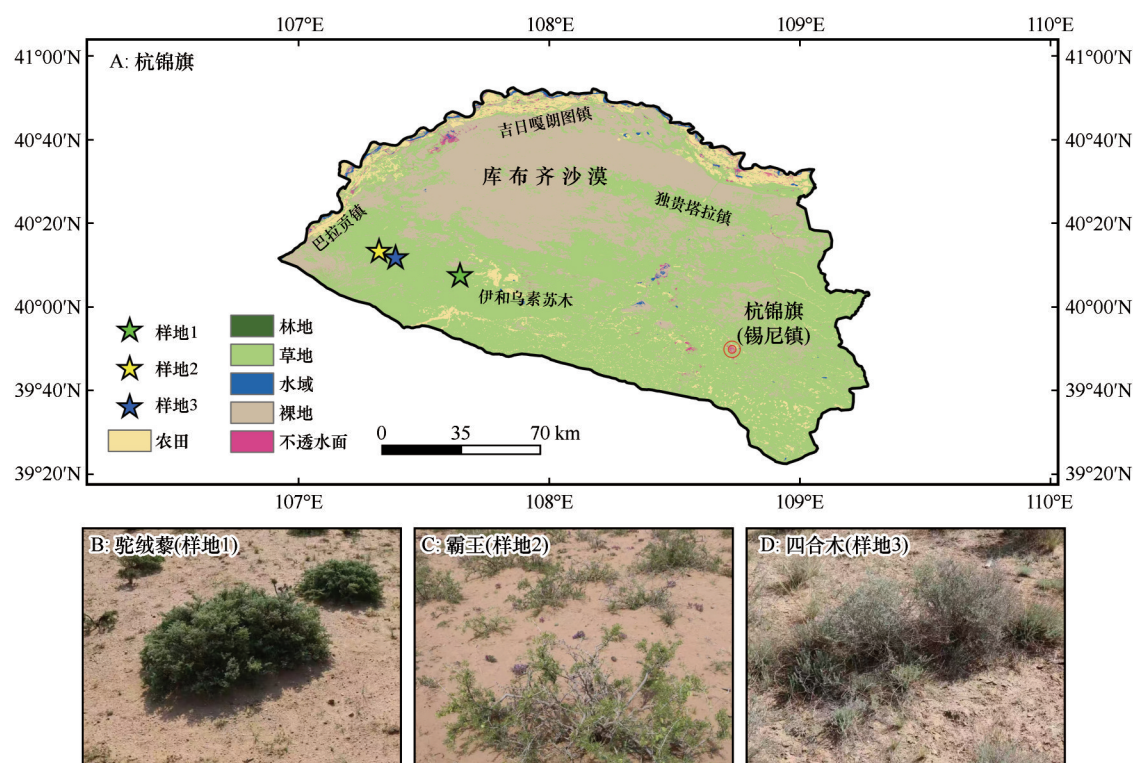
1.1 研究区概况

库布齐沙漠位于内蒙古自治区鄂尔多斯市北部,沙漠西北端以黄河为界,地势南高北低。该区属于典型温带大陆性干旱半干旱季风气候,春季风

大,四季温差显著,年平均气温6.0~7.5℃;年降水量约160~400 mm,年蒸发量2 000 mm以上;年平均风速3~4 m·s⁻¹,大风天数25~35 d;土壤类型以风沙土为主。植被呈地带性分布,东部为干旱草原类型,植物主要为多年生禾本科草本植物,伴生少部分小半灌木如油蒿(*Artemisia ordosica*)等;西部为荒漠草原植被类型,主要灌丛植被有霸王(*Sarcosygium xanthoxylon*)、驼绒藜(*Ceratoides latens*)、四合木(*Tetraena mongolica*)等,主要草本植物有无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*)、蒙古韭(*Allium mongolicum*)、黄蒿(*Artemisia sphaerocephala*)等(图1)。

1.2 样地设置与样品采集

内蒙古磴口荒漠生态系统定位观测研究站于2003年在库布齐荒漠草原设置3种典型灌丛固定样地,分别为驼绒藜、四合木、霸王灌丛群落,每种灌丛设置为3个面积为5 m×5 m样方,共计9个样方。样地设置方法依据《全国生态状况调查评估技术规范——荒漠生态系统野外观测》。土壤每5年采样一次,2006年第一次取样,由于经费原因,2011年缺失一次采样,



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号GS(2019)3333号标准地图制作,底图边界无修改

图1 研究区及研究样地地理位置

Fig.1 Geographical location of the study area and the research plots

于2006、2016、2021年8月,在每个固定样地选取1个独立、长势一致的灌丛沙堆作为研究对象(每年选取灌丛沙堆不变),在灌丛距基部20 cm处采集表层0~5 cm土壤样品,每120°扇面采集1份土样混合为1个样品,装于塑封袋中,每个样品过2 mm筛,挑出枯落物,将样品阴干,用于分析土壤养分。土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定;全氮(TN)采用凯氏定氮法测定;全磷(TP)采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法测定;全钾(TK)采用氢氧化钠熔融-火焰光度法测定;速效磷(AP)采用浸取法测定;速效钾(AK)在乙酸铵浸提后使用火焰光度法测定。所有测定均设置重复实验,相对偏差控制在5%以内。

植被调查:在每个样方中选取3组1 m×1 m的草本样方,记录所有植物种类、个体数、高度和冠幅。植物密度为样方内单位面积个体总数(株·m⁻²),文中密度总和指整个样方内所有植物个体数。

气象数据来源于伊克乌素自动气象站(站号53522,坐标40°03'N、108°12'E),该站位于研究区附近,能够代表区域气候背景。为反映气候对土壤养分的长期累积效应并降低单年极端气候的偶然性,本研究采用从2000年起至采样年每年5—10月(生长季)的平均气温、地表温度、5 cm地温、风速以及降水量。将多年平均值作为该采样时期的气候代表值:2006年气候背景取2000—2006年平均值,2016年取2000—2016年平均值,2021年取2000—2021年平均值。

1.3 数据处理与统计分析

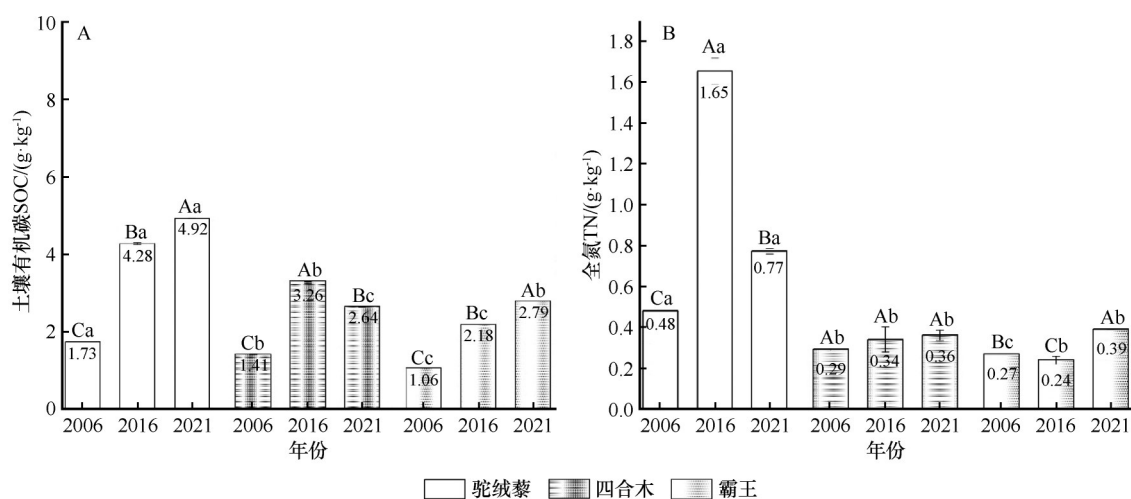
采用Excel 2019和SPSS 25.0进行数据处理与统计分析。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)比较不同年份及不同灌丛类型间土壤养分的差异,当差异显著时($P<0.05$),使用Tukey's HSD检验进行事后多重比较。采用Pearson相关分析探究土壤养分与各环境因子间的线性相关关系。为量化多因子对土壤养分的综合影响及相对重要性,采用冗余分析(RDA)。

进一步采用随机森林模型(Random Forest Regression)评估各环境因子对土壤养分指标影响的相对重要性。模型中的变量重要性以“%IncMSE”(Increase in Mean Squared Error percentage)表示。为确保模型稳健性,采用十折交叉验证(10-fold cross-validation)进行模型训练与验证,并设置决策树数量(ntree)为500,每次分裂的变量尝试数(mtry)为默认值(预测变量总数的三分之一)。RDA与随机森林模型分析均使用R软件(版本4.1.0)完成,利用Origin2021进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同灌丛土壤养分含量及化学计量比随时间变化

如图2A所示,在2006—2021年,各灌丛群落土壤SOC含量均呈显著增高。驼绒藜灌丛土壤SOC从2006年至2021年总体增长显著,2016年较2006年增长146.6%,2021年较2016年仍有增长,增幅为



注:不同小写字母表示同一年份不同灌丛间差异显著($P<0.05$);不同大写字母表示同一灌丛类型在不同年份间差异显著($P<0.05$, Tukey's HSD检验)。误差棒表示标准差($n=3$)

图2 3种灌丛土壤SOC与TN含量随时间的变化

Fig.2 Temporal variations of soil organic carbon and total nitrogen contents under three shrub species

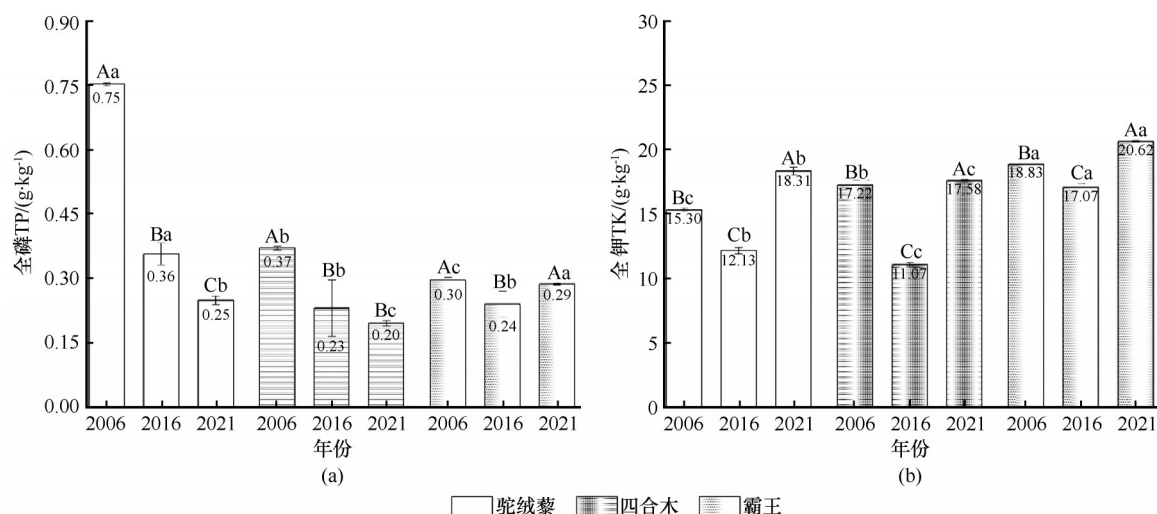
15.1%; 四合木灌丛土壤SOC 2016年较2006年增长130.6%, 但2021年较2016年下降19.0%, 总体仍高于2006年水平; 霸王灌丛土壤SOC 2016年较2006年增长106.2%, 2021年较2016年增长28.0%。

在2006—2021年, 各灌丛群落土壤TN含量变化不一: 驼绒藜群落土壤TN表现为先增高后降低的趋势, 四合木群落土壤TN随年份变化无显著变化, 霸王群落土壤TN则随年份变化表现先降低后上升的趋势。驼绒藜灌丛土壤TN 2016年较2006年增长243.5%, 但2021年较2016年下降53.2%; 四合木灌丛土壤TN 2016年较2006年增长15.9%, 2021年较2016年增长6.7%; 霸王灌丛土壤TN 2016

年较2006年下降11.1%, 2021年较2016年增长63.4%(图2B)。

如图3A所示, 2006—2021年, 各灌丛群落土壤TP含量总体随年份的增加而降低。其中驼绒藜灌丛群落表现最明显, 呈持续下降趋势, 这与四合木灌丛群落表现较相似, 而霸王灌丛群落表现与二者不同, 差异在2016—2021年表现为增高趋势。

2006—2021年, 3种灌丛群落土壤TK含量随年份的增加表现整体一致, 均呈先减小后增加趋势。各灌丛群落在2016年降幅分别为20.7%、35.7%、9.36%, 2021年各灌丛群落涨幅分别为50.9%、58.9%、20.8%(图3B)。



注: 不同小写字母表示同一年份不同灌丛间差异显著 ($P < 0.05$); 不同大写字母表示同一灌丛类型在不同年份间差异显著 ($P < 0.05$, Tukey's HSD 检验)。误差棒表示标准差 ($n=3$)

图3 3种灌丛土壤TP与TK含量随时间的变化

Fig.3 Temporal variations of soil total phosphorus and total potassium contents under three shrub species

如图4A所示, 在2006—2021年, 3种灌丛群落土壤AP含量总体随年份呈增加趋势。3种灌丛AP含量均在2016年涨幅最大, 较2006年分别上涨约365%、95%、308%; 至2021年, 四合木与霸王群落无显著变化, 驼绒藜群落AP含量较2016年大幅下降71.4%, 但仍高于2006年水平。

在2006—2021年, 3种灌丛群落土壤AK含量整体随年份的增加呈上升趋势。各灌丛群落土壤AK含量在2016年涨幅最大, 较2006年分别上涨173.1%、134.4%、109.4%; 至2021年, 四合木群落土壤AK持续上涨, 而驼绒藜与霸王群落土壤则呈显著降低(图4B)。

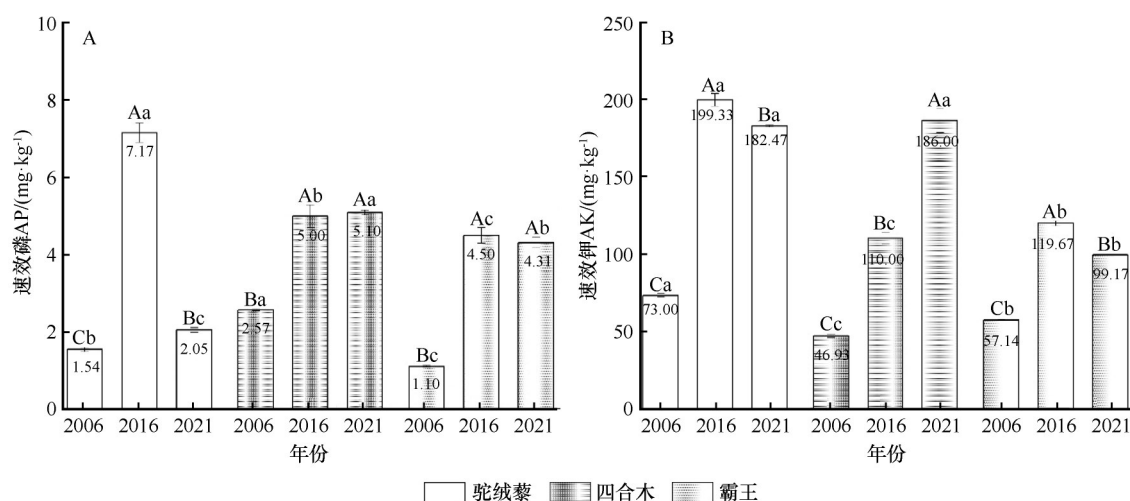
如图5A、B、C所示, 在2006—2021年, 各灌丛群落土壤C:N整体随年份增加均显著升高。3种灌丛土壤C:P随年份增加而增加, 各灌丛土壤C:P在

2016年增幅最大; 各灌丛土壤N:P随年份的增加而增加, 3种灌丛土壤N:P在不同年份间增幅表现各有差异。

由图5D、E、F可知, 3种灌丛土壤C:K随年份的增加而增加, 3种灌丛土壤N:K总体增加, 驼绒藜与四合木灌丛土壤N:K在2016年增幅最大, 2021年则显著下降, 降幅分别为69.0%、32.9%; 驼绒藜与四合木灌丛土壤P:K随年份增加而减少, 2021年则显著下降, 降幅分别为53.9%、46.6%。

2.2 气候因子变化

由图6可知, 2000—2022年5 cm地温呈波动上升趋势, 地表温度与5 cm地温变化趋势高度一致, 呈波动上升态势。2000—2022年降水量在41.1 mm



注:不同小写字母表示同一年份不同灌丛间差异显著($P<0.05$);不同大写字母表示同一灌丛类型在不同年份间差异显著($P<0.05$, Tukey's HSD 检验)。误差棒表示标准差($n=3$)

图4 3种灌丛土壤AP与AK含量随时间的变化

Fig.4 Temporal variations of soil available phosphorus and available potassium contents under three shrub species

至306.4 mm波动,2005年降水最少,2018年降水最多。风速在2000—2022年呈波动变化且后期升高。气温整体在18~19.5℃波动,2000—2022年平均气温波动较小。

2.3 植被特征变化

由表1可知,2006—2021年,3种群落的物种多样性整体呈增长趋势,但各群落的变化趋势有所不同:骆驼藜与霸王群落的物种丰富度呈持续增长趋势,四合木群落的物种丰富度整体保持相对稳定。

3种灌丛的平均高度与冠幅在不同年份间表现出波动特征:骆驼藜灌丛的平均高度与冠幅呈先升后降趋势;四合木灌丛的平均高度与冠幅呈持续减小趋势。

3种灌丛的总密度在不同年份间差异显著:骆驼藜灌丛的总密度呈持续快速增长趋势;霸王灌丛的总密度因异常高值导致平均值较高主要因其中的沙米(3 000株)和雾冰藜(6 000株)数量极高,呈先降后升趋势;四合木灌丛的总密度先下降后上升,主要因其中的黄蒿(2 000株)和条叶车前数量极高。

3种灌丛伴生种密度在不同年份间呈不同趋势。物种丰富度方面,霸王灌丛增幅最大,从7~8种增至14~16种;四合木灌丛始终维持较高水平(10~11种);骆驼藜灌丛稳中有升(5~10种)。个体密度方面,骆驼藜灌丛持续增长,由14~48株·样方⁻¹升至57~332株·样方⁻¹;霸王灌丛波动剧烈,2006年因沙

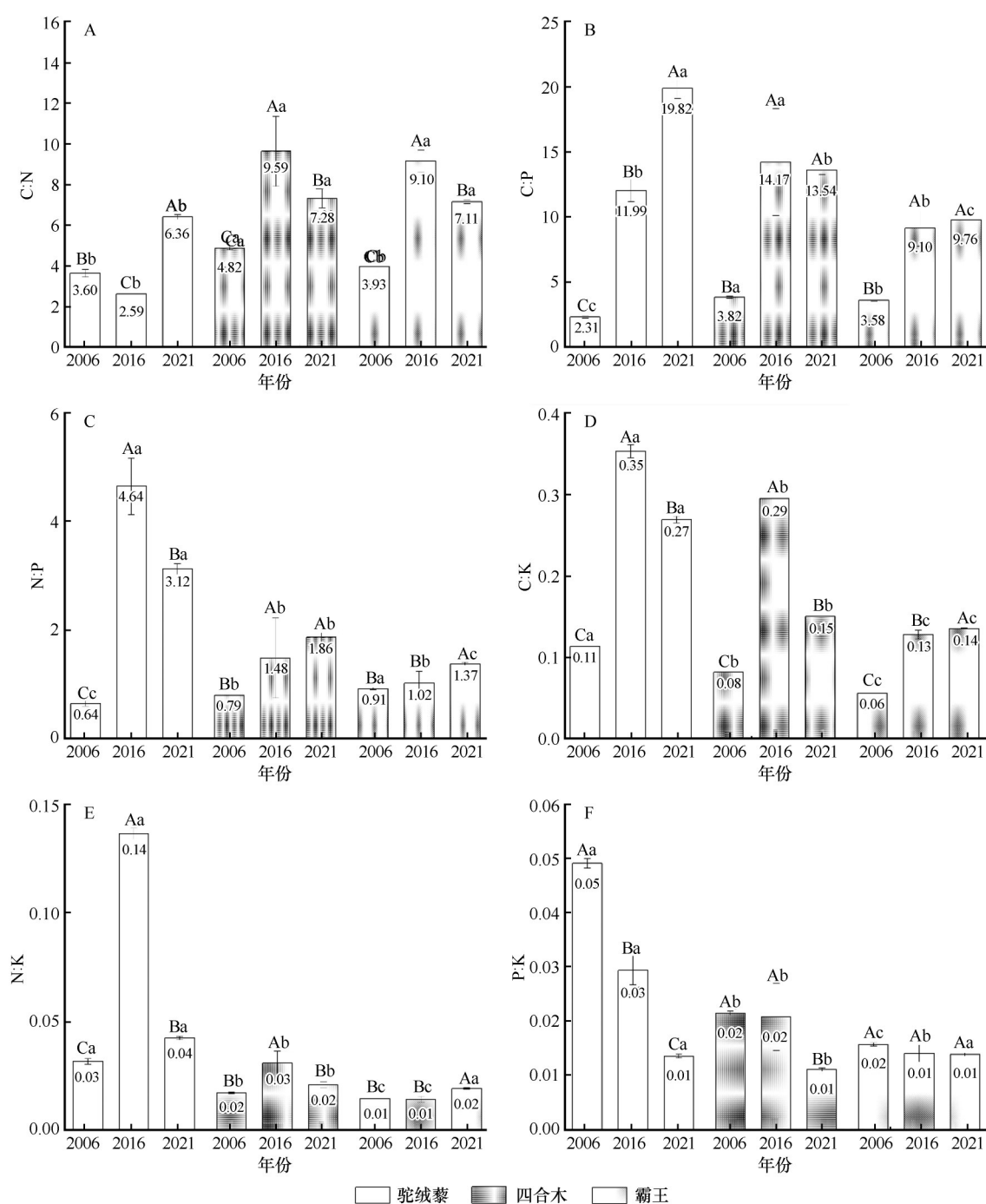
米和雾冰藜爆发出极高密度(9 045株·样方⁻¹),2016年骤降后2021年回升;四合木灌丛呈“U”型变化,2021年个别样方中黄蒿和条叶车前密度显著增加(图7)。

2.4 土壤养分含量及化学计量比环境因子影响

为探究环境因子与土壤养分间的线性关联,对3种灌丛的土壤指标与气候及植被因子进行了Pearson相关性分析(图8)。结果表明,3种灌丛的环境-养分相关模式存在显著差异,反映了物种特异性调控机制。

气候因子中,降水量与SOC、AK在3种灌丛中均呈显著或极显著正相关,表明水分有效性增加对养分积累具有普遍促进作用;温度因子整体与多数养分指标呈负相关,其中气温与骆驼藜TN呈极显著负相关,地表温度与四合木SOC、AP及霸王AK、C:N均呈极显著负相关,反映出增温可能加速有机质分解和氮素矿化流失的共同趋势。风速与土壤养分则呈现异向性,风速与3种灌丛SOC均呈显著或极显著正相关,且与骆驼藜AK、四合木和霸王AP及C:P也呈正相关,表明风积作用对SOC和部分速效养分的补充效应在3种灌丛中普遍存在;风速与TP呈负相关,其中骆驼藜和四合木达极显著水平,霸王该负相关不显著,显示风蚀对TP的潜在损失效应在灌丛类型间存在差异。

植被因子中,骆驼藜灌丛冠幅与AP、TN、N:K呈显著正相关,株高与AP、N:K也呈正相关。这表



注：不同小写字母表示同一年份不同灌丛间差异显著 ($P<0.05$)；不同大写字母表示同一灌丛类型在不同年份间差异显著 ($P<0.05$, Tukey's HSD 检验)。误差棒表示标准差 ($n=3$)

图 5 3 种灌丛土壤化学计量比随时间的变化

Fig.5 Temporal variations of soil stoichiometric ratios under three shrub species

明植被结构越发达,土壤 AP 和 TN 含量越高。可能原因是冠层物理截获或植被通过凋落物归还和根系分泌作用,增加了土壤有机质和养分输入,同时改善了微环境,促进养分循环。四合木灌丛株高与冠幅极显著正相关 ($p<0.001$),但它们与土壤养分指标的相关性较弱,未达显著水平或为负值。四合木

灌丛的土壤养分变异可能主要受气候因子驱动,植被结构的直接影响有限。霸王灌丛则突出表现为物种数与 SOC、TN、N:P、N:K 显著正相关,同时株高与 TK、TP、TN 显著负相关,反映出物种多样性的增加对养分积累和计量比优化具有正向调控作用,而高大植株对养分的吸收固持效应则导致部分全

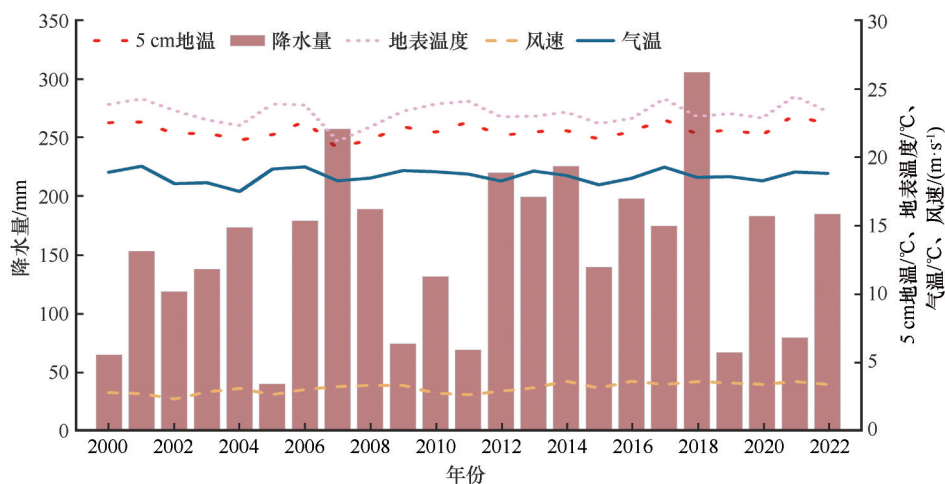


图6 5 cm 平均地温、降水量、地表温度、风速、平均气温的变化趋势

Fig.6 Change trends of the average ground temperature at 5 cm depth, precipitation, surface temperature, wind speed, and average air temperature

量养分指标下降。

根据上述相关分析结果与灌丛形态特征对照,以驼绒藜为代表的稀疏型灌丛分枝开散、冠层疏松,养分富集依赖凋落物归还或冠层物理截获,对冠层高度敏感,若密度过度增长导致冠层收缩,可能削弱灌丛土壤养分;密集型灌丛四合木多分枝垫状丛生、生长缓慢,植被自身调控能力弱,养分变化主要由降水和风速等外部因子驱动,在冠幅持续衰退期仍可依靠风积补充部分有机质和速效养分,但整体养分维持能力受制于外部环境,需外源干预弥补植被反馈的不足;主干型灌丛霸王具明显主干、冠幅宽阔且结构稳定,物种丰富度的持续增长通过多样化的凋落物和根系活动激活养分循环,是3种灌丛中唯一呈现生物多样性正向驱动特征的类型,其稳定冠层对风蚀磷素损失具有缓冲作用,使风积的增益效应更为突出。依据其分析总结分类,可将形态相似的荒漠灌丛纳入对应模式进行管理参照。

为克服多重共线性问题,本研究采用主成分分析对8个环境因子进行降维处理,提取前两个主成分(PC1和PC2)作为新的解释变量。PCA降维结果显示,驼绒藜灌丛前两个主成分累计解释方差达89.7%,其中PC1解释56.7%,主要反映气候因子的权衡:降水量(载荷+0.939)和风速(+0.846)与5 cm地温(-0.968)、气温(-0.949)沿相反方向变化;PC2解释33.0%,表现为植被结构的负向梯度,密度(-0.980)和物种数(-0.857)载荷较高。四合木灌丛PC1和PC2累计解释73.2%的方差。PC1(56.4%)表现为水热条件与植被特征的复合梯度,降水量

(+0.956)和风速(+0.903)与5 cm地温(-0.901)、气温(-0.869)、株高(-0.730)和冠幅(-0.730)呈相反变化,表明气候因子与灌丛形态结构紧密关联;PC2(16.8%)解释量较低。霸王灌丛前两个主成分累计解释79.9%的变异。PC1(53.6%)同样为气候因子的权衡,降水量(+0.978)和风速(+0.923)与5 cm地温(-0.922)、气温(-0.889)方向相反;PC2(26.3%)则反映植被结构的梯度,其中株高(-0.888)和物种数(+0.786)为主要贡献变量。3种灌丛的PC1均以气候因子为主导,而PC2的植被指示变量存在类型间差异。

以PCA提取的PC1和PC2作为解释变量,以土壤养分指标(SOC、TN、TP、AP、AK、pH、C:N、C:P、N:P)作为响应变量,分别对3种灌丛类型进行冗余分析(RDA)。模型显著性检验结果汇总于表2。

由表2可知,3种灌丛类型的RDA模型均达到极显著水平。其中,驼绒藜和霸王灌丛的调整 R^2 较高,表明PC1和PC2所代表的环境梯度能够较好地解释其土壤养分变异。四合木灌丛模型解释力相对较弱。

综合来看,驼绒藜灌丛中,TN、AP、AK等养分含量较高的环境,倾向于对应降水量较多、风速较大、温度较低的气候条件,并与C:N呈相反趋势。四合木灌丛土壤养分变异主要沿RDA1轴展开,表现为TP与其他多数养分指标(AP、AK、SOC等)的对立分布模式。结合模型较低的调整 R^2 ,表明PC1和PC2所代表的环境梯度仅能解释部分养分变异,可能还有其他未测量的关键因子在起作用,如土壤

表 1 3 种灌丛植被特征调查汇总

Table 1 Summary of vegetation characteristics investigated for the three shrub species

	灌丛 类型	样地 编号	灌丛与草本 植物种类	灌丛平均 高度/cm	灌丛平均 冠幅/cm ²	灌丛和草本所有 物种密度总和
2006	驼绒藜	1-1	4	32	41×40	16
		1-2	4	22	38×32	22
		1-3	6	32	40×37	48
	霸王	2-1	8	66	156.5×143.5	9 045
		2-2	6	73.25	126.25×112.25	59
		2-3	8	76.75	131×113	753
	四合木	3-1	11	41.67	104.33×73.33	467
		3-2	11	55	126.5×112.5	95
		3-3	10	68	132×128	136
2016	驼绒藜	1-1	6	43	63×55	44
		1-2	4	38	56×52	30
		1-3	7	46	53×42	84
	霸王	2-1	8	91	164.33×134.67	72
		2-2	10	96.25	135.5×124.75	160
		2-3	10	80.75	124.75×103.75	33
	四合木	3-1	12	55.5	120.0×117.5	126
		3-2	9	39	73.5×70	103
		3-3	9	35.38	70.25×60	226
2021	驼绒藜	1-1	6	41.67	47.67×42	57
		1-2	7	37.5	49.0×45.5	132
		1-3	9	15	38×22	332
	霸王	2-1	13	58.67	168.33×139.67	293
		2-2	17	58.75	89×75	187
		2-3	14	61.6	138.4×99.6	148
	四合木	3-1	9	43.33	110×101	2 794
		3-2	10	46	102×89	385
		3-3	10	34.9	72×67	121

质地、微生物群落结构、根系深度等。霸王灌丛中,C :N 与 TP 沿 RDA1 轴呈对立分布,TN 则沿 RDA2 轴独立变化,与 PC1 所代表的气候因子关联较弱(图9)。

随机森林模型结果显示(图 10),气候因子中,降水量和风速在 3 种灌丛中均为最重要的预测因子,但其贡献谱系因物种而异。风速是驼绒藜灌丛最重要的环境因子。风速对 AK、C :K、TP 等预测贡献较高,表明风速强烈影响这些养分的变异。降水量同样对 AK(11.17)、AP(9.61)和 N :P(9.95)具有

高重要性。植被因子中,冠幅和株高对 TN、AP 和 N :K 有中等重要性,但低于气候因子的贡献。对四合木灌丛而言,降水量是平均重要性最高的环境因子,其次为风速。降水量对 AP、SOC 和 TP 的重要性均超过 10,是驱动这些养分变化的主导因子。风速对 AP、C :P、TP 和 SOC 同样贡献突出。植被因子的%IncMSE 多为负值或接近零,表明其对四合木土壤养分的预测贡献有限。霸王灌丛的随机森林分析显示,风速是最重要的环境因子,降水量次之。风速对 C :N、C :P、SOC 的%IncMSE 均超过 11,是这

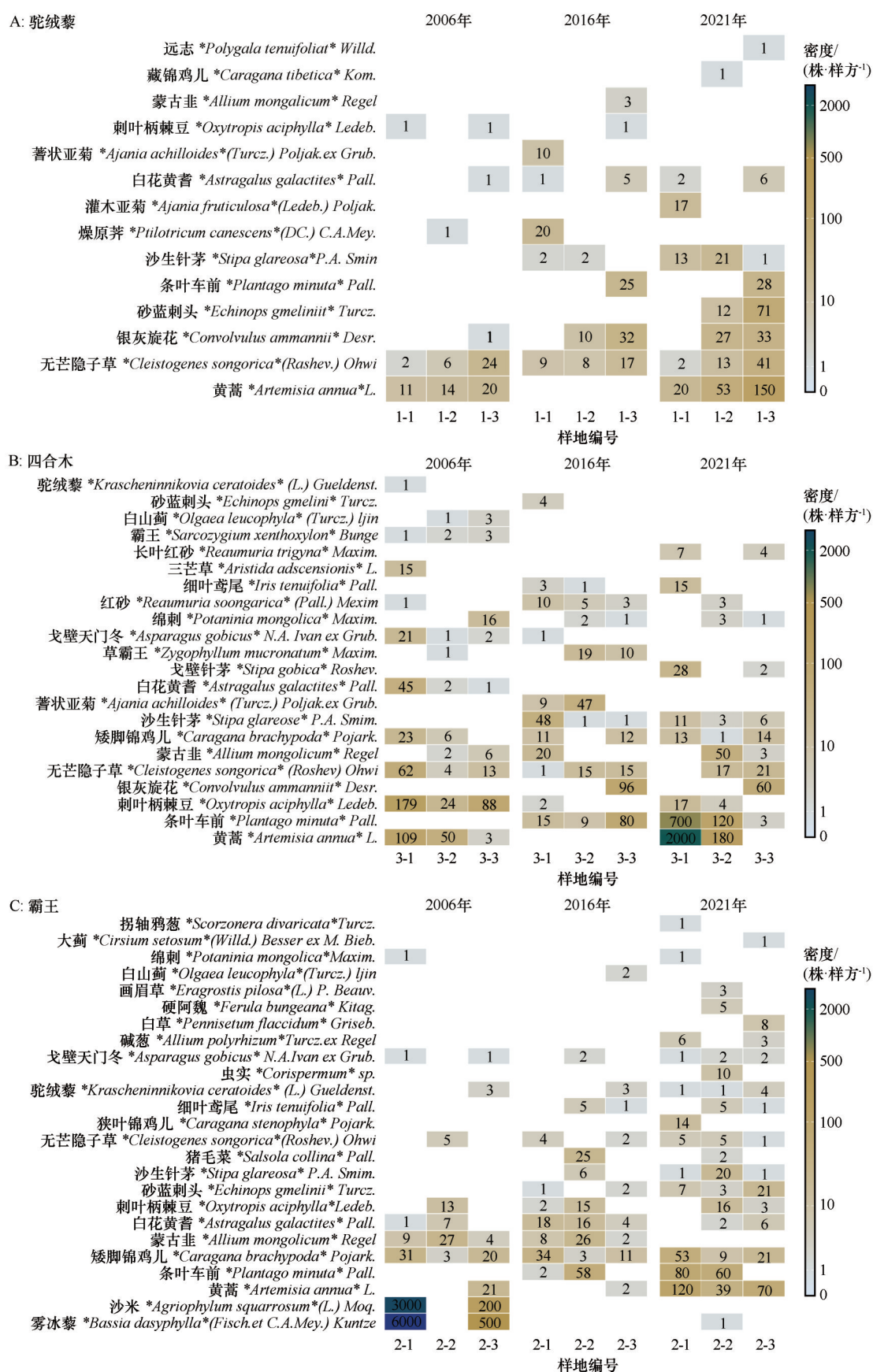
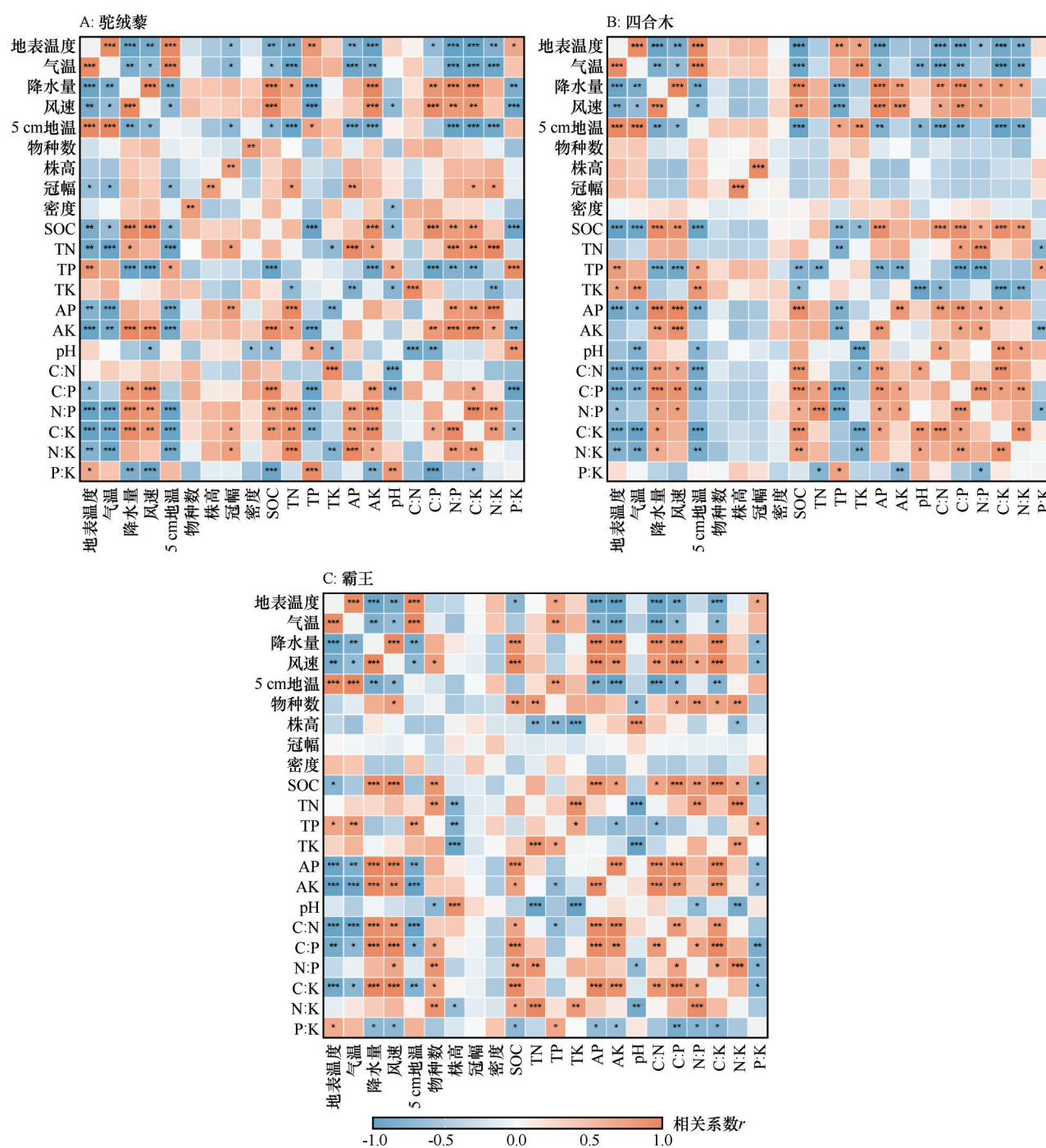


图7 3种灌丛伴生种密度热图

Fig.7 Density heatmap of associated species of Three types of shrubber



注:***表示 $P < 0.001$, **表示 $P < 0.01$, *表示 $P < 0.05$,只显示 $|r| \geq 0.3$ 的显著性星号

图8 3种灌丛土壤养分含量及化学计量比与环境因子相关性热图

Fig.8 Heatmap of correlations between soil nutrients, stoichiometric ratios, and environmental factors for three types of shrubland

些养分的首要预测因子。降水量对AP、C:K、pH具有极高重要性。温度因子对TN、TK、N:K有显著贡献,但普遍低于风速和降水。植被因子中,物种数量对TN(8.90)、N:P(11.17)、C:K(7.28)表现出较高重要性(%IncMSE>7),平均高度对TN、TP和pH也有重要贡献。

3 讨论

3.1 不同灌丛土壤养分多年变化特征

3种灌丛土壤SOC均显著增加,但表现形式不同。驼绒藜与霸王灌丛土壤SOC含量持续显著增

表2 3种灌丛类型 RDA 模型显著性检验结果

Table 2 Significance test results of RDA model for three shrubland types

灌丛类型	原始 $R^2/\%$	调整 $R^2/\%$	F 值	P 值	显著性
驼绒藜	80.7	74.2	12.51	0.001	高度显著**
四合木	67.5	56.7	6.23	0.006	高度显著**
霸王	87.0	82.7	20.14	0.003	高度显著**

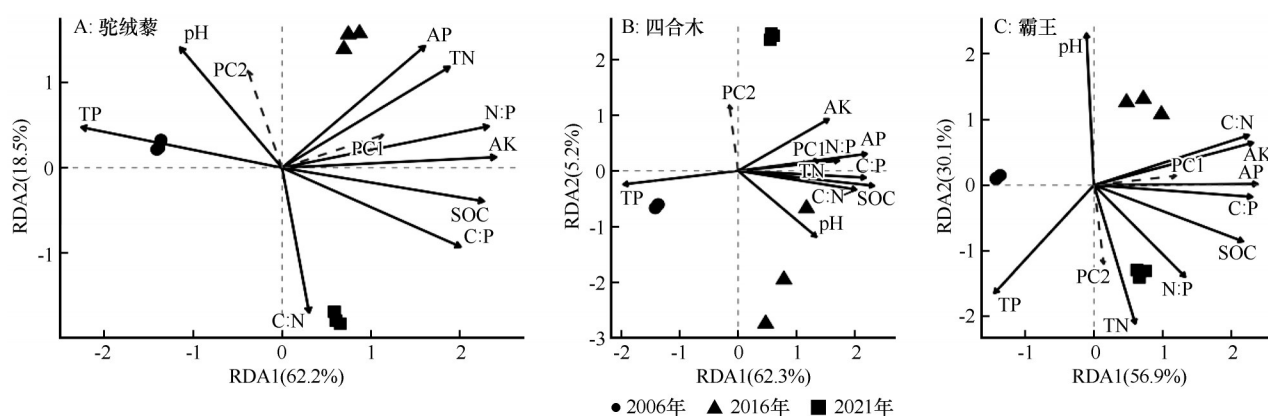


图9 3种灌丛土壤养分含量及化学计量比与环境因子RDA分析

Fig.9 Redundancy analysis (RDA) of soil nutrients, stoichiometric ratios, and environmental factors for three types of shrubland

驼绒藜 TN 在 2016 年达到峰值后于 2021 年显著下降。这一现象可能是因氮的矿化与吸收平衡被打破。2016 年后驼绒藜灌丛密度快速增长,植被对氮的吸收需求急剧增加,导致土壤氮库的净消耗^[17]。四合木 TN 的稳定缓升,是在其物种丰富度持续下降、高度和冠幅持续减小的背景下实现的。这提示其 TN 稳定可能更多依赖于微生物固持作用增强或凋落物分解效率提升,而非凋落物数量增加^[18]。霸王灌丛 TN 在 2016—2021 年回升,与其物种丰富度增加时间一致,支持物种多样性提升促进养分循环的结论^[19]。

土壤 TP 在 3 种灌丛中总体呈下降趋势。磷是一种沉积性元素,主要来源于母质风化,在缺乏外源输入的情况下,植被吸收利用是导致其含量下降的主要原因^[20]。霸王 TP 在 2016—2021 年的回升,可能与其物种丰富度显著增加有关。物种多样性的提升可能通过改善微生物群落结构或根系分泌物组成,促进了磷的活化与循环^[21-22],但同期 AP 并未同步上升,磷的周转与固定过程可能更为复杂。

土壤 AP 和 AK 在 2016 年的普遍激增,而后在 2021 年出现分化。驼绒藜 AP 在 2016 年激增,与同

长,而四合木灌丛 SOC 则呈现先增后降的波动特征。SOC 的积累通常被认为是植被恢复后地上凋落物输入增加和根系周转的共同结果^[3,15]。四合木 SOC 在 2016 年后回落,可能与其冠幅在不同样地间波动性变化、部分样地冠幅缩减导致的风蚀屏障效应减弱有关^[16]。随机森林分析显示风速对四合木 SOC 重要性较高(%IncMSE=10.82),间接支持风蚀对表层碳库的潜在影响。

期降水量增加驱动的微生物活性提升一致^[23];2021 年 AP 下降,可能与密度激增导致的磷吸收竞争加剧有关。SOC 全面上升,而 TP 大幅下降,原因可能是在库布齐沙漠荒漠草原中土壤为钙质土壤,无机磷容易与土壤矿物(如铁、铝、钙)发生强烈的吸附或沉淀反应,形成难溶性磷酸盐。SOC 的增加可能通过竞争吸附位点、形成有机-矿物复合体等方式,间接影响磷的固定过程,但其净效应通常是加剧磷的固定,降低其有效性^[24]。

土壤化学计量比的变化同样值得关注。C:N 比从 2006 年至 2021 年普遍升高,表明 SOC 积累速率超过了氮,这可能意味着氮矿化速率相对不足,或碳稳定性增强^[18]。C:P 与 N:P 比的急剧增加,预示着生态系统养分限制格局正在发生变化。C:P 的急剧增加预示着磷限制风险正在上升,这与植被恢复过程中磷的生物吸收累积和土壤磷库持续消耗密切相关^[25]。这种计量比失衡可能进一步影响土壤微生物群落结构与活性,反馈调控养分循环效率^[26]。

3.2 气候因子对不同灌丛土壤养分的影响

气候因子是驱动研究区土壤养分年际变化的

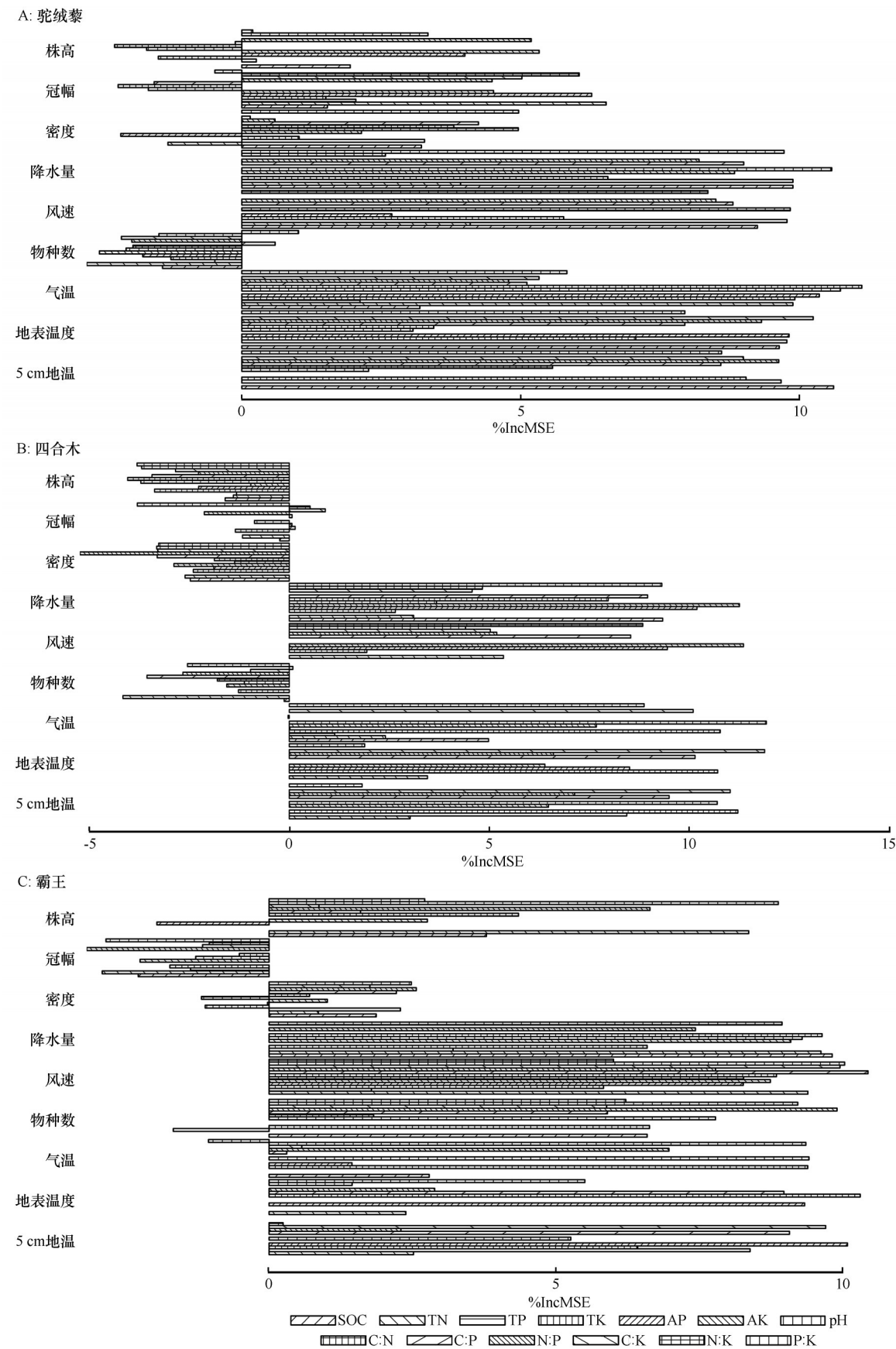


图 10 3 种灌丛随机森林模型中环境因子重要性得分(%IncMSE)

Fig.10 Importance scores (%IncMSE) of environmental factors in the random forest model for three types of shrubland

关键因素。相关性分析和随机森林模型均表明,降水量和风速是影响驼绒藜和霸王灌丛土壤养分变异的重要正向因子,而温度主要表现为负向效应。

降水量增加对 SOC、AP 和 AK 有显著促进作用。充足的降水能提高土壤水分有效性,激活微生物活性,加速有机质矿化和养分释放^[27]。降水量与 TP 的负相关关系在驼绒藜和四合木灌丛中较为显著,可能与降水引起的径流携带富磷细颗粒物质流失有关。霸王灌丛中二者无显著相关,可能因其深根系能够吸收深层磷素或冠层截留作用较强^[28]。

在 3 种灌丛中,风速与 SOC 均呈正相关,尤其在驼绒藜和四合木灌丛中重要性较高,表明风蚀-沉积过程可能是区域尺度上调控表层碳库的重要机制,富含有机质的细颗粒在灌丛冠层下沉积,形成“沃岛效应”的物质基础^[29]。

温度因子与大多数土壤养分呈显著负相关。高温加速了土壤有机质的分解,导致 SOC 和 TN 的损耗^[30-31]。李传虹等^[32]在青藏高原灌丛的研究发现,温度升高会破坏土壤碳的稳定性,导致 CO₂ 外排显著增加。驼绒藜和霸王灌丛中 TN 对温度的高敏感性,与王其兵等^[33]在草甸草原的研究结论一致,即升温会加速土壤氮素的矿化过程。Schütt 等^[7]提出低温限制微生物分解、高温促进氮素释放,这与本研究中驼绒藜 TN 在 2016 年后因地温上升导致氮素矿化流失的结果相符。

3.3 植被因子对不同灌丛土壤养分的影响

植被通过改变地上、地下生物量输入和养分竞争格局,深刻影响着土壤养分状况。株高与冠幅呈显著正相关,二者共同表征植株的地上生物量潜力^[34-35]。在荒漠生态系统中,较大的株高和冠幅通常意味着更高的凋落物产量,从而为土壤 SOC 和养分库的补充提供更多物质基础。冠幅大小直接影响灌丛“沃岛效应”的强度与范围。

驼绒藜灌丛中,冠幅和株高与 AP、TN 呈显著正相关,体现了荒漠灌丛典型的“沃岛效应”。四合木灌丛中,植被因子与土壤养分的相关性普遍较弱,随机森林模型中其重要性得分多为负值。这可能与其缓慢的生长速率和有限的生物量有关。作为孑遗物种,四合木高度年均增长较小,凋落物产量有限,对土壤养分的直接贡献较小。其土壤养分变异更多受控于降水、风速和风蚀^[18]。在霸王灌丛

中,物种丰富度 2006—2021 年持续增长,解释了其 SOC 持续增长的趋势。姚博等^[36]在呼伦贝尔沙地的研究表明,植被恢复过程中物种多样性的增加有利于土壤碳、氮的积累。值得注意的是,2006 年霸王灌丛个别样地出现极高密度(9 045 株·样方⁻¹),主要由于一年生草本(沙米、雾冰藜)大量萌发所致。这种爆发性生长可能与当年丰沛降水或种子库激活有关,虽对土壤养分的短期输入有一定贡献,但不改变养分积累的长期趋势。

植被高度、冠幅和密度的变化对土壤养分的影响因物种而异。马媛等^[37]对乌兰布和沙漠不同固沙灌木群落的研究显示,驼绒藜群落土壤养分对自身结构变化响应敏感,表层碳氮含量与冠幅显著相关。霸王灌丛稳定的冠幅和密度通过截留降水、积累凋落物形成稳定微环境,促进养分持续积累^[38]。四合木高度和冠幅持续减小,物种丰富度保持稳定,其土壤养分积累缓慢,这与杜忠毓等^[39]对四合木群落的研究结论相符,该研究指出四合木种群衰退导致群落多样性降低,进而削弱土壤养分循环效率。

3.4 气候-植被对不同灌丛土壤的协同与分异影响

RDA 分析显示,3 种灌丛的 PC1 均以降水、风速与温度的权衡为主,解释了养分变异的主体部分;而 PC2 的构成差异——驼绒藜以植被密度和物种数的负向梯度为主,霸王以高度负向、物种数正向的梯度为主,四合木 PC2 解释力仅 16.8%——定量刻画了植被因子调控作用的物种特异性。

随机森林模型分析显示,霸王灌丛中气候因子(风速、降水量、温度)和植被因子(物种数、株高)对土壤养分均有较高重要性。结合 RDA 分析中霸王灌丛调整 R² 最高,气候因子与植被因子共同调节土壤养分循环。这种协同主要与霸王深根性、稳定群落结构有关,深根系使其对气候波动的缓冲能力较强^[40],能够维持相对稳定的植被结构,从而持续向土壤输入有机质并调节养分循环^[41]。

驼绒藜灌丛中风速、降水、温度因子的重要性均较高,而植被因子的重要性明显偏低。结合 RDA 分析中驼绒藜 PC2 以植被密度和物种数的负向梯度为主,驼绒藜灌丛中气候与植被存在较弱的协同作用。这可能因驼绒藜灌丛在 2006—2021 年期间密度持续增长导致个体间竞争加剧,削弱了植被对

土壤养分的正向反馈^[42],使气候因子成为主导驱动因素。pH作为土壤化学性质的综合指标,其变化反映了盐基离子(Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} 等)的迁移和累积过程。在干旱区,温度升高和风速加大引发的强烈蒸发,会导致地下水或深层土壤中的盐分随毛管水上移至表层,水分蒸发后盐分积累,从而使pH升高^[42]。不同灌丛对气候-植被因子的响应存在显著差异:驼绒藜灌丛土壤养分受降水和温度影响较大,可能与其浅根性有关;四合木灌丛受物种多样性和风速影响显著,与其子遗物种特性和风蚀敏感性相关;霸王灌丛受植被因子影响最大,得益于其深根性和稳定群落结构形成的缓冲能力^[28]。

4 结论

2006—2021年,库布齐沙漠3种典型灌丛土壤养分及其化学计量特征发生了显著变化。3种灌丛土壤SOC均显著上升;TN变化各异:驼绒藜先升后降、霸王先降后升、四合木波动较小;TP在驼绒藜和四合木中总体下降,霸王先降后升;AP在驼绒藜和霸王中总体呈增加趋势但存在波动,AK在驼绒藜和四合木中总体增加,霸王无明显变化; C:N 、 C:P 、 N:P 、 C:K 、 N:K 总体上升, P:K 下降。

随机森林模型与RDA分析结果一致:驼绒藜灌丛土壤养分受气候因子中风速、降水主导,植被因子中冠幅、高度具补充作用;霸王灌丛对气候因子敏感,同时受物种多样性显著影响;四合木灌丛模型解释力较低,降水和风速贡献突出,但可能存在未测量的关键因子如土壤质地、微生物等。

以驼绒藜、四合木和霸王为代表的稀疏型、密集型和主干型3种养管理型,分别依赖冠层截获、外部风积和生物多样性正向反馈维持土壤养分,据此可将形态相似的荒漠灌丛纳入对应模式进行管理参照。3种灌丛土壤养分动态及其环境响应表现出明显的种间特异性,气候因子是共同驱动力,植被因子的贡献因灌丛类型而异。在荒漠灌丛生态系统的恢复与管理中,应充分考虑目标物种的生物学特性及其与环境因子的互作机制,采取差异化的策略,以促进土壤肥力的可持续提升和生态系统的稳定。

参考文献:

[1] 朱小华,杨倩,丁子筱,等.荒漠草原生态系统景观格局变化

及其对气候的响应[J].生态学报,2023,42(3):748-758.

[2] 慕宗杰,蒙荣,韩国栋,等.短花针茅荒漠草原不同载畜率植物群落优势种群空间分布格局的研究[J].畜牧与饲料科学,2008,29(6):17-20.

[3] 郭志霞,刘任涛,冯永宏,等.不同降水对荒漠灌丛土壤理化性质和地表植被分布的影响[J].水土保持通报,2021,41(1):56-65.

[4] 吴建国,翟盘茂.关于气候变化与荒漠化关系的新认知[J].气候变化研究进展,2020,16(1):28-36.

[5] 刘任涛.沙地灌丛的“肥岛”和“虫岛”形成过程、特征及其与生态系统演替的关系[J].生态学报,2014,33(12):3463-3469.

[6] 李新荣,张志山,王新平,等.干旱区土壤植被系统恢复的生态水文学研究进展[J].中国沙漠,2009,29(5):845-852.

[7] Schütt M, Borken W, Spott O, et al. Temperature sensitivity of C and N mineralization in temperate forest soils at low temperatures[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 69: 320-327.

[8] Zhang Y F, Wang X P, Hu R, et al. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow and interception loss by two xerophytic shrubs within a rain-fed re-vegetated desert ecosystem, north-western China [J]. Journal of Hydrology, 2015, 527: 1084-1095.

[9] Reynolds J F, Smith D M S, Lambin E F, et al. Global desertification: building a science for dryland development[J]. Science, 2007, 316(5826): 847-851.

[10] 刘学东,陈林,杨新国,等.荒漠草原2种柠条和油蒿灌丛土壤养分“肥岛”效应[J].西北林学院学报,2016,31(4):26-32.

[11] 安超平,王兴,宋乃平,等.荒漠草原中间锦鸡儿林土壤养分效应对群落组分和多样性的影响[J].西北植物学报,2016,36(9):1872-1881.

[12] 李俊文,张胜男,高海燕,等.不同植被恢复措施对沙地土壤肥力的影响[J].东北林业大学学报,2025,53(8):76-82.

[13] 刘源,段玉玺,王博,等.库布齐东段典型人工固沙林土壤水分时空变化特征[J].西北林学院学报,2021,36(1):1-8.

[14] 刘江,袁勤,张立欣,等.库布齐沙漠北缘不同人工灌木林地土壤肥力质量状况[J].西北林学院学报,2021,36(2):46-53.

[15] 郭京衡,李尝君,曾凡江,等.2种荒漠植物根系生物量分布与土壤水分、养分的关系[J].干旱区研究,2016,33(1):166-171.

[16] Leys J F, McTainsh G H. Sediment fluxes and particle grain-size characteristics of wind-eroded sediments from southeastern Australian wheat fields [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1999, 24(5): 409-423.

[17] 孙忠超,郭天斗,于露,等.荒漠草原土壤微生物矿化对灌丛引入过程及水分的响应[J].生态学报,2021,41(4):1537-1550.

[18] 王言意,党晓宏,高永,等.四合木灌丛衰退对沙堆养分及沉积特征的影响[J].水土保持通报,2024,44(3):65-73.

[19] Tilman D, Isbell F, Cowles J M. Biodiversity and ecosystem functioning[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2014, 45: 471-493.

- [20] 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[J].北京大学学报(自然科学版),2008,44(6):945-952.
- [21] Hinsinger P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review [J]. Plant and Soil, 2001, 237(2): 173-195.
- [22] Richardson A E, Simpson R J. Soil microorganisms mediating phosphorus availability update on microbial phosphorus [J]. Plant Physiology, 2011, 156(3): 989-996.
- [23] 宋一凡,卢亚静,刘铁军,等.荒漠草原不同雨量带土壤-植物-微生物C、N、P及其化学计量特征[J].生态学报,2020,40(12):4011-4023.
- [24] Vermeiren C, Kerckhof P, Reheul D, et al. Increasing soil organic carbon content can enhance the long-term availability of phosphorus in agricultural soils [J]. European Journal of Soil Science, 2022, 73(1): 13191.
- [25] Vitousek P M, Porder S, Houlton B Z, Chadwick O A. Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions [J]. Ecological Applications, 2010, 20(1): 5-15.
- [26] Zechmeister-Boltenstern S, Keiblinger K M, Mooshammer M, et al. The application of ecological stoichiometry to plant-microbial-soil organic matter transformations [J]. Ecological Monographs, 2015, 85(2): 133-155.
- [27] 方熊,刘菊秀,张德强,等.降水变化、氮添加对鼎湖山主要森林土壤有机碳矿化和土壤微生物碳的影响[J].应用与环境生物学报,2012,18(4):531-538.
- [28] 谭锦,杨建英,侯健,等.乌海市几种蒺藜科灌木与土壤养分空间格局关系[J].中国水土保持科学,2019,17(4):93-103.
- [29] 罗维成,赵文智,任珩,等.不同气候区灌丛沙堆形态及土壤养分积累特征[J].中国沙漠,2021,41(2):191-199.
- [30] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change [J]. Nature, 2006, 440(7081): 165-173.
- [31] 肖辉林,郑习健.土壤温度上升对某些土壤化学性质的影响[J].土壤与环境,2000(4):316-321.
- [32] 李传虹,张林,刘四义,等.青藏高原灌丛土壤碳氮含量及其相关功能基因分布特征[J].生态学报,2024,44(1):392-404.
- [33] 王其兵,李凌浩,白永飞,等.气候变化对草甸草原土壤氮素矿化作用影响的实验研究[J].植物生态学报,2000,24(6):687-692.
- [34] 徐文兵,赵敏,瓦勒塔,等.青藏高原东北缘3种灌木数量性状、龄级结构及自疏特征[J].草业科学,2019,36(5):1207-1214.
- [35] 李刚,赵祥,张宾宾,等.不同株高的柠条生物量分配格局及其估测模型构建[J].草地学报,2014,22(4):769-775.
- [36] 姚博,陈云,曹雯婕,等.呼伦贝尔退化沙地植被-土壤碳氮磷互馈关系及微生物驱动机制[J].植物生态学报,2025,49(1):59-73.
- [37] 马媛,辛智鸣,蔺方春,等.乌兰布和沙漠不同固沙灌木群落的土壤质量评价[J].植物科学学报,2025,43(2):181-191.
- [38] 那尔格孜·阿力甫,肖钰鑫,宋泊沂,等.荒漠植物“肥岛”效应对土壤养分空间分布的影响[J].植物研究,2023,43(6):868-880.
- [39] 杜忠毓,贺一鸣,房义,等.西鄂尔多斯濒危植物四合木群落多样性及其环境解释[J].生态学报,2021,41(15):6035-6045.
- [40] 莫保儒,蔡国军,杨磊,等.半干旱黄土区成熟柠条林地土壤水分利用及平衡特征[J].生态学报,2013,33(13):4011-4020.
- [41] 赵亚楠,王红梅,李志刚,等.荒漠草原灌丛人为转变过程中土壤碳氮耦合特征及机制[J].生态学报,2023,43(10):4123-4135.
- [42] Rengasamy P. World salinization with emphasis on Australia [J]. Journal of Experimental Botany, 2006, 57(5): 1017-1023.

Long-term changes and driving factors of soil nutrients in typical shrub communities of the desert steppe

Wang Haoyi, Yu Xiao, Xin Zhiming, Ma Yuan, Luo Fengmin, Li Xing, Cui Jian, Lu Jiahua

(Experimental Center of Desert Forestry /Dengkou Desert Ecosystem Research Station of Inner Mongolia/ Ulan Buh Desert Oasis Wild Field Scientific Observation and Research Station of Inner Mongolia Autonomous Region, Chinese Academy of Forestry, Dengkou 015200, Inner Mongolia, China)

Abstract: Elucidating the long-term dynamics of soil nutrients in desert shrublands and their underlying drivers is crucial for understanding ecosystem stability and providing theoretical support for ecological restoration. In this study, three typical shrub species—*Ceratoides latens*, *Tetraena mongolica*, and *Sarcozygium xanthoxylon*—in the Hobq Desert were selected as research subjects. Based on long-term field surveys and laboratory measurements, we analyzed the long-term variations in surface soil nutrients (C, N, P, K) and their stoichiometric ratios, examined the trends in climatic and vegetation factors, and quantified the relative contributions of environmental factors to soil nutrient variation using random forest models and redundancy analysis. The results showed that from 2006 to 2021, soil organic carbon increased significantly across the three shrublands, albeit with distinct inter-specific patterns. Total nitrogen exhibited divergent trends among species, while total phosphorus generally decreased in *C. latens* and *T. mongolica* shrublands, but decreased first and then increased in *S. xanthoxylon* shrubland. The C:N, C:P, and N:P ratios increased overall. Random forest and RDA analyses revealed inter-specific differences in the explanatory power of environmental factors on soil nutrient variation. Soil nutrient variation in *C. latens* shrubland was primarily influenced by both climatic factors (wind speed and precipitation) and vegetation factors (canopy width and height) (adjusted $R^2=74.2\%$). *S. xanthoxylon* shrubland was sensitive to climatic factors and also significantly affected by species richness (adjusted $R^2=82.7\%$). In contrast, the model for *T. mongolica* shrubland had a relatively lower explanatory power (adjusted $R^2=56.7\%$), with precipitation and wind speed being the prominent contributing factors. The dynamics of soil nutrients and their responses to environmental factors exhibited pronounced inter-specific specificity among the three shrublands. This study provides data support based on long-term monitoring for the restoration and management of desert shrubland ecosystems.

Key words: desert shrubland; soil nutrients; environmental factors; long-term dynamics; random forest model