北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

额尔齐斯河流域河谷林叶绿素含量特征及其影响因素

骆美雯 朱威霖 曲梦君 雷训 王文凯 李景文

Characteristics of chlorophyll content of valley forests in the Irtysh River Basin of northwestern China and its influencing factors

Luo Meiwen, Zhu Weilin, Qu Mengjun, Lei Xun, Wang Wenkai, Li Jingwen

引用本文:
骆美雯, 朱威霖, 曲梦君, 雷训, 王文凯, 李景文. 额尔齐斯河流域河谷林叶绿素含量特征及其影响因素[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(10):63–73. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250156
Luo Meiwen, Zhu Weilin, Qu Mengjun, Lei Xun, Wang Wenkai, Li Jingwen. Characteristics of chlorophyll content of valley forests in the Irtysh River Basin of northwestern China and its influencing factors[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(10):63–73. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250156

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250156

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

毛竹叶片叶绿素含量估算模型对比研究
Comparative study on estimation models of chlorophyll content in *Phyllostachys pubescens* leaves
北京林业大学学报, 2023, 45(10): 70–80. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230033

融合多光谱频域特征的坡垒相对叶绿素含量预测
Prediction of relative chlorophyll content in *Hopea hainanensis* based on multispectral frequency domain features
北京林业大学学报, 2023, 45(11): 42–52. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230113

多环芳烃（PAHs）污染土壤中接种平滑白蛋巢菌对蒿柳光合作用的影响
Effects of *Crucibulum laeve* inoculation on photosynthesis of *Salix viminalis* cultivated in PAHs–contaminated soil
北京林业大学学报, 2020, 42(5): 80–87. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190340

太行山南麓栓皮栎人工林光合作用对土壤呼吸的影响
Effects of photosynthesis on soil respiration of *Quercus variabilis* plantation in southern Taihang Mountain of northern China
北京林业大学学报, 2021, 43(1): 66–76. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200010

毛乌素沙地油蒿光合电子传递速率生长季动态及其对环境因子的响应
Temporal dynamics in photosynthetic electron transfer rate of *Artemisia ordosica* in growing season and its response to environmental factors in Mu Us Sandy Land of northwestern China
北京林业大学学报, 2021, 43(2): 54–62. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200154

基于卫星日光诱导叶绿素荧光的中国东部森林物候期估算
Estimation of forest phenology in eastern China based on satellite sunlight–induced chlorophyll fluorescence
北京林业大学学报, 2025, 47(5): 48–58. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240344

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250156

额尔齐斯河流域河谷林叶绿素含量特征及其影响因素

骆美雯 朱威霖 曲梦君 雷 训 王文凯 李景文
（林木资源高效生产全国重点实验室，北京林业大学生态与自然保护学院，北京 100083）

摘要:【目的】探讨额尔齐斯河流域不同地貌类型河谷林叶绿素含量的分异及其环境驱动模式，以期为区域生态适应研究与植被管理提供科学参考。**【方法】**以额尔齐斯河流域河谷林为研究对象，结合气候、土壤、地形等环境因子，利用独立样本 Mann-Whitney 检验分析两种地貌的河谷林叶绿素指标，探讨不同地貌类型河谷林叶绿素含量及环境因素的差异；利用 Spearman 相关分析、冗余分析、方差分解分析以及 partial Mantel 分析，系统地探讨叶绿素含量对气候、土壤和地形因子的响应特征及其协同调控模式。**【结果】**(1)山地河谷林的叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量显著高于山前河谷林，而叶绿素 a/b 差异不显著。山前河谷林处于相对低海拔、低辐射、低干旱程度、高气温的环境，且林中土壤质地较粗、容重较大且偏碱性；山地河谷林处于海拔更高、辐射更强、干旱程度更高而气温更低的环境，且山地河谷林的土壤养分含量和有机质水平更高，整体肥力条件优于山前河谷林。(2)山前河谷林叶绿素含量主要受气候与土壤理化性质的协同调控，以土壤因子为主导；而山地河谷林叶绿素含量主要受地形与土壤质地的耦合影响，以地形因子为主导。气候因子的独立作用在两类地貌类型中均不显著。**【结论】**额尔齐斯河流域不同地貌类型的河谷林叶绿素含量存在差异，叶绿素含量的形成受气候、地形与土壤因子的综合调控，不同地貌类型间的主导驱动模式存在差异，反映出干旱区植被对多维环境梯度的协同响应与生态适应特征。研究结果将为干旱区河谷林光合调控模式及生态适应策略的深入认识提供科学依据，也将为区域生态修复与植被管理提供参考。

关键词：干旱区；河谷林；叶绿素含量；光合作用；生态适应
中图分类号：S757.3 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2025)10−0063−11
引文格式：骆美雯，朱威霖，曲梦君，等. 额尔齐斯河流域河谷林叶绿素含量特征及其影响因素［J］. 北京林业大学学报，2025，47(10)：63−73. Luo Meiwen, Zhu Weilin, Qu Mengjun, et al. Characteristics of chlorophyll content of valley forests in the Irtysh River Basin of northwestern China and its influencing factors[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(10): 63−73.

Characteristics of chlorophyll content of valley forests in the Irtysh River Basin of northwestern China and its influencing factors

Luo Meiwen Zhu Weilin Qu Mengjun Lei Xun Wang Wenkai Li Jingwen
(State Key Laboratory of Efhcient Production of Forest Resources, School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: ［**Objective**］This study investigates the variation in chlorophyll content and its environmental drivers among riparian forests of different topographic types in the Irtysh River Basin, Xinjiang of northwestern China, providing scientific insights for regional ecological adaptation and vegetation management. ［**Method**］This study focused on riparian forests in the Irtysh River Basin, integrating climatic, soil, and topographic factors. The Mann-Whitney U test was employed to analyze the differences in chlorophyll indices between riparian forests of two topographic types, thereby identifying variations in chlorophyll content and environmental conditions. Furthermore, Spearman correlation analysis, redundancy

收稿日期: 2025−04−30 **修回日期:** 2025−05−15
基金项目: 国家自然科学基金项目(32471705)，额尔齐斯河流域生态系统与生物多样性调查项目(2021xjkk0600)。
第一作者: 骆美雯。主要研究方向：恢复生态学。Email：Lmw123@bjfu.edu.cn 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学。
责任作者: 李景文，教授，博士生导师。主要研究方向：恢复生态学和生物多样性。Email: Lijingwenhy@bjfu.edu.cn 地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

analysis (RDA), variation partitioning, and partial Mantel tests were conducted to systematically explore the response characteristics of chlorophyll content to climatic, soil, and topographic factors, as well as their synergistic regulatory patterns. [**Result**] (1) The chlorophyll a, chlorophyll b, and total chlorophyll contents in valley riparian forest were significantly higher than those in plain riparian forests, while the chlorophyll a/b ratio showed no significant difference. The plain riparian forests were characterized by lower elevation, weaker radiation, lower aridity, and higher temperature, with coarser soil texture, higher bulk density, and more alkaline conditions. In contrast, the valley riparian forests were located at higher elevations with stronger radiation, higher aridity, and lower temperature, and their soils contained higher nutrient and organic matter contents, indicating overall better soil fertility. (2) The chlorophyll content in plain riparian forests was primarily regulated by the combined effects of climatic and soil physicochemical factors, with soil playing a dominant role, whereas that in valley riparian forests was mainly influenced by the coupling between topographic and soil texture factors, with topography exerting the greatest effect. The independent contribution of climatic factors was insignificant in both topographic types. [**Conclusion**] The chlorophyll contents of riparian forests across different topographic types in the Irtysh River Basin exhibite significant variation. Its formation is jointly regulated by climatic, topographic, and soil factors, with distinct dominant drivers among topographic types, reflecting the coordinated response and ecological adaptation of vegetation to multidimensional environmental gradients in arid regions. These findings provide a scientific basis for understanding the photosynthetic regulation patterns and ecological adaptation strategies of riparian forests in arid zones and offer valuable guidance for regional ecological restoration and vegetation management.

Key words: arid zone; valley forest; chlorophyll content; photosynthesis; ecological adaptation

叶绿素作为光合作用的重要色素，其含量不仅直接反映植物的光能利用效率和碳固定能力，也是衡量植被生理状态与生态适应能力的重要指标[1−2]。尽管已有研究[2−3]广泛关注森林与草地生态系统中的叶绿素含量特征，但对于干旱区，尤其是河谷林生态系统的相关研究仍相对薄弱。干旱区河谷林作为水陆生态系统的重要过渡带，在维系区域生态平衡、水源涵养与碳循环中发挥着关键作用[4]。然而，该区域生态环境脆弱，水分资源匮乏，植被覆盖度低，植被对环境变化尤为敏感[5−6]。额尔齐斯河流域位于中国西北干旱区，沿河分布的天然林类型多样，根据地形差异可划分为山前河谷林与山地河谷林[7]。山前河谷林主要分布于地势平缓的低海拔平原区域，其典型植被群落为落叶阔叶林。而山地河谷林则集中发育于低山丘陵地带的山谷及河岸区域，植被组成以落叶阔叶林与针阔混交林为主[8]。两类河谷林环境中存在的差异，导致其植被组成及生态功能表现出不同的适应性策略。同时，相较于西北干旱区，河谷林通常具有较高的植被覆盖度和光合活性，可显著提升区域的群落稳定性、碳固定能力与生态服务价值[9−10]。因此，研究干旱区河谷林的叶绿素含量，不仅可以揭示植物对光照、地形、干旱等环境因子的响应模式，还能有效识别不同生态位植物的光合策略，进而为河谷林的生态适应性评价及其管理提供理论支撑。

近年来的研究[11−12]表明，气候条件、土壤养分等环境因素是影响叶绿素含量的关键因素。光合有效辐射通过影响植物叶片内的黄酮类化合物来保护细胞内某些组织，这可能会导致叶绿素合成的原料库不足，合成叶绿素的资源减少，叶绿素含量降低[13]。Zhang 等[6]关于北半球草地叶绿素含量研究表明，叶绿素浓度和叶绿素 a/b 与年平均气温呈正相关，即在生境平均温度较低的情况下，叶绿素含量通常较低。除此之外，叶绿素的合成和降解涉及复杂的生化反应。土壤特性，如基本理化性质和养分含量等，作为植物生长的基础也会影响植物叶绿素含量[14]。例如，在土壤水分受限的情况下，植物通过降低自身的叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量，同时增加体内的抗氧化酶和脂质过氧化的活性以增强抗旱性，干旱胁迫复水后则能够促进叶绿素的合成[15−16]。土壤含盐量和含水率对土壤的电导率影响相对较大，二者过高或者过低均会导致植物细胞内活性氧的聚集，从而特异性的破坏叶绿素 a[17]。有研究[18]表明，土壤颗粒组成也会影响植物叶绿素含量。另外，植物叶绿素含量还会受到土壤养分可利用性的影响。例如，土壤有机碳可以提高土壤中的碳氮比，促进叶绿素合成，进而提高植物光合作用效率[18]。氮作为叶绿素的重要组成部分，能够提高叶绿素含量[19]。除此之外，磷也参与植株叶绿体的构成及能量代谢、光合同化力的形成及转化、光合产物的合成及运输等。

例如，叶绿素含量随土壤有效磷含量增加呈先上升后下降趋势[20]。因此，有必要探究干旱区河谷林叶绿素含量的影响因素，这有助于揭示其光合适应策略与环境响应模式，为河谷林生态系统的功能评估和科学管理提供数据支持。

本研究基于第三次新疆综合科学考察数据，以不同地貌类型的河谷林（山前河谷林与山地河谷林）为研究对象，综合气候、地形及土壤等多种因素，揭示河谷林的叶绿素含量特征及其影响因素，旨在解决以下科学问题：（1）不同地貌类型河谷林的叶绿素含量（叶绿素 a、b、a + b 含量）及叶绿素 a/b 比值是否存在显著差异？（2）气候、土壤和地貌类型对河谷林叶绿素含量影响的相对贡献率是怎样的？在山前河谷林和山地河谷林之间是否有差异？研究结果对于干旱区典型生态系统的结构优化、生态功能维持及退化河谷林的科学修复具有重要的理论意义与实践价值。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究地点

研究区位于新疆北部额尔齐斯河流域（46°55′～49°10′N，85°30′～90°30′E），发源于中国阿尔泰山东南坡，是唯一流入北冰洋的国际河流，在中国全长 633 km，流域面积为 45 300 km^2。额尔齐斯河流域属温带半干旱荒漠大陆性气候，沿河两岸有大面积天然林群落。这些天然河谷林主要由分布呈斑块状的杨柳科（Salicaceae）物种组成，并且依据群落物种组成、优势树种和地貌类型的差异可分为山前河谷林和山地河谷林，其土壤以森林草甸土壤为主，母质一般由粉砂壤土组成。该区域灌木数量稀少，如铃铛刺（*Caragana halodendron*）和阿尔泰山楂（*Crataegus altaica*），草本植物主要由甘草（*Glycyrrhiza uralensis*）、苦豆子（*Sophora alopecuroides*）、草地早熟禾（*Poa pratensis*）等组成。

1.2　研究方法

1.2.1　样点设置与调查采样

本研究于 2022 年 6—7 月生长季，选取山前河谷林和山地河谷林两种地貌的典型天然河谷林进行野外调查。依据不同地貌类型的河谷林分布面积，在山前河谷林选择 20 个样点，在山地河谷林选择 9 个样点，共设置 29 个样点。依据方精云等[21]的标准，在每个样点设置 3～5 个 20 m × 30 m 的样方以展开植物群落调查和土壤采样工作。另外，在每个调查样点采集优势植物的叶片样品，用于后续的植物叶绿素含量的测定。所选植物在每个样地内的累积盖度达到了 80%，以确保获取的植物为优势物种。本研究共采集了 67 个物种的 138 个种群的叶片，每个样点记录了地理数据（经纬度和海拔）和植物物种组成信息。

1.2.2　叶绿素含量的测定

每个物种随机选择 3～5 个健康个体，每株个体采集植株上部的完全展开、暴露在阳光下且无病虫害的叶片，每个样点内每个物种共收集 20～30 片。对同一物种采集的叶片进行充分混合后，从中随机选取 3 片，去除表面附着的土壤及其他杂质并清洗干净。称取 0.1 g 鲜叶，置于预先装有 95% 乙醇的离心管中，并在低温避光条件下保存备用。采用经典的分光光度法对叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a/b、总叶绿素含量进行测定[22]。

1.2.3　土壤样品采集与分析

采用内径 6 cm 的土钻在每个样方内随机采集 0～20 cm 深度的土壤样品，并多次重复取样，每个样方用土钻取 20～30 份土，剔除砾石及植物残体等杂质后，将采集好的样品混合均匀并分成两份，一份用于土壤含水量的计算，另一份过 2 mm 土壤筛后，用于土壤理化性质的测定。采用烘干法测定土壤含水量，环刀法测定土壤容重；土壤 pH 采用 pH 计测定，水土比 1∶2.5；土壤电导率采用电导率仪进行测定，水土比 1∶5；土壤有机碳含量采用重铬酸钾–浓硫酸外加热法测定；土壤全氮含量采用硫酸–催化剂消解法测定；铵态氮含量、硝态氮含量采用氯化钾浸提法测定；土壤全磷含量采用 NaOH 熔融法–钼锑抗比色法测定；土壤有效磷含量采用碳酸氢钠浸提–钼锑抗分光光度法测定；土壤黏粒体积比、粉粒体积比和砂粒体积比采用英国 Mastersizer 3000 激光粒度仪进行测定。计算每个样点各项理化性质指标的平均值，以此代表该样地的土壤理化性质水平。

1.2.4　气候数据收集

每个样点的年平均气温以及年平均降水数据来源于 WorldClim 数据库（https://www.worldclim.org），根据样点地理坐标，提取年均温、年降水量。光合有效辐射来源于 Ren 等[23]共享的辐射数据集。每个样点的潜在蒸发散和干燥度指数从第三版全球干旱指数和潜在蒸发散数据库（Global-AI_PET_v3）中获取[24]。

1.2.5　数据分析

首先，采用独立样本 Mann-Whitney 检验分析两种地貌的河谷林叶绿素指标的差异，以及土壤性质、气候因素等的差异，了解两种地貌间的基础特征。其次，采用 Spearman 相关分析检验叶绿素指标与单一环境因子之间的相关性，明确影响叶绿素指标变化的关键环境因子及其作用方向。在此基础上，利用冗余分析（RDA）在多因子条件下综合评估气候、

地形及土壤因子对叶绿素指标的综合作用，并通过前向选择与 Monte–Carlo 检验筛选出显著影响变量。之后，基于 RDA 的结果进行方差分解分析，以量化不同维度对叶绿素指标的独立与交互解释率，从而明确各因子组的相对贡献。最后，通过 partial Mantel 分析在控制其他因子组的条件下检验单一因子组的独立效应，以进一步验证气候、土壤和地形因子在不同地貌类型中的主导作用。本研究所用的数据分析软件为 ArcGIS 10.7、R4.3.1、SPSS 25.0、Canoco 5 等，作图软件为 Origin 2024 和 Adobe Illustrator 2022。

2 结果与分析

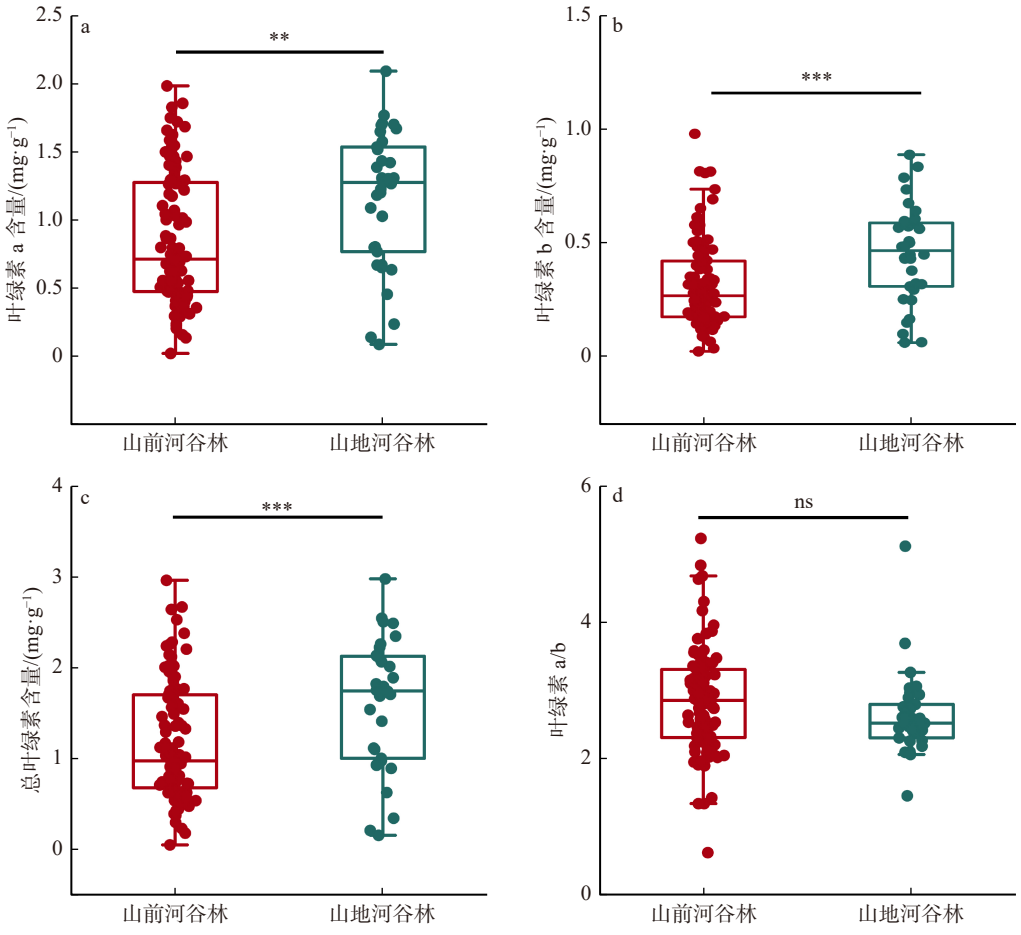
2.1 不同地貌类型河谷林叶绿素含量及环境因素的差异

地貌类型对河谷林的叶绿素含量及比例具有重要影响。山地河谷林的叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量以及总叶绿素含量均显著高于山前河谷林；山地河谷林的叶绿素 a/b 比值同样高于山前河谷林，但差异不显著（$P > 0.05$，图 1）。

山前河谷林和山地河谷林的地形、气候及土壤因子存在一定差异。山地河谷林的海拔、光合有效辐射和干旱指数显著高于山前河谷林（$P < 0.05$）；山前河谷林的年均温和潜在蒸发散显著高于山地河谷林（$P < 0.05$）；而年降水量在不同地貌类型的河谷林之间不存在显著差异（$P > 0.05$）（表 1），表明山地河谷林处于海拔更高、辐射更强、干旱程度更高而气温更低的环境，山前河谷林处于相对低海拔、低辐射、低干旱程度、高气温的环境。在土壤理化性质方面，山前河谷林的土壤粉粒体积比、土壤砂粒体积比、土壤容重、土壤电导率和 pH 显著高于山地河谷林，而土壤全磷含量、土壤有机碳含量、全氮含量、硝态氮和铵态氮含量与之相反。由此可知，山前河谷林中土壤的质地较粗、容重较大且偏碱性，而山地河谷林的土壤养分及有效养分含量更高。

2.2 不同地貌类型河谷林叶绿素含量的影响因素

不同地貌类型河谷林叶绿素含量与环境因子的 Sperman 相关性分析表明，不同地貌类型河谷林的叶绿素含量对环境因子的响应存在显著空间异质性。在山前河谷林中，叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量及总



表示在 $P < 0.01$ 水平上差异显著，*表示在 $P < 0.001$ 水平上差异显著，ns 表示差异不显著。下同。

图 1 额尔齐斯河流域天然河谷林不同地貌类型之间叶绿素含量及其组分比例的差异

Fig. 1 Differences in chlorophyll content and component ratios among topographic types in natural riparian forests of the Irtysh River Basin

表 1　不同地貌类型河谷林的环境因子

Tab. 1　Environmental factors in valley forests of different topographic types

指标	山前河谷林	山地河谷林
海拔/m	507.39 ± 10.88b	969.67 ± 36.13a
年均温/℃	5.29 ± 0.06a	2.06 ± 0.27b
年降水量/mm	181.18 ± 4.80a	184.98 ± 7.07a
干旱指数	0.13 ± 0.00b	0.16 ± 0.08a
潜在蒸发散/($mm \cdot d^{-1}$)	1 370.66 ± 3.31a	1 170.94 ± 18.24b
光合有效辐射/($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	2 237.15 ± 1.73b	2 252.53 ± 4.32a
土壤电导率/($\mu S \cdot cm^{-1}$)	0.61 ± 0.08a	0.17 ± 0.03b
土壤含水量/%	0.21 ± 0.01a	0.20 ± 0.00a
土壤黏粒体积比/%	22.52 ± 0.80a	22.43 ± 0.53a
土壤粉粒体积比/%	46.56 ± 2.35a	40.89 ± 1.01b
土壤砂粒体积比/%	39.61 ± 0.92a	36.74 ± 0.74b
土壤容重/($g \cdot m^{-3}$)	1.50 ± 0.05a	1.35 ± 0.01b
pH	7.93 ± 0.10a	7.19 ± 0.17b
土壤有机碳含量/($g \cdot kg^{-1}$)	15.79 ± 0.85b	27.58 ± 4.51a
土壤全氮含量/($g \cdot kg^{-1}$)	1.34 ± 0.07b	2.22 ± 0.37a
土壤全磷含量/($g \cdot kg^{-1}$)	0.69 ± 0.02b	0.92 ± 0.02a
土壤有效磷含量/($mg \cdot kg^{-1}$)	10.01 ± 0.60a	9.55 ± 1.82a
土壤铵态氮含量/($mg \cdot kg^{-1}$)	0.72 ± 0.02b	1.81 ± 0.54a
土壤硝态氮含量/($mg \cdot kg^{-1}$)	28.99 ± 1.21b	46.46 ± 5.56a

注：不同小写字母表示差异显著（$P < 0.05$）。

叶绿素含量与年降水量、干旱指数、土壤粉粒体积比及土壤容重呈显著正相关关系，与年均温、潜在蒸发散、光合有效辐射、土壤砂粒体积比以及 pH 呈显著负相关关系，叶绿素 b 含量还与土壤电导率和土壤硝态氮含量呈显著负相关关系，叶绿素 a/b 与土壤黏粒体积比和土壤砂粒体积比呈显著负相关关系（表 2）。

相较之下，山地河谷林的叶绿素含量响应模式呈现差异化特征（表 3）。叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量及总叶绿素含量与土壤粉粒体积比呈显著正相关关系，与土壤黏粒体积比呈显著负相关关系；叶绿素 a 含量、总叶绿素含量与土壤砂粒体积比和潜在蒸发散显著负相关，而叶绿素 a 含量与土壤有机碳含量和土壤全氮含量呈显著正相关关系。值得注意的是，叶绿素 a/b 未与任何环境因子呈现显著相关性。

综合以上结果发现，在山前河谷林中，叶绿素含量主要与气候和土壤理化性质存在一定的相关性，而在山地河谷林中，叶绿素含量主要与土壤质地和养分状况相关。

基于 RDA 分析的山前河谷林植物叶绿素含量与环境因子关系研究表明：前两轴（RDA1 和 RDA2）分别贡献 31.2% 和 8.3%；pH、潜在蒸发散、年均温、年降水量、光合有效辐射、土壤砂粒体积比及土壤含水量是影响山前河谷林叶绿素含量的关键因子（$P < 0.05$）（图 2a）。基于 RDA 分析的山地河谷林植物叶绿素含量与环境因子关系研究表明：前两轴（RDA1 和 RDA2）分别贡献 31.5% 和 20.5%。其中，海拔、土壤电导率、土壤含水量、土壤黏粒体积比及土壤粉粒体积比是显著影响叶绿素含量的环境因子（$P < 0.05$）（图 2b）。以上结果进一步证明了山前河谷林的叶绿素含量主要受气候条件和土壤理化性质影响，而山地河谷林的叶绿素含量主要受地形和土壤质地特征影响。

2.3　不同地貌类型河谷林气候、土壤、地形因子对叶绿素含量的影响

通过方差分解分析进一步量化不同地貌类型河谷林气候、土壤、地形因子对各叶绿素含量指标的影响。在山前河谷林（图 3a ~ d）中，海拔、年降水量、土壤理化性质和土壤养分含量共同解释了叶绿素 a、b 含量，总叶绿素含量以及叶绿素 a/b 4 个叶绿素含量指标的标准效应值变异的 27.8%、21.9%、27.0% 和 3.6%。其中海拔因子对于 4 个叶绿素含量指标标准效应的解释贡献率均为 0.0%，年降水量对 4 个叶绿素含量指标的标准效应的解释贡献率分别为

表 2 山前河谷林中叶绿素含量及组分比例与环境因子的 Spearman 相关系数

Tab. 2 Spearman correlation coefficients between chlorophyll content, compositional ratios, and environmental factors in plain riparian forest

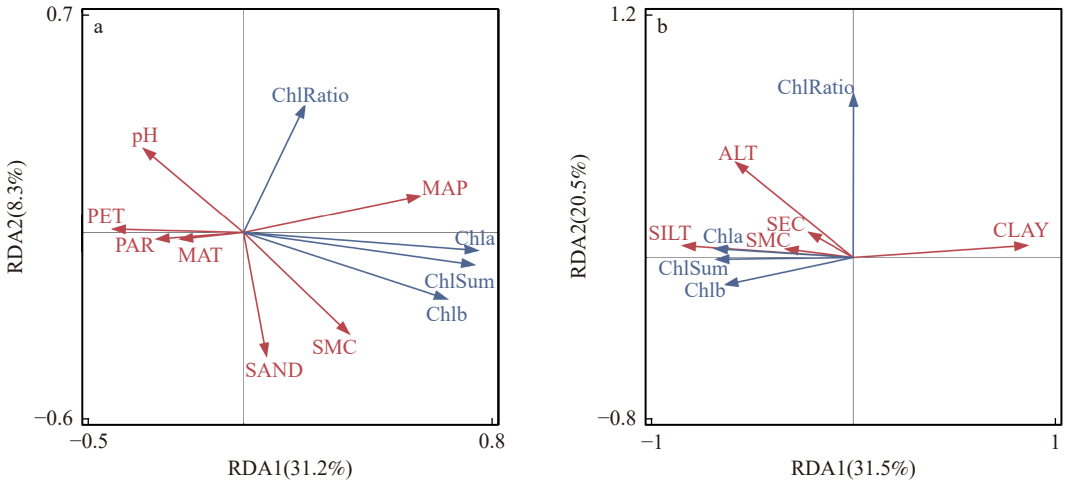
环境因子	叶绿素a	叶绿素b	总叶绿素含量	叶绿素a/b
海拔	−0.045	−0.077	−0.059	0.024
年均温	−0.240*	−0.194*	−0.221*	−0.070
年降水量	0.323**	0.284**	0.312**	0.137
干旱指数	0.384**	0.356**	0.376**	0.105
潜在蒸发散	−0.331**	−0.305**	−0.320**	−0.085
光合有效辐射	−0.267**	−0.279**	−0.277**	−0.067
土壤电导率	−0.175	−0.225*	−0.180	0.083
土壤含水量	−0.073	−0.080	−0.068	0.009
土壤黏粒体积比	0.080	0.113	0.077	−0.207*
土壤粉粒体积比	0.370**	0.294**	0.354**	0.174
土壤砂粒体积比	−0.281**	−0.206*	−0.261**	−0.238*
土壤容重	0.478**	0.407**	0.463**	0.140
pH	−0.201*	−0.232*	−0.207*	0.070
土壤有机碳含量	0.041	0.051	0.037	−0.091
土壤全氮含量	0.040	0.057	0.037	−0.124
土壤全磷含量	0.052	0.098	0.057	−0.163
土壤有效磷含量	0.029	0.088	0.052	−0.065
土壤铵态氮含量	−0.011	−0.002	−0.019	0.032
土壤硝态氮含量	−0.180	−0.209*	−0.182	0.094

注：**表示在$P < 0.01$水平上差异显，*表示在$P < 0.05$水平上差异显著。下同。

表 3 山地河谷林中叶绿素含量及组分比例与环境因子的 Spearman 相关系数

Tab. 3 Spearman correlation coefficients between chlorophyll content, compositional ratios, and environmental factors in valley riparian forest

环境因子	叶绿素a	叶绿素b	总叶绿素含量	叶绿素a/b
海拔	0.296	0.208	0.264	0.182
年均温	−0.313	−0.207	−0.281	−0.226
年降水量	−0.108	−0.153	−0.120	0.023
干旱指数	−0.120	−0.173	−0.136	0.044
潜在蒸发散	−0.387*	−0.273	−0.349*	−0.191
光合有效辐射	0.314	0.321	0.312	0.093
土壤电导率	−0.058	−0.066	−0.060	0.145
土壤含水量	0.085	0.013	0.064	0.039
土壤黏粒体积比	−0.560**	−0.588**	−0.569**	0.044
土壤粉粒体积比	0.504**	0.437**	0.489**	0.189
土壤砂粒体积比	−0.363*	−0.305	−0.354*	−0.174
土壤容重	0.190	0.172	0.186	0.128
pH	0.071	0.091	0.063	0.135
土壤有机碳含量	0.353*	0.246	0.316	0.230
土壤全氮含量	0.365*	0.260	0.333	0.238
土壤全磷含量	−0.224	−0.313	−0.242	0.142
土壤有效磷含量	0.021	−0.021	0.004	0.143
土壤铵态氮含量	0.110	0.066	0.105	−0.028
土壤硝态氮含量	0.102	0.025	0.075	0.229



Chla. 叶绿素 a 含量；Chlb. 叶绿素 b 含量；ChlSum. 总叶绿素含量；ChlRatio. 叶绿素 a/b 比值；ALT. 海拔；PET. 潜在蒸发散；MAT. 年均温；MAP. 年降水量；PAR. 光合有效辐射；pH. 土壤酸碱度；SMC. 土壤含水量；SEC. 土壤电导率；SILT. 土壤粉粒体积比；CLAY. 土壤黏粒体积比；SAND. 土壤砂粒体积比。图中呈现的均为具有显著影响的因子。

图 2　额尔齐斯河流域山前河谷林(a)和山地河谷林(b)叶绿素含量与环境因子的冗余分析

Fig. 2　Redundancy analysis of chlorophyll content of plain riparian forest (a) and valley riparian forest (b) in the Irtysh River Basin in relation to environmental factors

15.8%、6.3%、13.3% 和 2.9%，土壤养分含量对 4 个叶绿素含量指标的标准效应的解释贡献率分别为 2.6%、3.0%、2.9% 和 0.0%，土壤理化性质对 4 个叶绿素含量指标的标准效应的解释贡献率分别为 9.5%、12.5%、10.7% 和 0.7%。

而在山地河谷林(图 3e ~ h)中，海拔、年降水量、土壤理化性质和土壤养分含量共同解释了叶绿素 a、b 含量，总叶绿素含量以及叶绿素 a/b 4 个叶绿素含量指标的标准效应值变异的 31.2%、29.0%、29.6% 和 54.9%。其中海拔因子对于 4 个叶绿素含量指标的标准效应的解释贡献率分别为 7.0%、3.1%、5.7% 和 30.4%，年降水量对 4 个叶绿素含量指标的标准效应的解释贡献率均为 0.0%，土壤养分含量对 4 个叶绿素含量指标的标准效应的解释贡献率分别为 3.7%、0.0%、1.3% 和 5.7%，土壤理化性质对 4 个叶绿素含量指标的标准效应的解释贡献率分别为 20.5%、25.9%、22.6% 和 18.9%。

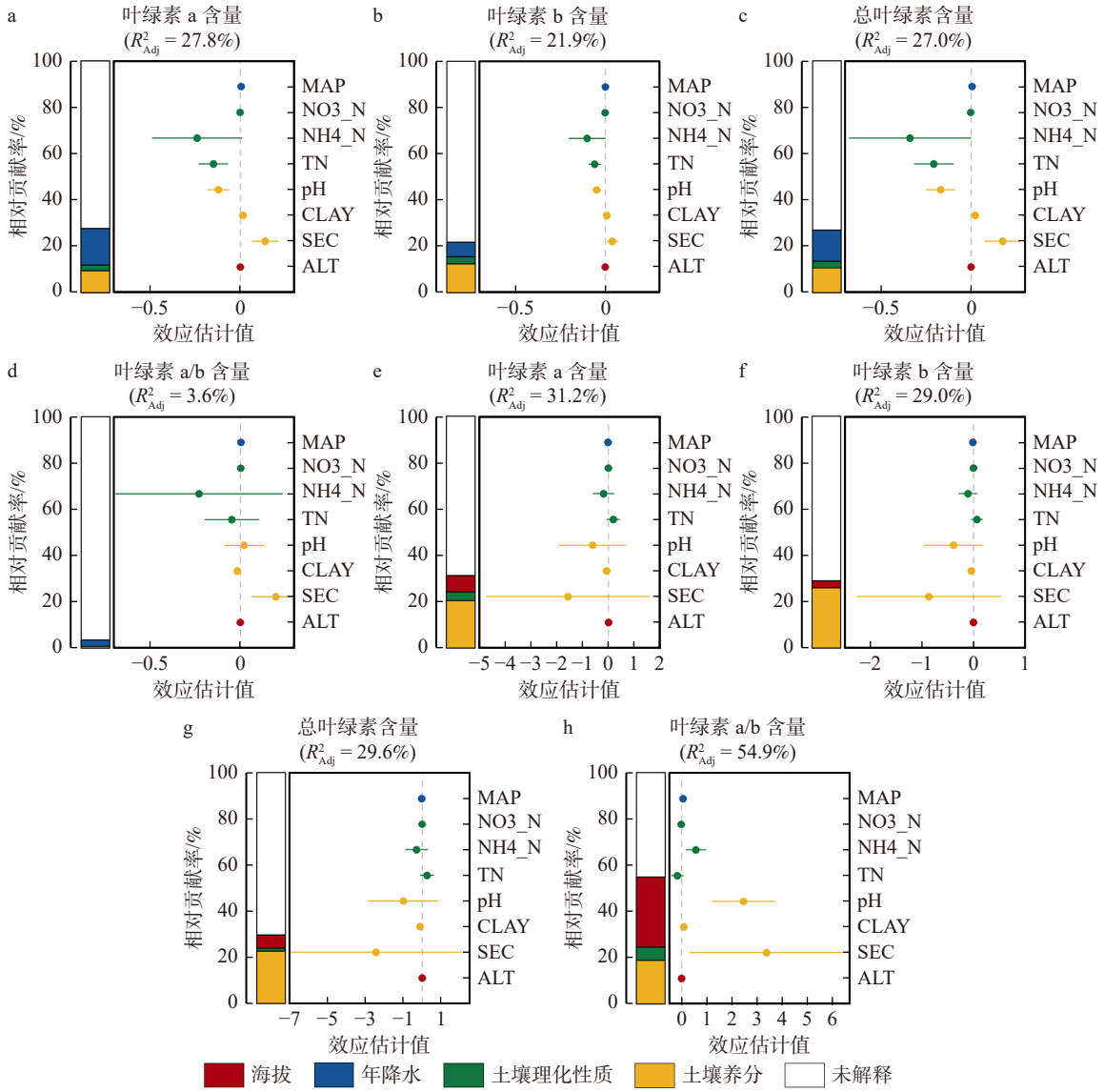
由此可知，山前河谷林中，叶绿素含量的差异主要由气候因子和土壤理化性质共同解释；而山地河谷林中，叶绿素含量的差异主要由地形因子和土壤理化性质共同解释，且对叶绿素 a/b 比值的解释度最高。

通过 partial Mantel 分析，本研究揭示了山前河谷林与山地河谷林叶绿素含量对气候、土壤及地形因子的响应差异(表 4)。在山前河谷林中，在控制土壤因子和地形因子的情况下，气候因子对叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量和总叶绿素含量呈微弱正相关，但均不显著($P > 0.05$)；在控制气候因子和地形因子的情况下，土壤因子对叶绿素 b 含量具有独立显著正向驱动作用($P < 0.05$)；在控制气候因子和土壤因子的情况下，地形因子对各项叶绿素指标的驱动作用均不显著($P > 0.05$)。而在山地河谷林中，在控制土壤因子和地形因子的情况下，气候因子对 4 个叶绿素指标均呈负向关联，但并不显著($P > 0.05$)；土壤因子的独立作用整体较弱，对叶绿素指标均呈弱正相关；地形因子对叶绿素各项指标均表现出显著正向影响($P < 0.05$)。

3　讨　　论

3.1　不同地貌类型河谷林叶绿素含量及环境因子的差异

地貌类型是影响额尔齐斯河流域河谷林生态系统环境梯度与植被分布格局的重要因子，其通过影响土壤发育程度和养分积累状况，间接影响植物的生理代谢与光合特征，如叶绿素含量及组分比例。山前河谷林广泛分布于山前平原地区的河漫滩和低阶地，山地河谷林分布于沟谷地区，山地河谷林的海拔显著高于山前河谷林，光合有效辐射也显著高于山前河谷林。这一条件使得山地河谷林的光系统 II 的电子传递效率提升，促进了叶绿素合成。较高的总叶绿素含量表明植物在强光环境下仍保持较高的光能吸收潜力。已有研究[25]指出，耐光植物可通过叶绿体沿背斜细胞壁重新分布的方式调节光吸收面积，从而在维持较高叶绿素水平的同时避免过量光能吸收。值得注意的是，山地河谷林和山前河谷林的叶绿素 a/b 比值未表现出显著差异。这表明在研究区域内，不同地貌类型的河谷林植物维持了相对



ALT. 海拔；SEC. 土壤电导率；CLAY. 土壤黏粒体积比；pH. 土壤酸碱度；TN. 土壤全氮含量；NH4_N. 土壤铵态氮含量；NO3_N. 土壤铵态氮含量；MAP. 年降水量；R^2_{Adj} 为总解释贡献率。

图 3 额尔齐斯河流域山前河谷林(a～d)和山地河谷林(e～h)中环境因子对叶绿素含量的解释贡献率

Fig. 3 Explanatory contribution rates of environmental factors to chlorophyll content in plain (a–d) and valley (e–h) riparian forests of the Irtysh River Basin

表 4 气候因子、土壤因子和地形因子对山前河谷林和山地河谷林叶绿素含量的影响

Tab. 4 Effects of climate factors, soil factors, and terrain factors on chlorophyll contents in piedmont valley forests and mountain valley forests

地貌类型	叶绿素指标	气候因子(控制土壤和地形因子)	土壤因子(控制气候和地形因子)	地形因子(控制气候和土壤因子)
山前河谷林	叶绿素a	0.080	0.053	0.001
	叶绿素b	0.028	0.091*	0.008
	总叶绿素含量	0.073	0.061	0.010
	叶绿素a/b	−0.010	−0.019	−0.080
山地河谷林	叶绿素a	−0.072	−0.079	0.303**
	叶绿素b	−0.102	−0.063	0.282*
	总叶绿素含量	−0.082	−0.070	0.295**
	叶绿素a/b	−0.050	−0.066	0.221*

稳定的捕光复合体配置，能够适应不同光环境或养分条件，以保障光合作用效率的基本平衡[26]。

另外，地形可影响河谷林局地气候的温度、光合有效辐射及水分条件。有研究[27−28]表明，地形能够在某些环境中调节水热条件。山地河谷林由于地形狭窄、山体遮挡，能够降低风速、提高环境湿度，从而使得山地河谷林具有较低的潜在蒸发散和年均温。较低的温度可减缓呼吸作用速率，减少光合产物的呼吸消耗，较低的蒸散需求有助于缓解水分胁迫，两者共同作用以维持叶绿体结构与功能的稳定性。值得注意的是，年降水量在两种地貌类型之间无显著差异，说明干旱区河谷林的植被生长更多依赖河流水和地下水。

地形和气候的差异还会引起土壤性质的变化，进而影响叶绿素含量。本研究发现，山前河谷林表现出较高的粉粒体积比、砂粒体积比、土壤 pH 以及土壤容重，这一差异可能影响平原地区植物根系发育和水分渗透，从而影响植物吸收养分的能力，导致叶绿素含量比较低。山前河谷林表现出较低的土壤全氮、硝态氮、铵态氮含量，氮素是叶绿素分析的核心部分，其富集可能直接促进叶绿素合成，这一差异说明山地河谷林中土壤氮素供应能力较强，促进了叶绿素的合成和光合效率的提升。有研究[29]表明，氮元素的存在可以提高植物光合作用的干旱阈值从而提高植物的抗旱性，干旱胁迫所导致的植物光合作用的减弱可以通过添加氮来缓解。因此，额尔齐斯河流域河谷林植物可能受到氮元素的限制。此外，土壤有效磷含量无显著差异表明山地河谷林土壤磷的有效性可能受低温或 pH 限制，而山地河谷林土壤全磷含量较高，可能通过增强 ATP 合成间接支持叶绿素代谢。

3.2　环境因子对不同地貌类型河谷林叶绿素含量的影响

叶绿素含量受气候、地形和土壤等多种环境因子的综合调控，不同地貌类型间的主导驱动因子差异显著。在山地河谷林中，叶绿素含量的变化主要受地形与土壤耦合因素控制。冗余分析结果显示，海拔、土壤电导率、黏粒体积比及粉粒体积比是决定叶绿素含量空间差异的关键变量。方差分解结果进一步量化了地形和土壤对叶绿素差异的主要贡献，表明高海拔带来的温差、强辐射和低压环境对植物光合系统的塑造作用更为显著。较强的辐射促进了光合系统 II 的激发，但山地河谷林中较低的气温和较高的空气湿度有助于降低蒸散压力，从而在强光环境下维持叶绿素结构稳定性。土壤养分含量与有机质水平较高，也为光合色素合成提供了必要的物质基础。因此，山地河谷林植被通过“地形−土壤调控模式”实现了光能利用效率与生理稳态的平衡，体现出对复杂微气候环境的高适应性。这一特征与已有关于地形—气候关系的研究结果[30]一致，指出只有在地形起伏显著的区域，地形因子才对局地气候形成有效调控。

与山地河谷林相比，山前河谷林位于相对低海拔、低辐射、低干旱程度而高温的环境中，叶绿素含量整体较低。Spearman 相关分析表明气候水分可利用性是限制叶绿素形成的关键因素。与此同时，土壤质地较粗、容重较大导致保水性较差，加剧了干旱胁迫效应。方差分解与 partial Mantel 分析结果表明，土壤因子在山前河谷林中对叶绿素 b 含量具有显著独立驱动作用，这可能源于土壤结构与根际微环境对捕光复合体稳定性的直接影响。已有研究[31]指出，叶绿素 b 在胁迫条件下的变化幅度通常大于叶绿素 a，因而更能反映植物的光合调节与环境敏感性。总体而言，山前河谷林表现为典型的“气候−土壤调控模式”，植物通过调节叶绿素组分比例与光能吸收策略来应对水分亏缺和高温胁迫。

3.3　不同地貌类型河谷林植物的生态策略差异与适应性意义

生物体在不同环境中通过调整资源分配和生理机制，以适应多变的生态条件，实现生存与繁殖的最优化[32−33]。本研究结果表明，山前河谷林植物叶绿素 a、b 及总叶绿素含量主要受降水和土壤养分共同驱动，表现出以提升光合色素总量为特征的“资源积累型”生态策略，表现为在资源供给有限条件下，通过提升光合色素水平以增强光合潜力，进而在群落竞争中占据优势。相比之下，山地河谷林植物更倾向于采取“资源优化型”策略。方差分解分析显示，环境因子对山地河谷林叶绿素 a/b 比值的变异解释率高于其他色素指标，且主要受海拔和土壤物理性质影响。这表明在地形复杂、水热条件波动大、土壤养分空间异质性显著的山地环境中，植物通过调控叶绿素 a 与 b 含量的比例，而非单纯增加色素含量，以优化光谱吸收和能量转化效率，更好地适应小气候变化。在实践应用方面，多因子协同驱动模式对研究地区生态管理具有重要指导价值。山地河谷林中高叶绿素含量表明其具备更高的初级生产力，因此在今后的生态管理中要严格保护其地形完整性与水源连通性。而山前河谷林植物表现出的光适应可塑性表明，在河漫滩修复中应优先选择叶绿素 b 响应敏感的乡土树种，如银灰杨（*Populus canescens*）、额河杨（*Populus* × *berolinensis* var. *jrtyschensis*），以增强重建群落的光环境适应能力。

4 结　　论

本研究以额尔齐斯河流域不同地貌类型(山前河谷林与山地河谷林)为研究对象，针对干旱区河谷林叶绿素含量空间差异及其环境驱动模式尚不明确的问题，综合运用多种多变量统计方法，系统探讨了气候、地形与土壤因子对叶绿素含量的影响差异。研究得到以下结论。

(1)在山前河谷林中，植物叶绿素 a、b 及总叶绿素含量显著低于山地河谷林，叶绿素 a/b 比值差异不显著。

(2)山前河谷林叶绿素含量及其组分主要受气候−土壤因子的协同调控，而山地河谷林主要受地形−土壤因子的调控，表明了干旱区叶绿素含量及其组分存在多因子耦合效应。

研究结果揭示了干旱区河谷林叶绿素含量的空间分异规律及其多因子协同驱动模式，叶绿素含量在山前与山地河谷林间的差异进一步印证了基于地形与群落结构划分的河谷林类型结果，为理解干旱区典型生态系统的光合调控过程与环境适应策略提供了理论支撑，也为区域生态修复与植被管理提供了科学依据。未来研究可进一步考虑群落结构和生物互作对叶绿素含量的影响，以及气候年际波动或季节变化对叶绿素含量的影响，从而更加全面地探究干旱区叶绿素含量的生态策略以及影响模式。

参 考 文 献

[1] Croft H, Chen J M, Luo X, et al. Leaf chlorophyll content as a proxy for leaf photosynthetic capacity[J]. Global Change Biology, 2017, 23(9): 3513−3524.

[2] Li Y, Liu C C, Zhang J H, et al. Variation in leaf chlorophyll concentration from tropical to cold-temperate forests: association with gross primary productivity[J]. Ecological Indicators, 2018, 85: 383−389.

[3] Zhang Y, Li Y, Wang R M, et al. Spatial variation of leaf chlorophyll in northern hemisphere grasslands[J]. Frontiers in Plant Science, 2020, 11: 1244.

[4] 李新荣, 赵洋, 回嵘, 等. 中国干旱区恢复生态学研究进展及趋势评述 [J]. 地理科学进展, 2014, 33(11): 1435−1443.
Li X R, Zhao Y, Hui R, et al. Progress and trend of development of restoration ecology research in the arid regions of China[J]. Progress in Geography, 2014, 33(11): 1435−1443.

[5] Bradford J B, Schlaepfer D R, Lauenroth W K, et al. Shifts in plant functional types have time-dependent and regionally variable impacts on dryland ecosystem water balance[J]. Journal of Ecology, 2014, 102(6): 1408−1418.

[6] Barnes M L, Farella M M, Scott R L, et al. Improved dryland carbon flux predictions with explicit consideration of water-carbon coupling[J]. Communications Earth & Environment, 2021, 2(1): 1−9.

[7] 曲梦君, 雷训, 赵航, 等. 额尔齐斯河流域河谷林种子植物区系特征研究 [J]. 植物科学学报, 2025, 43(1): 41−51.
Qu M J, Lei X, Zhao H, et al. Floristic characteristics of seed plant species in valley forests of the Irtysh River Basin in Xinjiang[J]. Plant Science Journal, 2025, 43(1): 41−51.

[8] 薛志方, 刘彤, 王立生, 等. 额尔齐斯河流域主要支流平原河谷林群落结构及特征 [J]. 植物生态学报, 2024, 48(3): 390.
Xue Z F, Liu T, Wang L S, et al. Community structure and characteristics of plain valley forests in main tributaries of Ertix River Basin[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2024, 48(3): 390.

[9] Murchie E H, Horton P. Acclimation of photosynthesis to irradiance and spectral quality in British plant species: chlorophyll content, photosynthetic capacity and habitat preference[J]. Plant, Cell & Environment, 1997, 20(4): 438−448.

[10] Aishan T, Betz F, Halik Ü, et al. Biomass carbon sequestration potential by riparian Forest in the Tarim River Watershed, northwest China: implication for the mitigation of climate change impact[J]. Forests, 2018, 9(4): 196.

[11] 丁佳, 吴茜, 闫慧, 等. 地形和土壤特性对亚热带常绿阔叶林内植物功能性状的影响 [J]. 生物多样性, 2011, 19(2): 158−167.
Ding J, Wu Q, Yan H, et al. Effects of topographic variations and soil characteristics on plant functional traits in a subtropical evergreen broad-leaved forest[J]. Biodiversity Science, 2011, 19(2): 158−167.

[12] 吴新辉, 郭钰滢, 夏楠, 等. 中国东部城市森林阔叶树种叶绿素含量空间特征及其影响因素 [J]. 北京师范大学学报 (自然科学版), 2022, 58(6): 910−916.
Wu X H, Guo Y Y, Xia N, et al. Spatial patterns and drivers of leaf chlorophyll content of broad-leaved woody plants across urban forests in eastern China[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2022, 58(6): 910−916.

[13] He Y Y, Pan L, Yang T, et al. Metabolomic and confocal laser scanning microscopy (CLSM) analyses reveal the important function of flavonoids in *Amygdalus pedunculata* Pall. leaves with temporal changes[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 648277.

[14] Oldroyd G E D, Leyser O. A plant's diet, surviving in a variable nutrient environment[J]. Science, 2020, 368: eaba0196.

[15] Yuan X K, Yang Z Q, Li Y X, et al. Effects of different levels of water stress on leaf photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities of greenhouse tomato[J]. Photosynthetica, 2016, 54(1): 28−39.

[16] Cooper K. Recovery of the resurrection plant *Craterostigma wilmsii* from desiccation: protection versus repair[J]. Journal of Experimental Botany, 2002, 53(375): 1805−1813.

[17] 梁永富, 王康才, 隋利, 等. Ca^{2+} 对高温强光胁迫下多花黄精抗逆生理和光合特性的影响 [J]. 生态学杂志, 2018, 37(8): 2345−2353.
Liang Y F, Wang K C, Sui L, et al. Effects of calcium on stress-resistance physiology and photosynthesis of *Polygonatum*

cyrtonema Hua under high temperature and strong light stress[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(8): 2345−2353.

[18] 郑宁, 李素英, 王鑫厅, 等. 基于环境因子对叶绿素影响的典型草原植物生活型优势研究 [J]. 植物生态学报, 2022, 46(8): 951−960.
Zheng N, Li S Y, Wang X T, et al. Dominance of different plant life forms in the typical steppe evidenced from impacts of environmental factors on chlorophyll[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2022, 46(8): 951−960.

[19] 陈鑫, 焦婷, 牧仁, 等. 氮添加对高寒人工草地垂穗披碱草(*Elymus nutans*)生长及光合特性的影响 [J]. 草地学报, 2022, 30(8): 1964−1971.
Chen X, Jiao T, Mu R, et al. Effects of nitrogen addition on growth and photosynthetic characteristics of *Elymus nutans* in alpine artificial grassland[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(8): 1964−1971.

[20] 吴楚, 王政权, 孙海龙, 等. 氮磷供给对长白落叶松叶绿素合成、叶绿素荧光和光合速率的影响 [J]. 林业科学, 2005, 41(4): 31−36.
Wu C, Wang Z Q, Sun H L, et al. Effects of different concentrations of nitrogen and phosphorus on chlorophyll biosynthesis, chlorophyll a fluorescence, and photosynthetic rate in *Larix olgensis* seedlings[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2005, 41(4): 31−36.

[21] 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 等. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范 [J]. 生物多样性, 2009, 17(6): 533−548.
Fang J Y, Wang X P, Shen Z H, et al. Methods and protocols for plant community inventory[J]. Biodiversity Science, 2009, 17(6): 533−548.

[22] Mackinney G. Absorption of light by chlorophyll solutions[J]. Journal of Biological Chemistry, 1941, 140(2): 315−322.

[23] Ren X, He H, Zhang L, et al. Global radiation, photosynthetically active radiation, and the diffuse component dataset of China, 1981–2010[J]. Earth System Science Data, 2018, 10(3): 1217−1226.

[24] Zomer R J, Xu J, Trabucco A. version 3 of the global aridity index and potential evapotranspiration database[J]. Scientific Data, 2022, 9(1): 409.

[25] Zhang M, Ming Y, Wang H B, et al. Strategies for adaptation to high light in plants[J]. aBIOTECH, 2024, 5(3): 381−393.

[26] Kitajima K, Hogan K P. Increases of chlorophyll a/b ratios during acclimation of tropical woody seedlings to nitrogen limitation and high light[J]. Plant, Cell & Environment, 2003, 26(6): 857−865.

[27] 王文玉, 张强, 阳伏林. 半干旱榆中地区最小有效降水量及降水转化率的研究 [J]. 气象学报, 2013, 71(5): 952−961.
Wang W Y, Zhang Q, Yang F L. Study of the minimum available precipitation and the precipitation conversion rate in the semi-arid Yuzhong region[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2013, 71(5): 952−961.

[28] 蒋文君, 康银红, 陈瑶, 等. 不同覆盖方式对土壤水热分布的影响 [J]. 土壤通报, 2022, 53(1): 74−80.
Jiang W J, Kang Y H, Chen Y, et al. The Influence of different mulching methods on the distribution of soil water and heat[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(1): 74−80.

[29] Groszmann M, Osborn H L, Evans J R. Carbon dioxide and water transport through plant aquaporins[J]. Plant, Cell & Environment, 2017, 40(6): 938−961.

[30] Körner C. The use of “altitude” in ecological research[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2007, 22(11): 569−574.

[31] Esteban R, Barrutia O, Artetxe U, et al. Internal and external factors affecting photosynthetic pigment composition in plants: a meta-analytical approach[J]. New Phytologist, 2015, 206(1): 268−280.

[32] Fontanari J F, Matos M, Santos M. Local adaptation, phenotypic plasticity, and species coexistence[J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 2023, 11: 1077374.

[33] 张晓龙, 吴梦迪, 吴秋堂, 等. 克隆植物对异质生境的适应对策研究进展 [J]. 生态学报, 2022, 42(10): 4255−4266.
Zhang X L, Wu M D, Wu Q T, et al. Reviewing the adaptation strategies of clonal plants to heterogeneous habitats[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(10): 4255−4266.

（责任编辑　赵田芸
责任编委　臧润国）