

引用格式: 马小琴, 刘俊良, 唐好洁, 等. 内蒙古贺兰山不同生长状况青海云杉与土壤耦合关系[J]. 浙江农林大学学报, 2026, 43(X): 1-14. MA Xiaoqin, LIU Junliang, TANG Haojie, *et al.* The coupling relationship between *Picea crassifolia* under different growth conditions and soil in Helan Mountain, Inner Mongolia[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2026, 43(X): 1-14.

内蒙古贺兰山不同生长状况青海云杉与土壤耦合关系

马小琴¹, 刘俊良², 唐好洁², 马克华², 闫峰³, 萨秋尔², 徐晓梅²,
袁丽丽⁴, 娜荷芽⁴, 陈林^{5,6}, 庞丹波^{5,6}, 李学斌¹

(1. 宁夏大学 林业与草业学院, 宁夏 银川 750021; 2. 内蒙古自治区阿拉善盟林业和草原保护站/阿拉善高原森林生态系统生物多样性内蒙古自治区野外科学观测研究站, 内蒙古 阿拉善左旗 750306; 3. 内蒙古自治区林业和草原保护总站, 内蒙古 呼和浩特 010010; 4. 内蒙古贺兰山国家级自然保护区管理局, 内蒙古 阿拉善左旗 750306; 5. 宁夏大学 生态环境学院, 宁夏 银川 750021; 6. 贺兰山森林生态系统宁夏回族自治区野外科学观测研究站, 宁夏 银川 750021)

摘要: 【目的】明确内蒙古贺兰山不同沟道中健康与枯死青海云杉 *Picea crassifolia* 植被与土壤耦合协调关系的差异, 准确认识森林衰退现状和退化阶段。【方法】选取镇木关、冒勒其克、下岭南沟、干树湾和中梁子 5 个典型沟道中的青海云杉, 通过目标树种与土壤调查分析, 构建 6 个植被指标和 11 个土壤指标的评价体系, 利用层次分析法和熵权法确定各指标权重, 以耦合协调度模型评估贺兰山不同生长状况青海云杉与土壤系统的协调状况。【结果】①土壤含水率和土壤容重是影响青海云杉生长状况的主要限制因子。②在健康与枯死样地中土壤全氮、有机碳质量分数与树高、胸径等生长指标显著正相关, 枯死样地中土壤电导率与植株枯死率显著正相关 ($P<0.05$)。③不同沟道健康与枯死青海云杉植被与土壤耦合协调度整体偏低, 即使在健康样地中植被-土壤系统也呈现退化趋势。④镇木关和干树湾健康样地分别处于土壤滞后和植被滞后发展水平, 冒勒其克、下岭南沟和中梁子处于不同程度的植被-土壤同步发展水平; 枯死过程进一步加剧了枯死样地系统失调, 导致镇木关和干树湾枯死样地转为低水平的植被-土壤同步发展, 中梁子转为植被滞后发展, 而冒勒其克和下岭南沟耦合模式未发生改变。【结论】贺兰山不同沟道健康与枯死青海云杉的植被-土壤系统耦合协调关系存在明显分异, 整体处于低水平协调状态, 健康样地植被-土壤系统呈现退化趋势, 而枯死样地植被-土壤系统处于失调状态。图 3 表 5 参 51

关键词: 青海云杉; 植被; 土壤; 耦合协调; 贺兰山

中图分类号: S728.51 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2026)00-0001-14

The coupling relationship between *Picea crassifolia* under different growth conditions and soil in Helan Mountain, Inner Mongolia

MA Xiaoqin¹, LIU Junliang², TANG Haojie², MA Kehua², YAN Feng³, SA Qiuer², XU Xiaomei²,
YUAN Lili⁴, NA Heya⁴, CHEN Lin^{5,6}, PANG Danbo^{5,6}, LI Xuebin¹

(1. School of Forestry and Grassland, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 2. Alxa League Forestry and Grassland Protection Station/Alxa Plateau Forest Ecosystem Biodiversity Field Scientific Observation and Research Station, Inner Mongolia Autonomous Region, Alxa Left Banner 750306, Inner Mongolia, China; 3. General Station of Forestry and Grassland Conservation of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China; 4. Helan Mountain National Nature Reserve Administration Bureau of Inner Mongolia, Alxa Left Banner 750306, Inner

收稿日期: 2026-03-26; 修回日期: 2026-06-09

基金项目: 内蒙古自治区阿拉善盟林业和草原保护站项目 (NMTX-ZC-2025-07); 宁夏回族自治区野外科学观测研究站项目 (2023KXGC005); 宁夏回族自治区自然科学基金项目 (2026BEG02072, 2024AAC01004)

作者简介: 马小琴 (ORCID: 0009-0004-4288-6521), 从事土壤碳循环研究。E-mail: mxq3863@163.com。通信作者: 李学斌 (ORCID: 0000-0002-6928-115X), 研究员, 博士, 从事草地资源、生态与环境等方面研究。E-mail: lixuebin@nxu.edu.cn

Mongolia, China; 5. College of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China;

6. Helan Mountain Forest Ecosystem Field Scientific Observatory of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: [Objective] The purpose is to clarify the differences in the coupling and coordination relationships between healthy and dead *Picea crassifolia* vegetation and soil across different gullies in Helan Mountain of Inner Mongolia, and to accurately assess the current status and degradation stages of forest decline. [Method] *P. crassifolia* trees were selected from 5 typical gullies: Zhenmuguan, Maoleqike, Xialingnangou, Ganshuwan, and Zhongliangzi. Based on the investigation and analysis of the target tree species and soil conditions, an evaluation system comprising 6 vegetation indicators and 11 soil indicators was constructed. The Analytic Hierarchy Process (AHP) and the entropy weight method were utilized to determine the weights of each indicator. A coupling coordination degree model was then employed to evaluate the coordination status between *P. crassifolia* vegetation and soil system under different growth conditions across Helan Mountain. [Result] (1) Moisture content and bulk density in soil were the main limiting factors affecting the growth status of *P. crassifolia*. (2) In both healthy and dead sample plots, the contents of total nitrogen and soil organic carbon were significantly positively correlated with growth indicators such as tree height and diameter at breast height ($P < 0.05$). In the dead sample plots, soil conductivity was positively correlated with plant mortality rate. (3) The overall coupling coordination degree between vegetation and soil for both healthy and dead *P. crassifolia* across different gullies was relatively low. Even in healthy sample plots, the vegetation-soil system showed a trend of degradation. (4) In healthy sample plots, Zhenmuguan and Ganshuwan were respectively at the levels of soil-lagging and vegetation-lagging development, while Maoleqike, Xialingnangou, and Zhongliangzi were in varying degrees of vegetation-soil synchronous development. The mortality process further exacerbated the system imbalance in the dead sample plots, which led to the transformation of Zhenmuguan and Ganshuwan into areas with low-level vegetation and soil synchronous development, Zhongliangzi into an area with delayed vegetation development, while the coupling patterns of Maoleqike and Xialingnangou remained unchanged. [Conclusion] There are significant differences in the coupling coordination relationship between vegetation and soil systems of healthy and dead *P. crassifolia* stands in different gullies of Helan Mountain, exhibiting an overall low-level coordination state. The vegetation-soil system in healthy plots show a trend of degradation while that in dead plots remained in an imbalanced state. [Ch, 3 fig. 5 tab. 51 ref.]

Key words: *Picea crassifolia*; vegetation; soil; coupling coordination; Helan Mountain

森林作为全球最具活力的生态系统,对于改善环境、调节气候、保护生物多样性等都具有重要作用^[1]。然而随着人类活动加剧,生态环境日益恶化,森林等自然生态系统出现生产力下降、生态服务功能丧失等退化问题。据统计,世界上已有超 20 亿 hm^2 的森林发生退化^[2],由此导致的林木衰退问题引发了席卷全球的生态环境危机^[3]。研究发现,尽管近年来中国西北地区植被覆盖面积整体呈增长趋势,但局部区域仍存在林地退化现象^[4],部分林分提前或加速进入衰老阶段,具体表现为林木生长状况不良,濒死或枯死现象加剧。目前,有关退化森林恢复评价的指标主要围绕物种多样性、植被结构和生态学过程等 3 个方面。不同学者或经营管理者因其对恢复森林生态系统服务功能的需求各异,因此评价退化森林生态系统恢复的重点也各不相同。

近年来,国内外学者针对不同生态系统退化过程中的理化生境响应开展了大量研究,主要聚焦于退化植物群落特征^[5-6]、土壤理化因子^[7]和关键土壤养分^[8]等变化规律,其中草地退化主要表现在植被退化和土壤退化 2 个方面。植被退化表现为植被盖度、生产力和生物多样性等指标发生变化,土壤退化表现为土壤理化性质和微生物功能的减弱^[9]。研究表明:草地退化会影响土壤持水性能,诱发土壤 pH 增

大, 并导致有机碳、全氮和全磷等核心养分大量减少^[10-13], 影响土壤养分平衡, 最终导致草地生产力衰退; 与草地不同, 森林生态系统因具有庞大的林冠和深根系结构, 其衰退往往表现出更为复杂的级联效应。不仅直观表现为林木枯损与郁闭度下降, 还会导致土壤水分和养分快速流失, 严重破坏土壤结构, 导致土壤容重增大, 紧实度增加, 物理性质发生严重退化^[14-15]。有机碳和氮素作为土壤核心养分指标, 对森林退化也极为敏感。在退化林地中由于凋落物减少导致地表裸露, 加剧了土壤有机质的矿化作用, 进而造成土壤碳、氮质量分数迅速下降。因此, 退化林地的土壤有机碳和全氮往往显著低于健康林地^[16-17]。此外, 森林退化还会诱发深层盐分离子向上富集, 导致电导率异常升高, 加剧土壤次生盐渍化与离子胁迫^[18]。尽管上述研究阐明了不同生态系统植被与土壤退化的表现特征及机制, 但退化问题实质上是植被与土壤相互反馈、协同演变的综合过程。现有研究多从植被或土壤的单一或部分指标评估退化程度, 缺乏建立综合指标体系对植被与土壤系统的整体协调状况进行定量评估。

植被与土壤构成了一个相互依存、相互制约的系统^[19], 两者存在天然的耦合关系, 其中耦合协调度被用来描述系统彼此相互作用的程度与质量, 反映了不同系统之间的一致性水平^[20-21]。目前, 诸多研究团队通过从多角度构建植被-土壤耦合协调模型来定量评价植被群落与土壤系统之间的耦合关系。刘维福等^[22]通过长期监测评估了煤矿区修复期内植被生长状况与土壤质量的协同变化关系。郭文芳等^[23]通过构建植被-土壤耦合协调模型系统分析了太行山坡地在不同管理措施下植被与土壤系统的协同状态, 以探求最优的土地管理模式。徐明等^[21]和李豪等^[24]均以黄土高原为研究区, 分别探究了不同植被恢复模式和不同微地形对植被-土壤系统耦合协调关系的影响。综上所述, 耦合协调度模型能够广泛应用于各种区域、地形与气候类型下的植被-土壤系统间关系研究。然而, 目前在干旱区的相关研究主要聚焦于评估不同类型管理措施对植被-土壤系统耦合关系的影响, 对不同生长状况植被-土壤系统间耦合协调关系的差异与机制研究较少, 因此, 开展健康与衰退过程中植被-土壤系统耦合协调模型的演变规律研究具有重要意义。

贺兰山是中国西北地区重要的生态安全屏障^[25], 植被类型呈明显的垂直分异现象。其中分布于海拔 2 200~3 100 m 的青海云杉 *Picea crassifolia* 林为该区域的优势建群种, 占贺兰山森林总面积的 73%, 长期以来发挥着巨大的生态效益^[26]。然而由于该地区气候干旱, 年降水量少, 又属于石质山地, 土层较薄且时有暴雨发生, 水土流失严重, 个别地段出现青海云杉大面积枯死的现象, 导致青海云杉林林相残败, 生长衰退。本研究以内蒙古贺兰山 5 个典型沟道青海云杉为对象, 通过野外实地调查, 构建植被-土壤系统耦合协调度模型, 分别比较健康与枯死样地植被-土壤系统的耦合协调关系, 旨在为该地区青海云杉的可持续经营与管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古贺兰山国家级自然保护区 (38°27'~39°30'N, 105°41'~106°41'E), 属于典型的大陆性气候, 年均降水量约为 420.0 mm, 年蒸发量可达 2 000.0 mm。降水主要集中在 6—8 月, 占全年降水量的 60%~80%。研究区内土壤以山地灰褐土和山地灰钙土为主。植被类型以针阔混交林为主。

1.2 实验设计和测定方法

1.2.1 实验设计 2024 年 5 月, 自内蒙古贺兰山西坡中段由北向南选取冒勒其克、干树湾、中梁子、下岭南沟和镇木关等 5 个具有代表性且具有典型枯死率的沟道, 以其中的青海云杉作为研究对象。依据 LY/T 3179—2020《退化防护林修复技术规程》, 结合各沟道青海云杉的枯死状况及生长状况, 将受害青海云杉枯死率 $\geq 40\%$, 且林相残败的林分界定为枯死样地; 将生长相对良好、无大面积死亡的青海云杉林分界定为健康样地。在每个沟道内, 分别设置大小为 20 m $\times$ 20 m 的 3 个健康青海云杉样地和 3 个枯死青海云杉样方, 共计 30 个样地。为最大程度消除空间异质性对研究结果的干扰, 同一沟道内健康与枯死样地的海拔差异控制 100 m 以内, 所有样地均统一选取中坡位, 并通过生长锥测定样地内主要目标树种的树龄, 确保健康与枯死样地中青海云杉树龄相近, 从而使样地之间其他主要立地与林分条件尽可能保持一致。样地信息见表 1。对健康与枯死样地内青海云杉进行每木检尺, 测量并记录胸径、树高、冠幅等指标。在每个样方中随机选取 5 个点, 采用五点取样法采集土壤样品, 按 0~10、10~20 和 20~40 cm

表 1 样地基本信息

Table 1 Basic information of sample plots

样地	海拔/m	北纬(N)	东经(E)	坡位	盖度/%	主要植物
干树湾	2 368	38°59'15.52"	106°02'58.71"	中坡	60	青海云杉
下岭南沟	2 285	38°45'46.15"	105°53'8.58"	中坡	95	青海云杉
冒勒其克	2 320	39°00'27.05"	106°04'50.37"	中坡	75	青海云杉
镇木关	2 191	38°41'39.37"	105°52'1.19"	中坡	70	青海云杉
中梁子	2 593	38°46'20.72"	105°53'18.59"	中坡	80	青海云杉

分层取样。同层土样混合均匀后分装，每个土样重复 3 次。土样经风干后过 2 mm 筛，用于后续土壤理化性质分析。

1.2.2 土壤理化性质测定 土壤理化性质测定方法如下：土壤含水量采用烘干法测定，容重采用环刀法测定，毛管孔隙度由公式计算获得。土壤 pH 采用酸度计电位法测定；土壤电导率采用电导率仪测定；土壤硝态氮和铵态氮用连续流动分析仪测定；土壤全氮采用半微量凯氏法测定；土壤全磷用酸溶-钼锑抗比色法测定；土壤有机碳采用重铬酸钾氧化外加热法测定^[27-28]。

1.3 构建耦合协调度模型

1.3.1 指标体系构建及权重计算 为了准确评价退化过程中不同沟道植被和土壤的关系，在设置评价指标体系时，借鉴相关研究成果^[21,29-30]，根据植被与土壤间的关系，构建内蒙古贺兰山不同生长状况青海云杉植被-土壤耦合协调评价指标体系，形成包括树高、胸径、枯死率和枯梢率等 6 个指标在内的植被系统体系和包括土壤容重、有机碳、全氮、全磷、铵态氮、硝态氮和 pH 等 11 个指标在内的土壤系统体系。考虑到不同指标间存在量纲、数量级和数量变化幅度的差异，无法对各指标进行综合量化比较，因此本研究采用极差法对青海云杉植被-土壤系统中的各项数据进行标准化处理，使所有指标值都在 [0, 1] 范围内。根据指标对系统发展水平的贡献分为正向指标与负向指标。正向指标为正效应数据^[21]，标准化后数值越大代表系统发展水平越好，反之负向指标越小越好。基于此，本研究将贺兰山青海云杉的树高、胸径以及土壤养分等指标定义为正向指标，将枯梢率、枯死率以及土壤容重等胁迫指标定义为负向指标。

在处理指标权重时，考虑到每一种赋权法都有一定局限性，本研究综合采用层次分析法和熵值法分别计算各评价指标的权重，然后求其权重的均值得到各评价指标的综合权重值。

1.3.2 综合评价指数构建 在对各评价指标实测值进行无量纲化处理的基础上，构建不同生长状况植被系统综合评价指数 $[S(x)]$ 及土壤系统综合评价指数 $[P(y)]$ 。评价指数越高，表示植被群落或土壤环境发展水平越好，反之则越差；同时，构建植被与土壤的综合调和指数 (T) ，用以反映植被与土壤的整体协同效应。

1.3.3 耦合度模型 耦合度是用于表征系统或要素之间相互作用程度的重要指标^[31]。本研究借鉴前人相关研究方法^[21,32]，根据植被及土壤综合评价指数构建植被与土壤耦合度模型。耦合度 (C_{sp}) 取值为 0~1，当 C_{sp} 趋近于 0 时，说明植被与土壤间各指标不存在关联，当 C_{sp} 趋近于 1 时，说明植被与土壤系统间存在明显的耦合关联。

1.3.4 耦合协调度模型 耦合度难以全面准确地反映植被和土壤在整个系统中的协同效应^[33]，因此本研究以耦合度为基础，加入表示总体发展水平的成分，构建能反映植被-土壤系统相互作用的耦合协调度模型。参考前人研究^[24,32]，本研究将耦合协调度 (D_c) 划分为：0< D_c ≤0.1 为极度失调，0.1< D_c ≤0.2 为严重失调，0.2< D_c ≤0.3 为中度失调，0.3< D_c ≤0.4 为轻度失调，0.4< D_c ≤0.5 为濒临失调等 10 个等级(表 2)。

1.3.5 植被-土壤系统协调发展类型的判断标准 目前国内外对耦合协调度的等级划分尚未形成统一标准，因此综合前人的研究基础^[24,32]，确定本研究耦合协调度由 6 个植被指标和 11 个土壤指标构成。先根据 D_c 值大小将青海云杉植被与土壤的耦合协调类型分为 10 大类，然后再由 $S(x)$ 和 $P(y)$ 对比得出 30 种青海云杉与土壤系统的耦合协调模式(表 2)。

1.4 数据处理

所有数据均用 Excel 2010 处理。用 SPSS 27.0 对健康与枯死青海云杉形态指标和土壤理化性质进行

差异显著性分析 ($P < 0.05$), 用 YAAHP 11.2 进行层次分析法分析确定耦合协调度模型评价指标权重, 用 CANOCO 4.5 对植被形态指标与土壤理化因子进行冗余分析 (RDA), 并使用 Origin 2022 绘制耦合协调度图形。

2 结果与分析

2.1 贺兰山青海云杉形态指标

由表 3 可知: 5 个沟道中健康样地的生长状况整体优于枯死样地。在健康样地中, 胸径以干树湾最高 (50.00 cm), 略高于中梁子 (49.73 cm) 和下岭南沟 (42.67 cm); 树高则以中梁子最高 (11.41 m), 其次为干树湾 (9.64 m), 冒勒其克最低 (5.09 m); 冠幅以中梁子最大 (3.46~3.59 m), 其次是冒勒其克 (2.56~2.61 m) 和干树湾 (2.51~2.56 m)。在枯死样地中, 胸径以干树湾最高 (54.67 cm), 其次为中梁子 (48.85 cm) 和冒勒其克 (45.78 cm), 镇木关最低 (30.27 cm); 树高以中梁子 (9.70 m) 和干树湾 (9.06 m) 较高, 镇木关最低 (2.86 m); 冠幅以冒勒其克最大 (2.62~2.96 m), 其次是干树湾 (2.38~2.65 m), 镇木关 (1.11~1.15 m) 最低, 说明枯死样地中仍存在较大个体, 死亡并非仅发生在小径级青海云杉。在 5 个沟道中枯死样地的枯梢率和枯死率均显著高于健康样地 ($P < 0.05$), 其中健康样地的枯梢率则主要分布在 21.67%~32.67%, 而枯死样地的枯梢率集中分布在 75.62%~87.14% 的高值区间。枯死率也整体呈现同样趋势, 健康样地内枯死率为 15.10%~30.32%, 而枯死样地高达 65.00% 以上。总之, 树高、胸径、冠幅等基本生长指标在多数沟道中虽有升高或降低, 但差异不显著, 而衰退指标对健康状态的响应更直观。

2.2 贺兰山青海云杉土壤理化性质

由图 1 可知: 各样地 pH 为 7.11~7.79, 整体呈弱碱性, 且各样地间差异较小。土壤含水率整体随土层加深呈下降趋势, 镇木关和中梁子健康样地土壤含水率整体高于枯死样地, 其中镇木关健康样地在 0~20 cm 土层较枯死样地显著提高 56.30%~77.26% ($P < 0.05$), 中梁子在 0~40 cm 各土层显著提高 46.83%~66.47% ($P < 0.05$), 而下岭南沟和干树湾在 0~20 cm 土层中则表现为健康样地显著低于枯死样地, 较枯死样地分别降低 36.89%~42.19% 和 40.49%~44.37%。土壤容重在所有沟道中均表现为枯死样地高于健康样地, 其中镇木关和下岭南沟枯死样地在 0~40 cm 各土层较健康样地分别显著提高 8.70%~15.38% 和 14.09%~30.70% ($P < 0.05$); 冒勒其克和中梁子枯死样地 10~40 cm 较健康样地分别显著提高 14.60%~21.12% 和 13.53%~15.57%。土壤毛管孔隙度仅在冒勒其克各土层表现出枯死样地显著高于健康样地 ($P < 0.05$), 其余沟道差异不明显。土壤电导率在镇木关、冒勒其克、干树湾和中梁子 0~40 cm 土层健康样地中均显著低于枯死样地 ($P < 0.05$); 土壤全氮和有机碳在下岭南沟、干树湾和中梁子 0~20 cm 土层健康样地显著高于枯死样地, 其中干树湾有机土壤碳增幅最为显著, 高达 77.16%~81.48% ($P < 0.05$); 但镇木关和冒勒其克健康样地 0~20 cm 土层全氮和有机碳却显著低于枯死样地, 其中镇木关健康样地较枯死样地分别下降 31.51%~51.38% 和 15.52%~53.92%, 冒勒其克健康样地较枯死样地分别下降 22.98%~24.63% 和 23.63%~25.09% ($P < 0.05$)。土壤全磷在所有沟道 0~10 cm 土层均表现为健康样地显著低于枯

表 2 植被-土壤系统耦合协调类型划分标准

Table 2 Classification standards for coupling coordination types of the vegetation-soil system

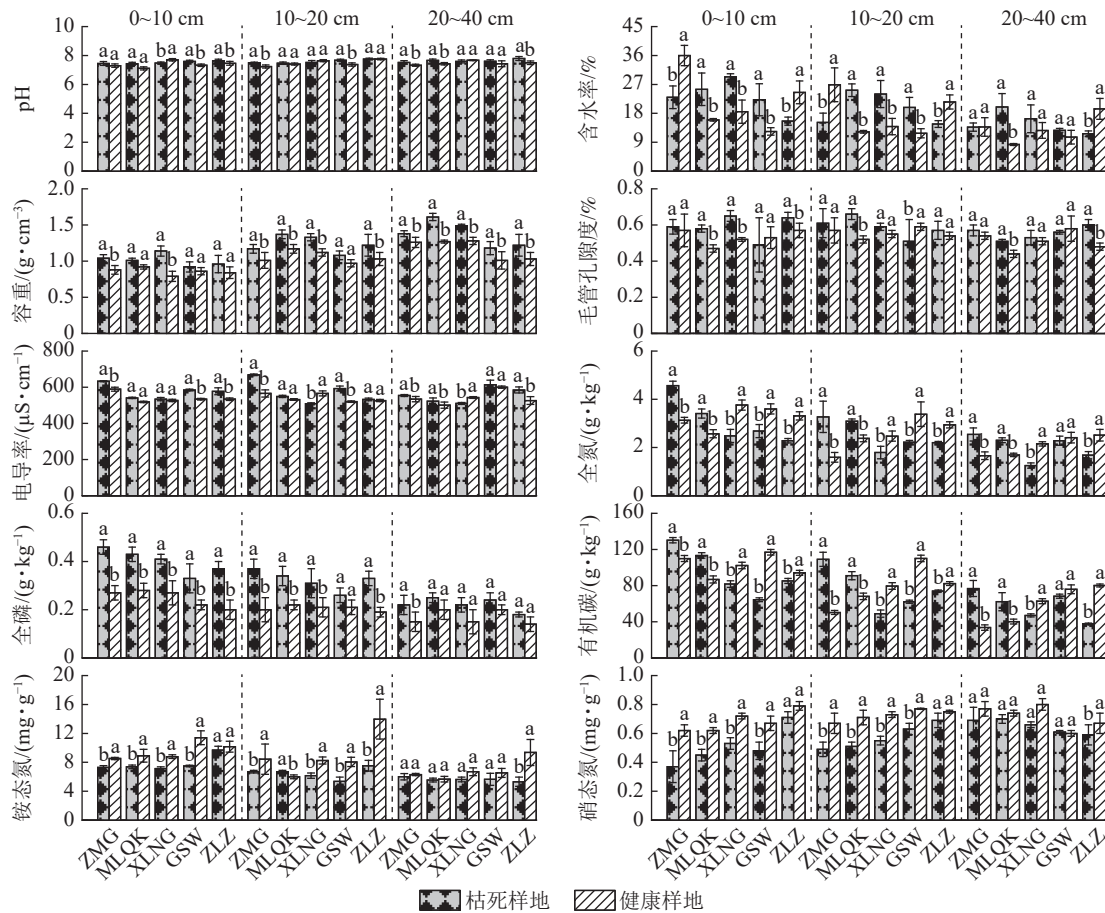
D_c	类型	$S(x)/P(y)$	耦合协调模式
$0 < D_c \leq 0.1$	极度失调	$S(x)/P(y) > 1.25$	植被滞后发展
		$0.8 \leq S(x)/P(y) \leq 1.25$	植被-土壤同步发展
		$S(x)/P(y) < 0.8$	土壤滞后发展
$0.1 < D_c \leq 0.2$	严重失调	$S(x)/P(y) > 1.25$	植被滞后发展
		$0.8 \leq S(x)/P(y) \leq 1.25$	植被-土壤同步发展
		$S(x)/P(y) < 0.8$	土壤滞后发展
$0.2 < D_c \leq 0.3$	中度失调	$S(x)/P(y) > 1.25$	植被滞后发展
		$0.8 \leq S(x)/P(y) \leq 1.25$	植被-土壤同步发展
		$S(x)/P(y) < 0.8$	土壤滞后发展
$0.3 < D_c \leq 0.4$	轻度失调	$S(x)/P(y) > 1.25$	植被滞后发展
		$0.8 \leq S(x)/P(y) \leq 1.25$	植被-土壤同步发展
		$S(x)/P(y) < 0.8$	土壤滞后发展
$0.4 < D_c \leq 0.5$	濒临失调	$S(x)/P(y) > 1.25$	植被滞后发展
		$0.8 \leq S(x)/P(y) \leq 1.25$	植被-土壤同步发展
		$S(x)/P(y) < 0.8$	土壤滞后发展
$0.5 < D_c \leq 0.6$	勉强协调	$S(x)/P(y) > 1.25$	植被滞后发展
		$0.8 \leq S(x)/P(y) \leq 1.25$	植被-土壤同步发展
		$S(x)/P(y) < 0.8$	土壤滞后发展
$0.6 < D_c \leq 0.7$	初级协调	$S(x)/P(y) > 1.25$	植被滞后发展
		$0.8 \leq S(x)/P(y) \leq 1.25$	植被-土壤同步发展
		$S(x)/P(y) < 0.8$	土壤滞后发展
$0.7 < D_c \leq 0.8$	中级协调	$S(x)/P(y) > 1.25$	植被滞后发展
		$0.8 \leq S(x)/P(y) \leq 1.25$	植被-土壤同步发展
		$S(x)/P(y) < 0.8$	土壤滞后发展
$0.8 < D_c \leq 0.9$	良好协调	$S(x)/P(y) > 1.25$	植被滞后发展
		$0.8 \leq S(x)/P(y) \leq 1.25$	植被-土壤同步发展
		$S(x)/P(y) < 0.8$	土壤滞后发展
$0.9 < D_c \leq 1.0$	优质协调	$S(x)/P(y) > 1.25$	植被滞后发展
		$0.8 \leq S(x)/P(y) \leq 1.25$	植被-土壤同步发展
		$S(x)/P(y) < 0.8$	土壤滞后发展

表 3 贺兰山青海云杉形态指标差异性分析

Table 3 Analysis of differences in morphological indicators of *P. crassifolia* in the Helan Mountains

沟道	样地	胸径/cm	树高/m	枝下高/m	南北冠幅/m	东西冠幅/m	土层厚度/cm	枯梢率/%	枯死率/%
镇木关	枯死样地	30.27±5.57 a	2.86±0.47 b	1.04±0.21 b	1.15±0.16 a	1.11±0.15 a	35.33±2.81 a	86.00±6.23 a	64.88±3.35 a
	健康样地	36.73±5.82 a	6.07±0.87 a	1.71±0.16 a	2.06±0.78 a	1.95±0.65 a	27.47±3.28 b	28.33±4.01 b	24.26±6.05 b
冒勒其克	枯死样地	45.78±7.24 a	6.44±0.67 a	1.29±0.13 a	2.62±0.39 a	2.96±0.43 a	39.85±5.92 a	87.14±5.68 a	71.42±19.82 a
	健康样地	35.27±5.19 b	5.09±0.45 a	0.77±0.15 b	2.56±0.42 a	2.61±0.43 a	34.73±2.94 a	21.67±3.21 b	18.10±2.40 b
下岭南沟	枯死样地	31.86±5.45 b	5.67±0.44 b	1.40±0.25 a	1.87±0.26 a	1.74±0.27 a	45.53±5.70 b	75.62±4.65 a	65.89±8.15 a
	健康样地	42.67±2.69 a	7.13±0.77 a	1.02±0.20 a	2.27±0.21 a	2.13±0.88 a	56.47±4.84 a	30.07±0.90 b	25.90±5.84 b
干树湾	枯死样地	54.67±4.94 a	9.06±0.99 a	1.75±0.30 a	2.65±0.32 a	2.38±0.26 a	31.63±3.93 a	83.33±5.82 a	67.17±5.64a
	健康样地	50.00±4.07 a	9.64±0.81 a	1.74±0.16 a	2.51±0.23 a	2.56±0.35 a	41.53±4.18 b	29.87±1.80 b	15.10±5.32b
中梁子	枯死样地	48.85±4.25 a	9.70±0.61 a	0.93±0.12 b	2.59±0.22 b	2.52±0.21 b	58.26±3.13 a	80.33±5.22a	80.67±2.93 a
	健康样地	49.73±4.54 a	11.41±0.77 a	1.66±0.22 a	3.59±0.37 a	3.46±0.41 a	59.13±2.25 a	32.67±1.37 b	30.32±7.00 b

说明：数据均为平均值±标准差。同一沟道内，不同小写字母表示健康样地与枯死样地之间差异显著 ($P<0.05$)。



数据均为平均值±标准差。同一沟道内，不同小写字母表示健康样地与枯死样地之间差异显著 ($P<0.05$)。ZMG. 镇木关；MLQK. 冒勒其克；XLNG. 下岭南沟；GSW. 干树湾；ZLZ. 中梁子。

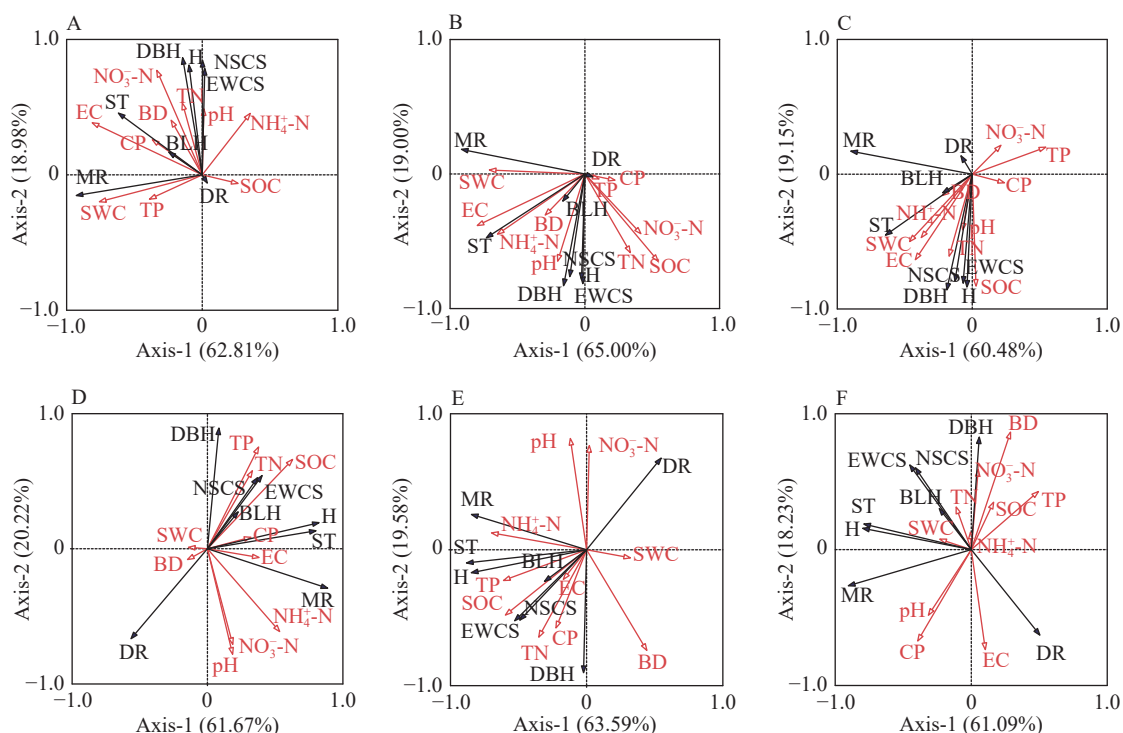
图 1 贺兰山青海云杉林土壤理化性质差异性分析

Figure 1 Analysis of differences in soil physicochemical properties of *P. crassifolia* forest in the Helan Mountains

死样地 ($P<0.05$)，在镇木关降幅最大，为 41.30%；铵态氮和硝态氮在各沟道总体表现为健康样地高于枯死样地，其中，铵态氮在干树湾和中梁子健康样地较枯死样地增幅较大，分别增加 49.91%~52.60% 和 4.85%~85.52%；硝态氮在镇木关健康样地较枯死样地增幅较为突出，增加了 36.73%~67.57%。

2.3 贺兰山青海云杉植被-土壤因子相关性

冗余分析结果表明：不同生长状况青海云杉受土壤环境因子的驱动存在显著差异(图 2A~F)。在所有样地及土层，前 2 轴对土壤理化性质与青海云杉生长指标的累计解释率均达到 79% 以上，能有效反映土壤理化性质对林木生长的影响。在健康样地中，青海云杉的生长主要受土壤养分和水分的协同驱动，在 0~10 cm 土层，土壤全氮、土壤硝态氮和土壤铵态氮与树高、胸径、南北冠幅和东西冠幅等生长指标呈正相关(图 2A)；土壤电导率与枯死率的正相关表明即使在健康样地中微弱的盐分累积也可能影响林木的健康状态。在 10~20 cm 土层，土壤有机碳、土壤全氮和土壤硝态氮与树高、胸径、东西冠幅和南北冠幅等生长指标呈正相关，土壤含水率与枝下高、树高、胸径呈正相关(图 2B)。在 20~40 cm 土层，土壤有机碳、土壤全氮与树高、胸径、南北冠幅和东西冠幅仍呈正相关，但与枯死率和枯梢率呈显著负相关(图 2C)，表明深层土壤养分对维持林木长势和抑制衰退有重要作用。



A. 健康样地0~10 cm土层；B. 健康样地10~20 cm土层；C. 健康样地20~40 cm土层；D. 枯死样地0~10 cm土层；E. 枯死样地10~20 cm土层；F. 枯死样地20~40 cm土层。TN. 土壤全氮；TP. 土壤全磷；NO₃-N. 土壤硝态氮；NH₄-N. 土壤铵态氮；BD. 土壤容重；EC. 土壤电导率；SOC. 土壤有机碳；SWC. 土壤含水率；ST. 土层厚度；CP. 毛管孔隙度；H. 树高；DBH. 胸径；NSCS. 南北冠幅；EWCS. 东西冠幅；BLH. 枝下高；DR. 枯梢率；MR. 枯死率。

图 2 贺兰山青海云杉形态指标与土壤理化因子的冗余分析

Figure 2 Redundancy analysis between *P. crassifolia* and soil factors in the Helan Mountains

在枯死样地中，土壤理化因子与林木生长指标的关系发生变化。在 0~20 cm 土层，土壤容重和土壤含水率与树高、胸径、南北冠幅和东西冠幅等生长指标呈负相关(图 2D、E)，说明土壤紧实及高含水量伴随的通透性与青海云杉生长受限有关。同时，土壤有机碳、土壤全氮、土壤铵态氮与枯梢率负相关，表明随着林木衰退，植被与土壤养分之间发生解耦。在 20~40 cm 土层(图 2F)，土壤电导率不仅与枯死率正相关，更与胸径、枝下高及南北冠幅和东西冠幅等生长指标呈负相关。这表明深层土壤过高的可溶性盐可能影响青海云杉的生长与存活。

2.4 贺兰山青海云杉植被与土壤耦合关系

根据指标选取的全面性、规范性、协调性及简明性等原则^[34-35]，构建植被-土壤耦合协调性的 2 级指标体系。在处理各指标权重时，为克服单一主观赋权或客观赋权方法的局限性，本研究采用层次分析法与熵值法分别计算各指标权重，最终以两者所得权重的均值作为各指标的综合权重。从表 4 可以看出：植物系统中表征健康属性的枯死率(0.163 9)和枯梢率(0.096 7)占据主导地位，其次是胸径(0.092 2)；土壤系统中土层厚度(0.073 1)、有机碳(0.051 5)和全氮(0.044 8)权重较高。

表 4 贺兰山青海云杉植被-土壤系统耦合协调性评价指标权重

Table 4 Weight of evaluation indicators for the vegetation-soil coupling coordination in *P. crassifolia* in the Helan Mountains

系统	属性层	指标	权重			系统	属性层	指标	权重		
			层次分 析法	改进熵 值法	综合 权重				层次分 析法	改进熵 值法	综合 权重
植物系统	生态属性	树高	0.038 4	0.061 2	0.049 8	土壤系统	物理属性	毛管孔隙度	0.054 1	0.050 7	0.052 4
		胸径	0.129 4	0.054 9	0.092 2			pH	0.004 8	0.081 6	0.043 2
		枝下高	0.019 7	0.047 1	0.033 4			电导率	0.003 5	0.071 0	0.037 3
		冠幅	0.105 5	0.052 0	0.078 8			有机碳	0.032 0	0.071 0	0.051 5
	健康属性	枯梢率	0.137 3	0.056 2	0.096 7		化学属性	全氮	0.016 9	0.072 7	0.044 8
		枯死率	0.274 5	0.053 4	0.163 9			全磷	0.030 5	0.042 8	0.036 6
		容重	0.016 2	0.062 5	0.039 4			铵态氮	0.008 8	0.072 0	0.040 4
土壤系统	物理属性	含水率	0.028 5	0.057 0	0.042 8		硝态氮	0.011 4	0.036 0	0.023 7	
		土层厚度	0.088 4	0.057 8	0.073 1						

由图 3 可知：健康样地耦合协调度由大到小依次为中梁子 (0.434 0)、镇木关 (0.350 7)、下岭南沟 (0.342 9)、干树湾 (0.293 5)、冒勒其克 (0.273 1)，其中，中梁子处于濒临失调状态，镇木关、下岭南沟为轻度失调，干树湾、冒勒其克为中度失调。枯死样地耦合协调度由大到小依次为镇木关 (0.405 4)、中梁子 (0.358 9)、下岭南沟 (0.343 0)、冒勒其克 (0.333 9)、干树湾 (0.310 6)，其中镇木关、中梁子、下岭南沟、冒勒其克为轻度失调，干树湾为中度失调。由表 5 可知：在健康样地中，冒勒其克、下岭南沟和中梁子维持在植被-土壤同步发展状态，镇木关和干树湾分别为土壤滞后和植被滞后的失衡先兆。伴随退化加剧，在枯死样地中原本维持同步发展的中梁子和冒勒其克，分别变为植被滞后和土壤滞后模式；原

本处于土壤滞后和植被滞后的镇木关和干树湾，在枯死样地中则表现为植被-土壤同步发展。结合植被与土壤综合评价指数可知，这种转变并非生态学意义上的向好演替，而是植被与土壤在双重生境胁迫下陷入的一种低水平发展状态。

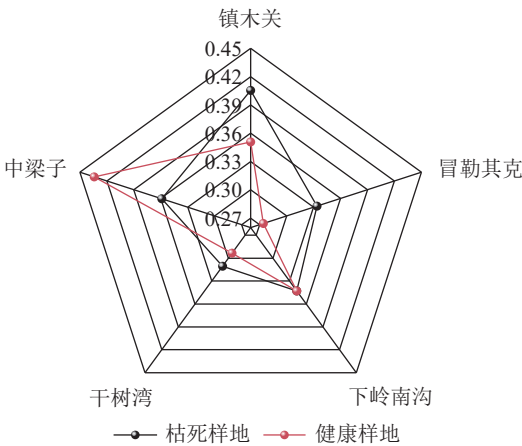


图 3 贺兰山青海云杉不同生长状况植被-土壤系统耦合协调度
Figure 3 Vegetation-soil coupling coordination degree in *P. crassifolia* of different growth statuses in the Helan Mountains

表 5 贺兰山青海云杉不同生长状况植被-土壤系统耦合协调状况评判结果

Table 5 Evaluation results of coupling coordination status for *P. crassifolia* with different growth statuses in the Helan Mountains

样地	样地	$S(x)$	$P(y)$	$S(x)/P(y)$	T	植被-土壤耦合协调模式
健康样地	镇木关	0.173 3	0.349 1	0.496 4	0.261 2	土壤滞后发展
	冒勒其克	0.134 6	0.206 9	0.650 6	0.170 7	植被-土壤同步发展
	下岭南沟	0.253 3	0.220 4	1.142 6	0.236 2	植被-土壤同步发展
	干树湾	0.210 2	0.141 3	1.437 3	0.175 7	植被滞后发展
	中梁子	0.360 3	0.290 2	1.241 7	0.325 3	植被-土壤同步发展
枯死样地	镇木关	0.303 3	0.356 2	0.851 6	0.226 0	植被-土壤同步发展
	冒勒其克	0.262 6	0.189 3	1.387 3	0.226 0	土壤滞后发展
	下岭南沟	0.212 0	0.261 3	0.811 1	0.236 6	植被-土壤同步发展
	干树湾	0.181 1	0.205 4	0.881 8	0.193 3	植被-土壤同步发展
	中梁子	0.287 5	0.230 7	1.246 4	0.259 1	植被滞后发展

3 讨论

3.1 不同生长状况青海云杉对土壤理化性质的影响

生态系统退化通常与土壤理化性质的改变有关。本研究发现,不同沟道健康与枯死样地青海云杉在土壤水分、容重、养分及盐分等指标上存在显著差异,且这些差异与林木生长指标密切相关。土壤含水率和容重是反映土壤退化过程中土壤物理性质的主要指标^[36]。下岭南沟、冒勒其克和干树湾等沟道枯死样地的土壤含水率显著高于健康样地,这与前人研究结果不一致^[13, 37]。产生这种差异的原因可能是青海云杉枯死后地表凋落物增加,形成较厚的覆盖层,加之生长季降水增多,但林冠对降水的截留作用减弱,使得土壤含水量得以保持甚至相对富集^[38],因此出现土壤含水量暂时性虚高的现象。与此同时,土壤容重在所有沟道中均表现为枯死样地显著大于健康样地,可能是随着干旱周期的到来,青海云杉枯死导致的林冠消失加剧了地表蒸散,同时因为地下根系生物量的显著下降削弱了土壤的结构稳定性,使其发生压实变形,最终导致土壤紧实度增加、通透性降低^[39]。冗余分析也表明:在枯死样地中土壤容重与含水率共同制约青海云杉树高、胸径及冠幅等生长指标,说明土壤紧实化引起的通气不良与高含水率造成的缺氧环境共同限制了残存青海云杉生长。

土壤养分是维系植物生长的核心基础。本研究发现:在健康和枯死样地中土壤有机碳和全氮质量分数均随土层加深而降低,这与杨益等^[40]的研究结果一致。在镇木关和冒勒其克,枯死样地的有机碳和全氮显著高于健康样地,这一现象主要源于这 2 个沟道较厚的土层厚度,为土壤提供了成土母质和储水空间^[41],有利于有机质的累积。此外,青海云杉枯死后地表凋落物大量增加,凋落物通过分解将大量的有机碳和氮素释放到土壤中,进一步提高了养分。因此,枯死样地表现出的高养分状态并非生态系统发生好转,可能源于青海云杉枯死后凋落物的持续输入。冗余分析结果也显示,在健康样地中有机碳、全氮与树高、胸径、冠幅等生长指标呈显著正相关,表明碳氮养分是维持林木健康生长的重要物质基础;同时,植物又通过凋落物分解和根系周转向土壤输入碳氮,形成土壤-植物间的正向养分反馈循环。然而,这种在表层积累的碳氮养分并未有效转化为植物可利用的形态,特别是在速效养分方面。本研究中各沟道健康样地的铵态氮和硝态氮质量分数总体高于枯死样地。从垂直分布来看,铵态氮质量分数随土层加深而降低,这与其带正电荷、易被表层负电胶体吸附固定的特性有关;硝态氮质量分数则随土层加深而增大,因其带负电荷、不易被吸附,易随水分淋溶至深层土壤。值得注意的是这 2 类速效氮在枯死样地中普遍降低,可能是因为青海云杉枯死后导致土壤微生物活性及呼吸强度下降,进而抑制了氮矿化速率,最终导致速效氮库耗竭^[42]。冗余分析也表明,铵态氮和硝态氮对健康样地青海云杉的生长具有明显的促进作用,而在枯死样地中这 2 种氮素与林木生长的关系明显减弱,进一步印证了速效氮供给能力与植被健康状态之间的密切关联。此外,由于青海云杉针叶质地粗硬,凋落物难以分解,导致大量磷素在凋落物层持续累积^[43],因此枯死样地青海云杉表层土壤全磷质量分数呈现明显增高的现象。

土壤电导率作为表征土壤盐分质量分数的主要指标,其变化能够影响植被的生长与分布^[44]。通常情况下土壤电导率升高意味着土壤盐分增加,当盐分过高时会引发生理干旱和离子胁迫,干扰植物生理过程进而抑制其生长^[45]。本研究中镇木关、冒勒其克、干树湾和中梁子枯死样地电导率均显著高于健康样地。结合冗余分析发现,深层土壤中过高的电导率不仅显著加剧了青海云杉的枯死,同时对青海云杉的胸径、枝下高和冠幅等生长指标表现出明显的抑制作用。这表明在枯死样地中较高的可溶性盐质量分数可能使残存青海云杉面临更为严重的离子胁迫,干扰其根系的水分吸收与养分转运,最终加速青海云杉的衰退与死亡风险。

3.2 不同生长状况青海云杉与土壤的耦合关系

本研究结果显示:所有沟道的青海云杉植被与土壤系统耦合协调度均未达到优良水平,整体处于失调状态,即使是协调度最高的中梁子健康样地也处于濒临失调状态,这反映了贺兰山森林生态系统固有的脆弱性^[46]。镇木关健康样地表现为土壤滞后发展型,即土壤综合指数低于植被综合指数。该样地虽为健康林分,但其土壤有机碳、全氮等养分在 5 个沟道中均处于较低水平,基础肥力相对薄弱。王志强等^[47]研究表明:土壤厚度和有机质质量分数是决定土壤供水供肥能力的基础。镇木关健康样地的土层厚度在 5 个沟道中最薄,这直接限制了土壤养分库容与水分调节能力,导致土壤综合指数偏低。然而,镇木关

枯死样地的耦合协调度却略高于健康样地,可能是由于枯死样地电导率显著升高,引发渗透胁迫,降低了土壤水分的有效性,导致林木即使是在土壤含水量较高的情况下也难以有效吸收水分,从而使植被状态急剧下降。此时,土壤与植被均处于较差状态,反而形成一种低水平的同步发展。刘明璐等^[48]在延安新区边坡植被修复中也发现土壤电导率是影响草本植物的存活、竞争与群落构建的关键土壤因子。冒勒其克的枯死样地表现为明显的土壤滞后,即土壤综合指数低于植被综合指数,其原因可能在于该地土壤容重显著增大导致土壤紧实度增加,使降水入渗受阻,难以转化为有效土壤水,从而削弱了土壤对植被的水分与养分支撑能力。这与王皓月等^[49]在九峰山的研究结果相似。下岭南沟健康与枯死样地均维持同步发展型,仅协调度略有下降。该沟道健康与枯死样地间的土壤差异相对较小,枯死原因可能与林分自身的年龄结构老化或种内竞争有关。本研究中干树湾健康样地表现为植被滞后发展,该样地土壤碳氮质量分数虽高,但表层土壤含水率与全磷质量分数均较低,因此,植被生长滞后可能源于水分与磷素的共同限制。磷供应不足制约植被的养分获取效率,而水分缺乏进一步抑制了植物生理活动。这一发现与杨壹等^[26]在贺兰山的研究结果一致,即高海拔青海云杉生长主要受土壤磷限制。中梁子健康样地的耦合协调度为所有样地中最高,但仍处于濒临失调状态。该样地土壤有机碳、全氮质量分数较高,且土层厚度最大,良好的土壤物理结构和养分可能是其相对协调的重要原因。这与徐明等^[21]在黄土丘陵沟谷地的研究结果一致。相比之下,中梁子枯死样地表现为土壤养分的耗竭与水分条件的严重亏缺,该样地土壤全氮、有机碳、铵态氮和硝态氮等养分质量分数均随土层加深而降低;同时各土层的含水率均显著低于健康样地,尤其是深层土壤水分的损耗进一步加剧了土壤干旱^[50-51]。这种水分与养分的双重限制加剧了土壤理化性质的恶化,削弱了水肥供给能力,导致植物生长明显滞后。

综上所述,贺兰山青海云杉的退化是植被与土壤在生境胁迫下通过互馈机制引发的系统性解耦。健康样地虽已处于濒临失调的脆弱水平,但植物仍能与土壤维持全氮、有机碳等养分驱动的协同关系;在枯死样地中盐分累积与土壤物理结构恶化相继出现,系统协调性进一步下降。需要指出的是,本研究基于空间对比数据,未涉及土壤微生物和酶活性等因素。未来应结合长期监测,深入解析青海云杉退化机制,为精准恢复提供理论依据。

4 结论

不同沟道青海云杉枯死样地的土壤理化性质变化具有明显差异,土壤含水率与容重是影响青海云杉生长的主要土壤限制因子。枯死样地土壤容重普遍偏高,土壤紧实化加剧限制了青海云杉的生长发育。土壤全氮、有机碳及速效氮在多数枯死样地中下降,而土壤电导率普遍升高,表明土壤盐分累积与养分耗竭是枯死过程的重要特征。

植被生长与土壤理化因子存在显著相关。健康样地土壤有机碳、全氮等养分因子与林木生长指标呈显著正相关,系统尚维持以碳氮养分驱动的正向协同关系;枯死样地植被-土壤之间的正向关联被削弱,土壤容重、土壤电导率等胁迫因子与生长指标呈负相关。

不同沟道青海云杉植被与土壤耦合协调度整体处于失调状态,不同沟道退化特征呈现明显空间分异。健康样地中,镇木关为土壤滞后型,干树湾为植被滞后型,其余为植被-土壤同步发展型。枯死样地中,镇木关和干树湾为低水平植被-土壤同步发展,冒勒其克为土壤滞后型,中梁子为植被滞后型,下岭南沟模式未发生变化。

5 参考文献

- [1] 马姜明,刘世荣,史作民,等.退化森林生态系统恢复评价研究综述[J]. *生态学报*, 2010, **30**(12): 3297-3303. MA Jiangming, LIU Shirong, SHI Zuoming, *et al.* A review on restoration evaluation studies of degraded forest ecosystem[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(12): 3297-3303. DOI: 10.20103/j.stxb.2010.12.024.
- [2] STANTURF J A, PALIK B J, DUMROESE R K. Contemporary forest restoration: a review emphasizing function[J]. *Forest Ecology and Management*, 2014, **331**: 292-323. DOI: 10.1016/j.foreco.2014.07.029.
- [3] 何正盛.退化森林生态系统恢复与重建的基本理论及其应用[J]. *重庆教育学院学报*, 2003, **16**(3): 59-62. HE Zhengsheng. Basic theory and application of restoration and reconstruction of degraded forest ecosystem[J]. *Journal of*

- Chongqing College of Education*, 2003, **16**(3): 59–62. DOI: [10.3969/j.issn.1008-6390.2003.03.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-6390.2003.03.017).
- [4] 尹振良, 冯起, 王凌阁, 等. 2000—2019 年中国西北地区植被覆盖变化及其影响因子[J]. *中国沙漠*, 2022, **42**(4): 11–21. YIN Zhenliang, FENG Qi, WANG Lingge, *et al.* Vegetation coverage change and its influencing factors across the northwest region of China during 2000–2019[J]. *Journal of Desert Research*, 2022, **42**(4): 11–21. DOI: [10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00200](https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00200).
- [5] 余延娣, 杨晓渊, 马丽, 等. 退化高寒草甸植物群落和土壤特征及其相互关系研究[J]. *草地学报*, 2021, **29**(增刊): 62–71. SHE Yandi, YANG Xiaoyuan, MA Li, *et al.* Study on the characteristics and interrelationship of plant community and soil in degraded alpine meadow[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, **29**(S1): 62–71. DOI: [10.11733/j.issn.1007-0435.2021.Z1.008](https://doi.org/10.11733/j.issn.1007-0435.2021.Z1.008).
- [6] 刘学敏, 罗久富, 陈德朝, 等. 若尔盖高原不同退化程度草地植物种群生态位特征[J]. *浙江农林大学学报*, 2019, **36**(2): 289–297. LIU Xuemin, LUO Jiufu, CHEN Dechao, *et al.* Floristic assembly and dominant population niches in degraded grasslands on the Zoigê Plateau[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2019, **36**(2): 289–297. DOI: [10.11833/j.issn.2095-0756.2019.02.010](https://doi.org/10.11833/j.issn.2095-0756.2019.02.010).
- [7] 王玉琴, 尹亚丽, 李世雄. 不同退化程度高寒草甸土壤理化性质及酶活性分析[J]. *生态环境学报*, 2019, **28**(6): 1108–1116. WANG Yuqin, YIN Yali, LI Shixiong. Physicochemical properties and enzymatic activities of alpine meadow at different degradation degrees[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2019, **28**(6): 1108–1116. DOI: [10.16258/j.cnki.1674-5906.2019.06.005](https://doi.org/10.16258/j.cnki.1674-5906.2019.06.005).
- [8] 李林芝, 张德罡, 马源, 等. 不同退化程度高寒草甸土壤团聚体养分及生态化学计量特征研究[J]. *草业学报*, 2023, **32**(8): 48–60. LI Linzhi, ZHANG Degang, MA Yuan, *et al.* Ecological stoichiometry characteristics of soil aggregates in alpine meadows with differing degrees of degradation[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, **32**(8): 48–60. DOI: [10.11686/cyxb2022483](https://doi.org/10.11686/cyxb2022483).
- [9] 张骞, 马丽, 张中华, 等. 青藏高原高寒区退化草地生态恢复: 退化现状、恢复措施、效应与展望[J]. *生态学报*, 2019, **39**(20): 7441–7451. ZHANG Qian, MA Li, ZHANG Zhonghua, *et al.* Ecological restoration of degraded grassland in Qinghai-Tibet alpine region: degradation status, restoration measures, effects and prospects[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(20): 7441–7451. DOI: [10.5846/stxb201908301803](https://doi.org/10.5846/stxb201908301803).
- [10] 姚宝辉, 王缠, 张倩, 等. 甘南高寒草甸退化过程中土壤理化性质和微生物数量动态变化[J]. *水土保持学报*, 2019, **33**(3): 138–145. YAO Baohui, WANG Chan, ZHANG Qian, *et al.* Dynamic characteristics of soil physicochemical properties and microbial quantity during the degradation of Gannan alpine meadow[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, **33**(3): 138–145. DOI: [10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.03.021](https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.03.021).
- [11] 孙玉, 杨永胜, 何琦, 等. 三江源高寒草甸水源涵养功能及土壤理化性质对退化程度的响应[J]. *草业学报*, 2023, **32**(6): 16–29. SUN Yu, YANG Yongsheng, HE Qi, *et al.* Responses of soil water conservation function and soil physicochemical properties to a range of degradation conditions in alpine meadows of the Three River Headwater Region[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, **32**(6): 16–29. DOI: [10.11686/cyxb2022292](https://doi.org/10.11686/cyxb2022292).
- [12] 杨永胜, 张莉, 未亚西, 等. 退化程度对三江源泽库高寒草甸土壤理化性质及持水能力的影响[J]. *中国草地学报*, 2017, **39**(5): 54–61. YANG Yongsheng, ZHANG Li, WEI Yaxi, *et al.* Effects of degradation degree on soil physicochemical properties and soil water-holding capacity in Zeku alpine meadow in the headwater region of three rivers in China[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2017, **39**(5): 54–61. DOI: [10.16742/j.zgcdxb.2017-05-08](https://doi.org/10.16742/j.zgcdxb.2017-05-08).
- [13] 其曼古丽·帕拉提, 刘丹, 毛军, 等. 不同退化程度高寒草地土壤碳氮磷含量及生态化学计量特征[J]. *生态学杂志*, 2024, **43**(6): 1612–1620. Qimanguli · Palati, LIU Dan, MAO Jun, *et al.* Contents and eco-stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in alpine grasslands with different degradation degrees[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, **43**(6): 1612–1620. DOI: [10.13292/j.1000-4890.202406.031](https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.202406.031).
- [14] PAN Tao, HOU Shuai, LIU Yujie, *et al.* Influence of degradation on soil water availability in an alpine swamp meadow on the eastern edge of the Tibetan Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **722**: 137677. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.137677](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137677).
- [15] SUN Libo, CHANG Xiaomin, YU Xinxiao, *et al.* Effect of freeze-thaw processes on soil water transport of farmland in a semi-arid area[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, **252**: 106876. DOI: [10.1016/j.agwat.2021.106876](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106876).
- [16] ZHAO Xinyu, LIU Peiling, FENG Yingjie, *et al.* Changes in soil physico-chemical and microbiological properties during natural succession: a case study in lower subtropical China[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, **13**: 878908. DOI: [10.3389/](https://doi.org/10.3389/)

[fpls.2022.878908](#).

- [17] KANG Hongzhang, GAO Huanhuan, YU Wenjuan, *et al.* Changes in soil microbial community structure and function after afforestation depend on species and age: case study in a subtropical alluvial island[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **625**: 1423–1432. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2017.12.180](#).
- [18] SCANLON B R, JOLLY I, SOPHOCLEOUS M, *et al.* Global impacts of conversions from natural to agricultural ecosystems on water resources: quantity versus quality[J]. *Water Resources Research*, 2007, **43**(3): W03437. DOI: [10.1029/2006WR005486](#).
- [19] FENG Lanqian, GUO Mingming, WANG Wenlong, *et al.* Evaluation of the effects of long-term natural and artificial restoration on vegetation characteristics, soil properties and their coupling coordinations[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, **884**: 163828. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2023.163828](#).
- [20] 刘定惠, 杨永春. 区域经济-旅游-生态环境耦合协调度研究——以安徽省为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2011, **20**(7): 892–896. LIU Dinghui, YANG Yongchun. Coupling coordinative degree of regional economy-tourism-ecological environment—a case study of Anhui Province[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, **20**(7): 892–896. DOI: [10.11717/j.issn.1673-1387.2026.01.07](#).
- [21] 徐明, 张健, 刘国彬, 等. 不同植被恢复模式沟谷地植被-土壤系统耦合关系评价[J]. *自然资源学报*, 2016, **31**(12): 2137–2146. XU Ming, ZHANG Jian, LIU Guobin, *et al.* Analysis on vegetation-soil coupling relationship in gullies with different vegetation restoration patterns[J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, **31**(12): 2137–2146. DOI: [10.11849/zrzyxb.2015736](#).
- [22] 刘维福, 蔺楠, 苏显静, 等. 矿区生态修复工程实施期植被状况与土壤质量变化评估: 以陕北三道沟煤矿首采区为例[J]. *中国矿业*, 2025, **34**(3): 327–336. LIU Weifu, LIN Nan, SU Xianjing, *et al.* Assessment of vegetation status and soil quality changes during the implementation period of ecological restoration project in mining areas: a case study of the first mining area of Sandaogou Coal Mine in Northern Shaanxi[J]. *China Mining Magazine*, 2025, **34**(3): 327–336. DOI: [10.12075/j.issn.1004-4051.20242010](#).
- [23] 郭文芳, 李鑫, 陈艳梅, 等. 太行山坡地不同管理措施植被-土壤系统耦合关系[J]. *生态学报*, 2023, **43**(15): 6170–6181. GUO Wenfang, LI Xin, CHEN Yanmei, *et al.* Evaluation of the coupling relationship between vegetation and soil system under different management measures in Taihang Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(15): 6170–6181. DOI: [10.5846/stxb202210062825](#).
- [24] 李豪, 卢纪元, 魏天兴, 等. 陕北黄土高原不同微地形下植被-土壤系统耦合特征研究[J]. *四川农业大学学报*, 2019, **37**(2): 192–198, 214. LI Hao, LU Jiyan, WEI Tianxing, *et al.* Evaluation on coupling characteristics of vegetation and soil systems under different microrelief in Loess Plateau of Northern Shaanxi Province[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2019, **37**(2): 192–198, 214. DOI: [10.16036/j.issn.1000-2650.2019.02.007](#).
- [25] 刘秉儒. 贺兰山东坡典型植物群落土壤微生物量碳、氮沿海拔梯度的变化特征[J]. *生态环境学报*, 2010, **19**(4): 883–888. LIU Bingru. Changes in soil microbial biomass carbon and nitrogen under typical plant communities along an altitudinal gradient in east side of Helan Mountain[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, **19**(4): 883–888.
- [26] 杨壹, 邱开阳, 朱亚超, 等. 贺兰山中段不同海拔青海云杉林非根和根围土壤生态化学计量特征及影响因素[J]. *生态学报*, 2023, **43**(19): 7974–7986. YANG Yi, QIU Kaiyang, ZHU Yachao, *et al.* Soil ecological stoichiometric and its influencing factors of bulk soil and ectorhizosphere soil in *Picea crassifolia* forest along an elevation gradient in the middle of Helan Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(19): 7974–7986. DOI: [10.20103/j.stxb.202206281841](#).
- [27] 张万儒. 森林土壤定位研究方法[M]. 北京: 中国林业出版社, 1986: 30–60. ZHANG Wanru. *Research Method of Forest Soil Location*[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1986: 30–60.
- [28] 杨慧琴, 向涌旗, 吕倩, 等. 3种混交林造林初期土壤真菌群落结构特征[J]. *生态学报*, 2024, **44**(8): 3360–3371. YANG Huiqin, XIANG Yongqi, LÜ Qian, *et al.* A comparative study on the soil fungal community structure across three mixed forests at the initial stage of afforestation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, **44**(8): 3360–3371. DOI: [10.20103/j.stxb.202309041912](#).
- [29] 张艳, 赵廷宁, 史常青, 等. 坡面植被恢复过程中植被与土壤特征评价[J]. *农业工程学报*, 2013, **29**(3): 124–131. ZHANG Yan, ZHAO Tingning, SHI Changqing, *et al.* Evaluation of vegetation and soil characteristics during slope vegetation recovery procedure[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, **29**(3): 124–131.

DOI: [10.3969/j.issn.1002-6819.2013.03.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6819.2013.03.017).

- [30] 于明含, 孙保平, 胡生君, 等. 退耕还林地结构与生态功能的耦合关系[J]. *生态学报*, 2014, **34**(17): 4991–4998. YU Minghan, SUN Baoping, HU Shengjun, *et al.* Modeling the degree of coupling and interaction between forest structure and ecological function in a grain for green project, Shanxi, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(17): 4991–4998. DOI: [10.5846/stxb201301010007](https://doi.org/10.5846/stxb201301010007).
- [31] 濮阳雪华, 王月玲, 赵志杰, 等. 陕北黄土区不同植被恢复模式植被与土壤耦合关系研究[J]. *草业学报*, 2021, **30**(5): 13–24. PUYANG Xuehua, WANG Yueling, ZHAO Zhijie, *et al.* Coupling relationships between vegetation and soil in different vegetation restoration models in the Loess Region of Northern Shaanxi Province[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, **30**(5): 13–24. DOI: [10.11686/cyxb2020458](https://doi.org/10.11686/cyxb2020458).
- [32] 白一茹, 阮晓晗, 包维斌, 等. 宁南山区坡面不同土地利用方式下植被-土壤耦合关系评价[J]. *水土保持研究*, 2021, **28**(4): 251–258. BAI Yiru, RUAN Xiaohan, BAO Weibin, *et al.* Evaluation on coupling of vegetation and soil on slopes of mountain area in southern Ningxia[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, **28**(4): 251–258. DOI: [10.13869/j.cnki.rswc.2021.04.029](https://doi.org/10.13869/j.cnki.rswc.2021.04.029).
- [33] 李小雁. 干旱地区土壤-植被-水文耦合、响应与适应机制[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, **41**(12): 1721–1730. LI Xiaoyan. Coupling, response and adaptation mechanism of soil-vegetation-hydrology in arid areas[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2011, **41**(12): 1721–1730.
- [34] 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 等. 喀斯特峰丛洼地退耕还林还草工程的植被土壤耦合协调度模型[J]. *农业工程学报*, 2011, **27**(9): 305–310. PENG Wanxia, SONG Tongqing, ZENG Fuping, *et al.* Models of vegetation and soil coupling coordinative degree in grain for green project in depressions between karst hills[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, **27**(9): 305–310. DOI: [10.3969/j.issn.1002-6819.2011.09.053](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6819.2011.09.053).
- [35] 于洋, 卫伟, 陈利顶, 等. 黄土丘陵区坡面整地和植被耦合下的土壤水分特征[J]. *生态学报*, 2016, **36**(11): 3441–3449. YU Yang, WEI Wei, CHEN Liding, *et al.* Coupling effects of different land preparation and vegetation on soil moisture characteristics in a semi-arid Loess Hilly Region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(11): 3441–3449. DOI: [10.5846/stxb201505050911](https://doi.org/10.5846/stxb201505050911).
- [36] 王一博, 王根绪, 张春敏, 等. 高寒植被生态系统变化对土壤物理化学性状的影响[J]. *冰川冻土*, 2007, **29**(6): 921–927. WANG Yibo, WANG Genxu, ZHANG Chunmin, *et al.* Response of soil physicochemical properties to the changes of the vegetation ecosystem on the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, **29**(6): 921–927. DOI: [10.3969/j.issn.1000-0240.2007.06.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0240.2007.06.011).
- [37] 陈玫妃, 曾辉, 王钧. 青藏高原高寒草地土壤水分生态特征研究现状[J]. 中国草地学报, 2015, **37**(2): 94–101. CHEN Meifei, ZENG Hui, WANG Jun. Research progress in the ecological characteristics of soil water in alpine grasslands on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2015, **37**(2): 94–101.
- [38] JIAO Feng, WEN Zhongming, AN Shaoshan. Changes in soil properties across a chronosequence of vegetation restoration on the Loess Plateau of China[J]. *CATENA*, 2011, **86**(2): 110–116. DOI: [10.1016/j.catena.2011.03.001](https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.03.001).
- [39] 王明慧, 黄来明, 陈翠柏. 西藏高寒区不同土地利用方式下土壤持水能力差异及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2022, **33**(12): 3287–3293. WANG Minghui, HUANG Laiming, CHEN Cuibai. Difference in soil water holding capacity and the influencing factors under different land use types in the alpine region of Tibet, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, **33**(12): 3287–3293. DOI: [10.13287/j.1001-9332.202212.012](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202212.012).
- [40] 杨益, 牛得草, 文海燕, 等. 贺兰山不同海拔土壤颗粒有机碳、氮特征[J]. *草业学报*, 2012, **21**(3): 54–60. YANG Yi, NIU Decao, WEN Haiyan, *et al.* Responses of soil particulate organic carbon and nitrogen along an altitudinal gradient on the Helan Mountain, Inner Mongolia[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, **21**(3): 54–60.
- [41] 高峻, 何春霞, 张劲松, 等. 太行山干瘠山地土壤厚度空间变异及草灌群落分布特征[J]. *生态学报*, 2020, **40**(6): 2080–2089. GAO Jun, HE Chunxia, ZHANG Jinsong, *et al.* Spatial variability of soil thickness and the distribution characteristics of herb and shrub communities in the arid and barren areas of Taihang Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(6): 2080–2089. DOI: [10.5846/stxb201710181872](https://doi.org/10.5846/stxb201710181872).
- [42] GARCÍA-ANGULO D, HERES A M, FERNÁNDEZ-LÓPEZ M, *et al.* Holm oak decline and mortality exacerbates drought effects on soil biogeochemical cycling and soil microbial communities across a climatic gradient[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, **149**: 107921. DOI: [10.1016/j.soilbio.2020.107921](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107921).

- [43] 左巍, 贺康宁, 田赉, 等. 青海高寒区不同林分类型凋落物养分状况及化学计量特征[J]. *生态学杂志*, 2016, **35**(9): 2271–2278. ZUO Wei, HE Kangning, TIAN Yun, *et al.* Surface litter stoichiometry for five forest types in alpine region, Qinghai, China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, **35**(9): 2271–2278. DOI: [10.13292/j.1000-4890.201609.016](https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.201609.016).
- [44] 张雪妮, 杨晓东, 吕光辉. 水盐梯度下荒漠植物多样性格局及其与土壤环境的关系[J]. *生态学报*, 2016, **36**(11): 3206–3215. ZHANG Xueni, YANG Xiaodong, LÜ Guanghui. Diversity patterns and response mechanisms of desert plants to the soil environment along soil water and salinity gradients[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(11): 3206–3215. DOI: [10.5864/stxb20150519082](https://doi.org/10.5864/stxb20150519082).
- [45] 王佳珍, 刘倩, 高娅妮, 等. 植物对盐碱胁迫的响应机制研究进展[J]. *生态学报*, 2017, **37**(16): 5565–5577. WANG Quanzhen, LIU Qian, GAO Yani, *et al.* Review on the mechanisms of the response to salinity-alkalinity stress in plants[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(16): 5565–5577. DOI: [10.5846/stxb201605160941](https://doi.org/10.5846/stxb201605160941).
- [46] 周梦云, 蔡永立, 张瑞峰, 等. 宁夏贺兰山国家级自然保护区建立前后区域生态脆弱性时空格局变化研究[J]. *生态科学*, 2019, **38**(5): 78–85. ZHOU Mengyun, CAI Yongli, ZHANG Ruifeng, *et al.* The tempo-spatial pattern of regional ecological vulnerability before and after the establishment of National Nature Reserve in Helan Mountain of Ningxia[J]. *Ecological Science*, 2019, **38**(5): 78–85. DOI: [10.14108/j.cnki.1008-8873.2019.05.011](https://doi.org/10.14108/j.cnki.1008-8873.2019.05.011).
- [47] 王志强, 刘宝元, 海春兴. 土壤厚度对天然草地植被盖度和生物量的影响[J]. *水土保持学报*, 2007, **21**(4): 164–167. WANG Zhiqiang, LIU Baoyuan, HAI Chunxing. Effects of soil depth on vegetation cover and above ground biomass in east part of Inner Mongolia[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, **21**(4): 164–167. DOI: [10.13870/j.cnki.stbcbx.2007.04.046](https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbcbx.2007.04.046).
- [48] 刘明璐, 戴玉鼎, 朱丹红, 等. 边坡植被修复后草本群落多样性与土壤因子的耦合关系[J]. *森林与环境学报*, 2024, **44**(6): 593–599. LIU Minglu, DAI Yuding, ZHU Danhong, *et al.* Coupling relationship between herbaceous community diversity and soil factors after slope vegetation restoration[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2024, **44**(6): 593–599. DOI: [10.13324/j.cnki.jfcf.2024.06.004](https://doi.org/10.13324/j.cnki.jfcf.2024.06.004).
- [49] 王皓月, 郭月峰, 徐雅洁, 等. 九峰山不同林分类型生态恢复植被-土壤系统耦合关系评价[J]. *生态环境学报*, 2021, **30**(12): 2309–2316. WANG Haoyue, GUO Yuefeng, XU Yajie, *et al.* Coupling relationship between vegetation and soil system in ecological restoration of different stand types in Jiufeng Mountain[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, **30**(12): 2309–2316. DOI: [10.16258/j.cnki.1674-5906.2021.12.005](https://doi.org/10.16258/j.cnki.1674-5906.2021.12.005).
- [50] MAZZACAVALLLO M G, KULMATISKI A. Modelling water uptake provides a new perspective on grass and tree coexistence[J]. *PLoS One*, 2015, **10**(12): e0144300. DOI: [10.1371/journal.pone.0144300](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0144300).
- [51] YANG Z P, ZHANG Q, WANG Y L, *et al.* Spatial and temporal variability of soil properties under *Caragana microphylla* shrubs in the northwestern Shanxi Loess Plateau, China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2011, **75**(6): 538–544. DOI: [10.1016/j.jaridenv.2011.01.007](https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.01.007).