

土壤水分梯度和刈割频次对鄱阳湖蘆草的影响¹

李子如^{1,2}, 王晨溪^{2,3}, 夏少霞^{2,3**}, 于秀波^{2,3}

(1: 北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083)

(2: 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101)

(3: 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100190)

摘要: 鄱阳湖是东亚-澳大利西亚候鸟迁飞路线上最为关键的水鸟越冬栖息地之一。蘆草 (*Carex spp.*) 作为鄱阳湖湿地的优势植物, 是越冬雁类主要的食物来源, 其生长状况直接影响雁类的取食效率与能量获取。然而, 近年来受水利工程建设和极端天气频发等因素影响, 鄱阳湖的水文节律发生显著变化, 进而干扰了蘆草的生长动态, 导致其与越冬雁类迁徙时间节律发生错配。刈割作为草地生态系统中常见的管理手段, 可刺激植物再生, 调节生长节律, 在一定程度上可以缓解食物资源错配问题, 改善越冬雁类的觅食条件。本研究以鄱阳湖洲滩蘆草为研究对象, 通过野外原位实验, 在秋冬季选择洲滩出露蘆草, 在不同土壤含水量区域设置不同的刈割频次, 进行长期管理和监测。结果表明, 土壤含水量升高显著促进蘆草株高和地上生物量积累, 但地下生物量仅在刈割 15 天后的低水分梯度下最高; 多次刈割显著抑制株高和地上生物量, 且削弱土壤水分的促进作用, 使不同水分梯度下的生长指标趋于一致。研究表明, 土壤水分梯度和刈割频次都对蘆草的株高、地上生物量和地下生物量有着显著的影响, 且高土壤水分梯度 (土壤含水量 $\geq 33.79\%$)、低强度刈割 (刈割频次 ≤ 4 次) 条件下蘆草的生长状况最佳。本研究为鄱阳湖湿地越冬水鸟栖息地管理提供了可量化的水分调控与刈割频次参数。

关键词: 鄱阳湖; 蘆草; 刈割; 频次; 土壤水分梯度; 栖息地管理; 全球气候变化

Effects of Soil Moisture Gradient and Mowing Frequency on *Carex* in Lake Poyang¹

Li Ziru^{1,2}, Wang Chenxi^{2,3}, Xia Shaoxia^{2,3*}, Yu Xiubo^{2,3}

(1: School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

(2: Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

(3: College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Lake Poyang, a critical wintering habitat for water birds along the East Asian–Australasian Flyway, supports *Carex* spp. as the dominant wetland plant and primary food source for overwintering geese, with its growth directly influencing foraging efficiency and energy intake. Recent alterations to the hydrological regime of Lake Poyang due to hydraulic engineering and extreme climatic events have disrupted *Carex* growth dynamics, resulting in a phenological mismatch with the migration schedule of wintering geese. Mowing, a common grassland management practice, can promote plant regrowth and modulate growth

* 2025-07-02 收稿; 2025-08-26 收修改稿。

国家重点研发计划 (2022YFC3204104)、国家自然科学基金项目 (42171105) 联合资助。

**通讯作者: 夏少霞 E-mail: xiasx@igsrr.ac.cn

rhythms, thereby partially mitigating food resource mismatch and improving foraging conditions for geese. This study conducted a field experiment on exposed *Carex* in the Lake Poyang floodplains during autumn and winter, applying different mowing frequencies across gradients of soil moisture under long-term management and monitoring. Results demonstrated that increased soil moisture significantly enhanced plant height and aboveground biomass, while belowground biomass peaked only under low soil moisture conditions 15 days after mowing. Repeated mowing significantly suppressed plant height and aboveground biomass and attenuated the promotive effect of soil moisture, leading to convergence of growth indicators across moisture gradients. Both soil moisture gradient and mowing frequency significantly influenced plant height, aboveground biomass, and belowground biomass of *Carex*, with optimal growth observed under high soil moisture ($\geq 33.79\%$) and low mowing intensity (≤ 4 times). These findings offer quantifiable parameters for water regulation and mowing frequency to support the management of wintering waterbird habitats in Lake Poyang wetlands.

Keywords: Lake Poyang; *Carex spp.*; Mowing; Frequency; Soil moisture gradient; Habitat management; Global climate change

湿地作为地球上最具生态价值的生态系统之一，具有涵养水源、调节气候、保护生物多样性、净化水质等多种关键生态功能^[1]，对全球生态系统的稳定和人类可持续发展具有不可替代的意义^[2]。鄱阳湖位于长江中下游，是中国最大的淡水湖和国际重要湿地，其典型的水文节律维系着复杂的湿地生态系统结构，支撑了丰富的生物多样性^{[4][5][6]}。作为东亚-澳大利西亚迁飞通道上的核心越冬地，鄱阳湖为大量迁徙水鸟提供了关键的栖息地和充足的食物资源^{[7][8]}，拥有举足轻重的生态地位。然而，近年来在气候变化与水利工程调控的双重作用下，鄱阳湖的水文节律发生显著改变，表现为水位波动异常、枯水期提前、干旱频发等现象。这些变化不仅影响了湿地整体结构与功能，还打破了植物群落的分布格局和物候节律^{[9][11]}。

藁草属 (*Carex L.*) 隶属于被子植物门禾本目莎草科，为多年生地下根状茎草本，以强大的无性繁殖能力适应湿地水文动态变化^{[12][12]}。灰化藁草 (*Carex cinerascens*) 凭借其固有的种群生活史策略和强大的无性繁殖能力，分布广泛且生物量丰富，成为鄱阳湖植被群落的建群种和优势种^[13]。它不仅是越冬雁类的重要食物来源，更为迁徙水鸟提供了关键的觅食和栖息环境^[15]。藁草生长对退水时间和淹水持续时间等高度敏感，持续性过湿或过早均可能显著抑制其生长^[15-17]。近年来，枯水期显著提前，洲滩裸露时间延长，导致藁草提前萌发、生长加快，其生长高峰早于候鸟到达期，形成“物候错配”，影响水鸟取食效率与栖息行为^[18]。

刈割作为草地生态系统中常用的植物管理措施，可以有效调节植被生长、维持生物多样性和改善土壤理化性质^{[21][22]}，近年来在湿地保护实践中逐渐应用^[23]。适当刈割可清除老化植被、促进新生组织再生，提升植被活力与湿地生产力，从而增强生态系统稳定性^[25]。中度干扰理论指出，适度的外部干扰可通过刺激植物补偿生长与资源再分配，有效促进植物多样性和适应能力^{[26][27]}。此外，刈割作为一种人为可控干预手段，能够有效去除老化植被，刺激藁草再生，提升其营养质量和可食性，有助于缓解藁草物候与水鸟迁徙节律之间的错配，从而为越冬水鸟提供更适宜的觅食条件^[28]。

刈割管理的效果受到多种生态因子共同影响。例如，刈割时间直接影响藁草生物量的积累和再生效果^[32]，适时刈割有助于促进其再生和生物量积累，而不当的刈割时机则可能抑制其生长，降低植物群落生产力。土壤因子如区域水分梯度、微生物群落及微量元素含量等，也会显著影响藁草的生长速度与群落结构^[33]。此外，刈割留茬高度及凋落物管理方式亦是影响其再生能力与群落稳定性的重要因素^[34]。然而，当前关于刈割频次及其与土壤水分梯度交互作用对藁草生长的系统研究仍然不足。深入探讨这些生态因子的交互机制，不仅有助于科学优化湿地刈割管理策略，也对提升湿地生态系统的恢复能力与服务功能具有重要现实意义^[34]。

鉴于此，本研究以鄱阳湖湿地藁草群落为研究对象，通过野外实验分析不同刈割频次和土壤水分梯度下藁草属植物的生长过程。研究结果将为复杂洪泛平原湿地的刈割管理政策提供关键参数，并为湿地生态系统的可持续管理提供理论依据。

1 数据与方法

1.1 研究地概况

鄱阳湖是长江中下游典型的洪泛平原湖泊，具有显著的季节性水位涨落特征。作为目前长江干流仅存的两个仍保持自然水文连通性的通江湖泊之一^[37]，其水文过程直接调控湖区湿地的植被演替格局，并通过影响栖息地的形成和资源的可利用性，对越冬水鸟的季节性活动产生深远影响^[38]。在越冬迁徙水鸟中，雁类是优势种群，主要包括豆雁 (*Anser fabalis*)、白额雁 (*Anser albifrons*)、小白额雁 (*Anser erythropus*)、

灰雁 (*Anser anser*) 等, 其越冬时间为每年秋季 10 月上中旬至次年 3 月^[39]。藁草是鄱阳湖的优势植物群落, 也是白额雁和豆雁等越冬雁类的主要食物资源, 主要分布在中低海拔的洲滩, 其生长条件为湿润土壤, 对高程变化的适应性较强, 适宜的土壤水分条件为 40~80 %^[40]。藁草的繁殖方式包括通过种子进行有性繁殖和通过根系分蘖进行无性繁殖, 后者为鄱阳湖藁草的主要繁殖方式^[41]。藁草每年有两个生长期, 分别在每年退水后 (一般在 9 月和 10 月) 和第二年涨水前 (一般在 2 月和 3 月)。其中秋季退水后生长的藁草为“秋草”, 与雁类迁飞物候期更加匹配, 为越冬雁类的主要食源, 因此本次研究主要以“秋草”为研究对象。

1.2 实验方案

由于越冬水鸟在 10 月迁飞至鄱阳湖, 本研究于 2022 年 9 月开始刈割实验, 实验观测时间为 2022 年 9 月底至 2023 年 1 月初, 基本覆盖雁类越冬时间, 以期为越冬水鸟提供适宜食物资源。在洲滩藁草均匀出露的区域开展原位实验。根据样地与湖岸的水平距离差异, 将研究区域划分为高 (H)、中 (M)、低 (L) 三个土壤水分梯度, 分别代表高、中、低土壤含水量, 并在实验开始前对各梯度土壤的相关物理性质如含水量和温度进行连续测量。

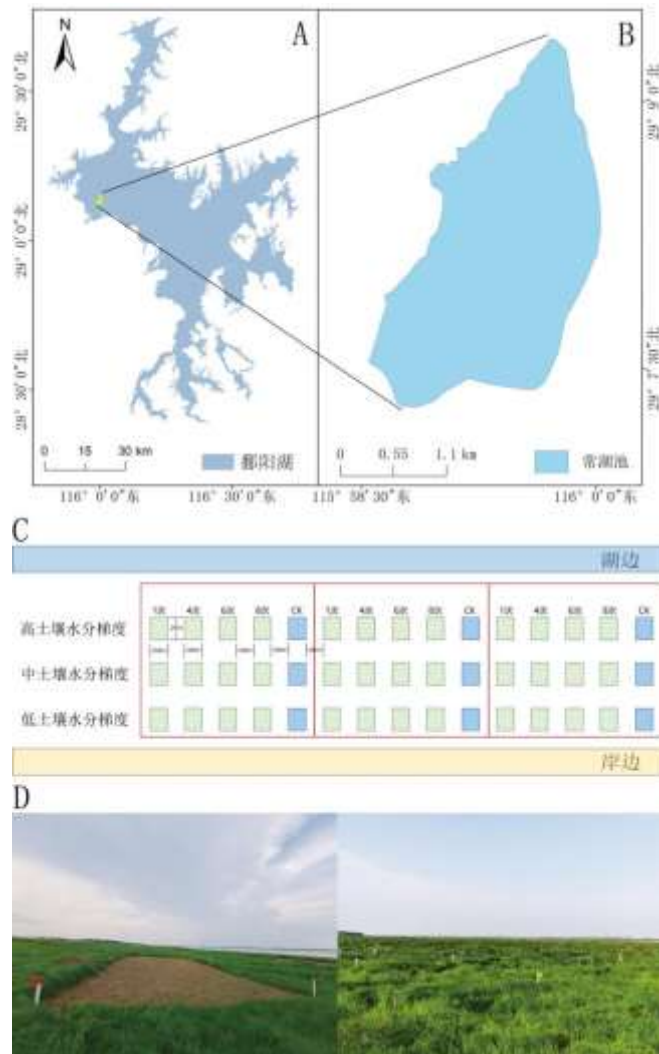


图 1 研究区分布图与实验布设

Fig.1 Distribution map of the study area and experimental layout

注: 1 次, 4 次, 6 次, 8 次, CK 分别代表刈割频次为刈割 1 次, 刈割 4 次, 刈割 6 次, 刈割 8 次, 对照组; A 为鄱阳湖湿地范围, B 为常湖池闸内, C 为研究区实验布设图, D 为样地照片。

Note: 1 time, 4 times, 6 times, 8 times, and CK respectively represent the mowing frequencies of mowing once, mowing four times, mowing six times, mowing eight times, and the control group. A represents the geographical location map of Lake Poyang. B represents the geographical location map of Changhuchi Lake. C represents the experimental layout map of the study area, D represents the photos

of the sample plots.

为最大程度保护周边原生植物群落完整性并避免干扰候鸟越冬活动,本研究采用小型打草机对实验区藁草地上部分进行刈割处理。参考生态位相似的多年生草本植物研究结果,留茬高度控制在约 1 cm,有助于兼顾植被再生能力与胁迫抵抗力^[43]。同时,地表凋落物予以保留,以维持原有生态状态。本研究参考朱莲莲在洞庭湖湿地开展的短尖藁草刈割频次梯度实验设计^[43],并结合越冬雁类的迁徙节律,在每个土壤水分梯度下分别设置 1 次、4 次、6 次和 8 次四个刈割频次处理,同时设置对照处理(CK)。刈割的起始时间和频次的确定依据旨在科学覆盖藁草的生长周期,并与越冬雁类觅食时序相匹配,从而评估不同刈割强度对藁草生长及可食性质量的影响。每个处理均设置三个重复,共计 45 个样方。由于藁草生物量的采集为破坏性采样,为了确保实验数据的数量充足与可靠性,每个样方大小设置为 25 × 25 m,样方与样方之间间距为 20 m,以减少空间干扰(图 1)。为预防雁类取食和动物踩踏等外界因素造成实验误差,在每个样地的周围均设置了网眼尺寸为 60 mm 的网罩,网罩高度为 1m,有效隔离干扰,保障实验环境的稳定性。

不同频次的刈割处理完成 3 天后,藁草已重新萌发,即开始监测与采样工作(附表 4)。每 3~5 天进行一次株高测量(每次随机选取 10 株取平均值),每 15~30 天采集一次地上和地下生物量样品,其中在 25 × 25 cm 的方形样方框内收集全部地上部分,用 10 cm 直径 20 cm 深度的圆柱形取样器收集藁草的全部地下部分。所有的生物量样品经实验室 60 °C 恒温烘干至恒重后称重,通过干重与采样面积换算获得单位面积藁草生物量。监测工作持续至 2023 年 1 月底,此时环境温度低于 10 °C,已不适宜藁草生长,实验在此节点结束。

实验区三个土壤水分梯度土壤特征及藁草生长相应指标的监测次数见表 1。

表 1 样地土壤背景信息及藁草监测指标和次数
Tab.1 Soil background information of the experimental plots and monitoring indicators and frequency for *Carex*

土壤水分梯度	土壤含水量 (%)	土壤温度 (°C)	刈割次数	最后一次刈割日期	株高 (次)	地上生物量 (次)	地下生物量 (次)
低	12.15±2.74	16.00±0.35	1 次	2022/9/9	38	6	6
			4 次	2022/10/9	32	5	5
			6 次	2022/10/29	28	5	5
			8 次	2022/11/19	25	4	4
中	21.25±8.23	14.96±0.15	1 次	2022/9/9	38	6	6
			4 次	2022/10/9	32	5	5
			6 次	2022/10/29	28	5	5
			8 次	2022/11/19	25	4	4
高	45.33±11.54	13.34±0.63	1 次	2022/9/9	38	6	6
			4 次	2022/10/9	32	5	5
			6 次	2022/10/29	28	5	5
			8 次	2022/11/19	25	4	4

1.3 数据处理

1.3.1 刈割藁草株高生长曲线分析方法 基于藁草株高的一元一次线性回归方程^[44]，结合经验知识和实际拟合结果，利用 R 中 stats 包中的 nls() 函数建立了生长天数与株高的非线性回归方程 (logistic 方程, eq.1) 的数学模型^[45]。采用 AIC() 函数验证模型的准确性，采用 f 检验和残差检验检验显著性。采用 ggplot 包进行散点和拟合曲线图的绘制，根据方程的 K 值得到刈割藁草所能生长的最大高度。

$$y = \frac{K}{1 + e^{a-rt}} \quad \text{eq. 1}$$

式中, y 代表植物的株高; K 为环境容纳量最终可达的最大值; a, r 为参数; t 代表时间。

1.3.2 不同刈割处理下藁草各指标的双因素方差分析 利用 R 中 stats 包中的 aov() 函数和 agricolae 包中的 Duncan() 函数^{错误:未找到引用源。}，分别对不同处理的刈割后第 15 天和 45 天的藁草的高度、地上和地下生物量 (满足正态分布和方差齐性) 进行双因素方差分析，并进行事后检验和多重比较。采用 ggplot 包进行分组柱状图的绘制。

2. 结果

2.1 藁草株高变化动态

对照场地中藁草的株高为 34.28 ~ 102.72 cm (附图 1)。不同土壤水分梯度下，对照藁草株高随土壤含水量增加而上升 (附图 2)，但其随时间变化无明显规律 (附图 1)。刈割处理对藁草株高生长有着显著抑制作用。在低土壤水分梯度，藁草株高的变化趋势不符合逻辑斯蒂模型，在观测期内未达到最大值。在中、高土壤含水量条件下，刈割 1 次的藁草最大株高分别为 37.27 cm、43.88 cm；刈割 4 次的藁草最大株高分别为 31.94 cm、96.53 cm、28.18 cm；刈割 8 次的藁草最大株高分别为 13.59 cm、13.16 cm、43.89 cm (图 2，表 2)。除低土壤含水量下刈割 1 次外，不同刈割频次和土壤水分梯度下的藁草株高随时间的变化均呈逻辑斯蒂增长曲线 (表 2)。然而，随着刈割频次增加，藁草最大高度降低，生长速度减慢。而在不同土壤水分梯度下，中、高土壤含水量条件下藁草的株高均高于低含水量条件，但随着刈割频次增加，各土壤水分梯度下的株高逐渐趋于一致。

2.2 刈割频次和土壤水分梯度对藁草株高影响

不同刈割频次下，藁草株高生长存在显著差异 ($p < 0.05$) (表 3)，多次刈割对藁草株高生长具有抑制作用。总体呈现出随着刈割频次增加，藁草的株高逐渐降低 (图 3)。不同土壤水分梯度 (土壤含水量) 下，藁草株高同样存在显著性差异 ($p < 0.05$)，且随着土壤含水量增加，藁草株高显著增加 (图 3，表 3)。然而，土壤水分梯度和刈割频次对藁草株高无显著交互作用 ($p > 0.05$) (表 3)。此外，随着刈割频次增加，不同监测时间下土壤含水量对株高的影响 p 值呈上升趋势，这表明土壤含水量对株高的影响逐渐降低 (附表 1)。相应的，随着刈割频次的增加，不同土壤水分梯度下的株高差异也渐缩小。

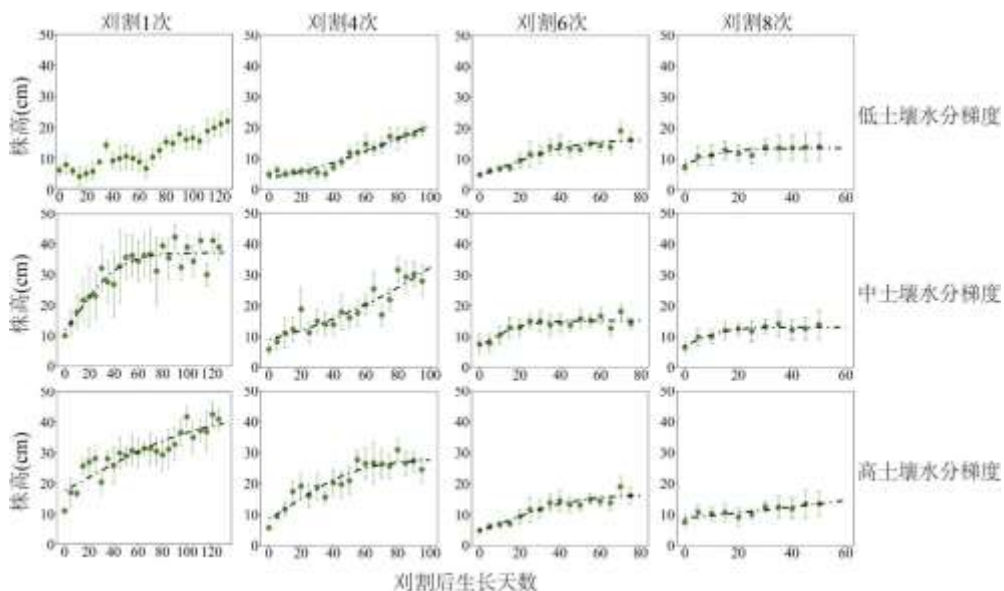


图 2 不同刈割频次和土壤水分梯度下藁草株高变化趋势 (Mean ± SE)

Figure 2 Trends in plant height of *Carex* under different mowing frequencies and soil moisture gradients (Mean ± SE)

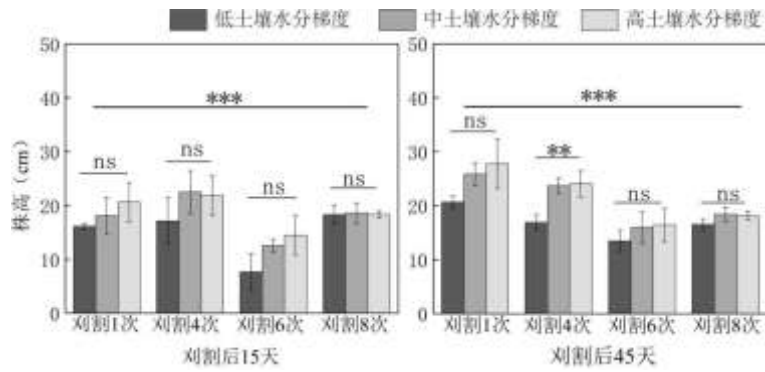


图3 土壤水分梯度和不同刈割频次对藎草株高的双因素分析 (Mean±SE)
Fig. 3 Two-factor analysis of the effect of soil moisture gradient and different mowing frequencies on the growth process of *Carex* plant height (Mean±SE)

表2 株高逻辑斯蒂方程
Table 2 Logistic equation for plant height

刈割次数	土壤水分梯度	逻辑斯蒂模型	最大株高	R ²	p
1次	低	/	/	/	/
	中	Y=37.27/(1+exp(0.77-0.060t))	37.27	0.86	<0.01
	高	Y=43.88/(1+exp(0.39-0.020t))	43.88	0.82	<0.01
4次	低	Y=31.94/(1+exp(2.01-0.026t))	31.94	0.94	<0.01
	中	Y=96.53/(1+exp(2.26-0.016t))	96.53	0.83	<0.01
	高	Y=28.18/(1+exp(0.80-0.048t))	28.18	0.87	<0.01
6次	低	Y=16.54/(1+exp(0.88-0.060t))	13.59	0.90	<0.01
	中	Y=15.26/(1+exp(0.19-0.106t))	13.16	0.80	<0.01
	高	Y=14.43/(1+exp(0.59-0.087t))	43.89	0.76	<0.01
8次	低	Y=13.59/(1+exp(-0.39-0.123t))	13.59	0.82	<0.01
	中	Y=13.16/(1+exp(-0.11-0.137t))	13.16	0.88	<0.01
	高	Y=43.89/(1+exp(1.37-0.011t))	43.89	0.73	<0.01

表3 刈割频次和土壤含水量对藎草株高的影响
Tab.3 Impact of mowing frequency and soil moisture content on the plant height of *Carex*

刈割后天数 (d)	影响因素	III 类平方和	自由度	均方	F	p
15	频次	406.21	3	135.40	15.01	0.000
	土壤含水量	107.42	2	53.71	5.95	0.008
	土壤含水量 * 频次	50.20	6	8.37	0.93	0.493
45	频次	472.59	3	157.53	30.69	0.000
	土壤含水量	157.24	2	78.62	15.32	0.000
	土壤含水量 * 频次	42.92	6	7.15	1.39	0.258

2.3 刈割频次和土壤水分梯度对藎草地上生物量影响

刈割后45天内,对照场地中藎草的地上生物量为42.76~101.17 g/m² (附图2)。无论是对照区还是刈割处理区,不同土壤水分梯度(土壤含水量)下藎草地上生物量均存在显著差异(p<0.05) (表4),且随着土壤含水量的增加,藎草地上生物量逐渐上升(图4,附图2)。不同刈割频次对藎草地上生物量

的影响仅在刈割后 45 天时表现出显著差异 ($p < 0.05$)，且土壤含水量和刈割频次有显著的交互作用 ($p < 0.05$)；而在刈割后 15 天时并无显著性差异 ($p > 0.05$) (表 4)。此外，随着刈割频次增加， p 值也逐渐增加，表明土壤含水量对藁草地上生物量的影响逐渐降低，同时不同土壤水分梯度下的地上生物量差异则逐渐趋同 (图 4，附表 2)。

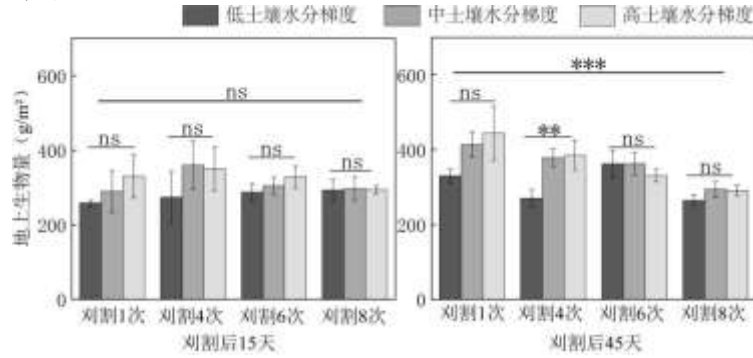


图 4 土壤水分梯度和不同刈割频次对藁草地上生物量的双因素分析 (Mean ± SE)

Fig.4 Two-factor analysis of the effect of soil moisture gradient and different mowing frequencies on the growth process of above-ground biomass of *Carex* (Mean ± SE)

表 4 刈割频次和土壤含水量对藁草地上生物量的影响

Tab.4 Impact of mowing frequency and soil moisture content on the above-ground biomass of *Carex*

刈割后天数 (天)	影响因素	III 类平方和	自由度	均方	F	p
15	频次	7072.38	3	2357.46	1.25	0.315
	土壤含水量	14282.76	2	7141.38	3.77	0.038
	土壤含水量 * 频次	9310.27	6	1551.71	0.82	0.566
45	频次	58462.03	3	19487.34	18.44	0.000
	土壤含水量	24707.51	2	12353.75	11.69	0.000
	土壤含水量 * 频次	24663.72	6	4110.62	3.89	0.007

2.4 刈割频次和土壤水分梯度对藁草地下生物量影响

刈割后 45 天内，对照场地中藁草的地下生物量为 44.92 ~ 71.95 g/m² (附图 2)。不同土壤水分梯度下，对照藁草的地下生物量无明显规律，且在低土壤含水量时地下生物量最大 (附图 2)。不同土壤水分梯度 (土壤含水量) 对藁草地下生物量的影响仅在刈割后 15 天表现出显著差异 ($p < 0.05$) (表 5)，且随着土壤含水量升高，藁草地下生物量反而降低 (图 5)；而在刈割 45 天时无显著差异 ($p > 0.05$) (表 5)。不同刈割频次对藁草地下生物量的影响未表现出明确规律，且大多数情况下无显著差异 ($p > 0.05$) (附图 2，附表 3)。此外，不同土壤水分梯度和刈割频次对藁草地下生物量状况无显著交互作用 ($p > 0.05$) (表 5)。

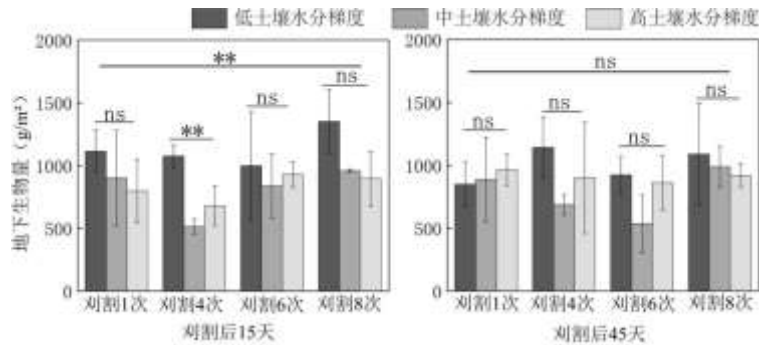


图 5 土壤水分梯度和不同刈割频次对藁草地下生物量的双因素分析 (Mean ± SE)

Fig.5 Two-factor analysis of the effect of soil moisture gradient and different mowing frequencies on the growth process of below-ground biomass of *Carex* (Mean ± SE)

表 5 刈割频次和土壤含水量对藁草地下生物量的影响
Tab.5 Impact of mowing frequency and soil moisture content on the below-ground biomass of *Carex*

刈割后天数 (天)	影响因素	III 类平方和	自由度	均方	F	p
15	频次	442506.24	3	147502.08	2.76	0.064
	土壤含水量	824920.24	2	412460.12	7.71	0.003
	土壤含水量 * 频次	235014.09	6	39169.02	0.73	0.628
45	频次	231525.60	3	77175.20	1.25	0.313
	土壤含水量	312258.66	2	156129.33	2.54	0.100
	土壤含水量 * 频次	323769.72	6	53961.62	0.88	0.527

3.讨论

3.1 土壤水分梯度对藁草生长的影响

本研究结果显示,不同土壤含水量条件下,藁草的株高和地上生物量均呈现出显著差异(表 3,表 4)。在一定范围内,随着土壤含水量的增加,藁草株高和地上生物量显著增加(图 3,图 4)。这表明土壤水分是影响藁草生长的重要生态因子,与藁草生长机制密切相关^[48]。较高的土壤含水量能够为藁草提供充足的水分条件,促进细胞吸水膨胀和分裂,也为光合作用提供了必要的水分原料,从而促进藁草的生长^{[48][49]}。

此外,在实验初期,土壤含水量对藁草的地下生物量也有显著影响(图 5,表 5)。低土壤含水量下的藁草地下生物量显著高于其他处理,可能是藁草通过优先生长根系增强水分与养分获取能力的一种典型干旱适应策略^[50]。在土壤含水量低的环境中,藁草受到水分胁迫后,自身会产生较高水平的脱落酸(ABA),促进根系向深层生长以增强水分吸收能力,同时降低地上部分气孔导度以减少蒸腾作用^[51]。在这种干旱条件下,藁草优先发展地下结构,导致地下生物量显著积累。然而,在实验后期,不同土壤含水量下的藁草地下生物量差异不显著,说明水分对根系生长的限制作用减弱(图 5,表 5)。尽管本研究未进行连续的土壤水分监测,但鄱阳湖国家级自然保护区在 10 月初实施了生态补水措施以缓解干旱,且 10 月至 12 月期间出现了多次区域性降雨,结合实地观察与保护区补水记录,推测后期土壤水分状况有所改善。在水分状况改善后,水分胁迫信号(如 ABA)下降,植物水分状况改善,光合作用速率恢复,碳同化能力增强。此时,藁草可能将更多的碳分配至地上部分,用于快速补偿生长与营养器官重建,而非继续扩大根系结构。这种资源分配的动态调整反映了植物对环境变化的适应性生理机制,从而导致不同水分处理之间的地下生物量差异减弱^[52]。

3.2 刈割频次对藁草生长的影响

刈割处理对藁草地上部分的生长有显著抑制作用(表 3,表 4,附图 2)。随着刈割频次的增加,藁草株高、生长速率以及地上生物量均显著降低(图 3,图 4)。刈割是一种通过去除植物地上部分来调控生长的草地管理措施^[53],同时也是典型的干扰手段。尽管本研究聚焦于单一优势物种藁草的响应,而非完整群落的多样性变化,但结果在一定程度上揭示了高强度干扰对优势种的限制作用,这与中度干扰理论中“过强干扰导致物种生长受抑”的观点相一致^[55]。高频刈割反复移除藁草的地上部分,减少了有效光合作用面积,进而限制了光合作用产物的积累,导致藁草生长受阻^[55]。同时,频繁刈割可能诱发藁草的防御机制,使其投入更多能量于组织修复与再生,表现为降低株高和生长速率以减少再次被刈割或摄食的风险,从而保障生存和繁殖^{[56][57]}。

值得注意的是,刈割还削弱了土壤水分对藁草生长的促进作用。随着刈割频次的增加,藁草株高和地上生物量在不同土壤含水量下的差异逐渐减小(表 3,表 4),其最大值趋于一致(图 3,图 4)。这可能是由于频繁刈割导致植物生长期缩短,不同刈割频次下至实验结束的有效生长天数显示,高频刈割处理(6 次)藁草的实际生长时间显著短于低频刈割处理(附表 4)。短生命周期可能缩短了资源获取与利用的窗口期,从而降低了水分资源差异所带来的生长响应。同时,频繁刈割还可能诱发植物的“资源再分配机制”,即优先将有限的能量分配用于维持基本生存与快速再生,而非对外部资源变化(如土壤水分)的响应^[58],从而进一步减弱了水分因子对生长的调节作用。

与地上部分不同,刈割频次对藁草的地下生物量并没有显著影响。土壤含水量与刈割频次之间也不存在显著交互作用,且不同刈割强度对土壤水分调控作用也无显著抑制(图 5,表 5)。这一结果表明,藁草地下生物量在刈割干扰下表现出较高的稳定性,可能与藁草的生存和地下生长策略密切相关。即便地上部分遭受严重损伤,藁草仍能通过维持地下部分的稳定生长以确保生存与资源储备^[59]。

3.3 湿地保护管理建议

藁草是鄱阳湖湿地生态系统的重要组成部分,其地上部分为雁形目等水鸟提供直接食物来源^[62],而地

下部分则通过增强土壤结构稳定性与提高植被覆盖率,为水鸟的栖息、觅食与避敌行为提供重要的生态功能支持^[63]。本研究结果表明,不同土壤水分梯度与刈割频次对藁草的生长具有显著影响(图2,表2),在适宜的水分条件下,藁草的高度和地上生物量明显提高,有利于提升水鸟的取食效率与能量摄入,对以藁草为主要食物来源的珍稀水鸟尤为关键。相反,持续干旱或长期积水均会抑制藁草的生长^[64],进而可能引发水鸟栖息地质量下降等一系列生态风险。

本研究系统分析了不同土壤水分梯度与刈割频次对藁草的生长策略和适应机制的影响,为科学制定湿地管理措施、保障越冬水鸟栖息地和食物资源提供了数据支持和理论依据。在鄱阳湖湿地的保护与管理实践中,应综合考虑土壤水分条件与刈割强度的双重影响。基于研究结果,我们建议:(1)合理调控湿地土壤含水量,避免过度干旱或积水胁迫,并优先选择土壤含水量较高(约为(45.33±11.54)%)的区域开展刈割,以促进藁草的生长与营养积累;(2)科学规划刈割频次,高频次的刈割(≥6次)会抑制藁草的再生能力和地上与地下生物量积累,因此,应控制刈割频次,保障藁草地上与地下生长的动态平衡,为越冬水鸟提供稳定、优质的食物资源。

3.4 研究不足与展望

本研究聚焦于土壤水分梯度与刈割频次对藁草株高及生物量的影响,尚未涉及植物生理指标及其他环境因子的综合作用,限制了对其生长策略与生理机制的深入理解。未来研究可加强对光合速率等生理代谢指标的长期监测,结合光照强度、空气湿度、土壤养分等多环境因子,系统探索影响藁草生长的关键因子与调控措施。

本研究基于野外原位实验,分析了刈割对秋季藁草生长的影响,然而,受实验时间限制,未覆盖春季藁草生长期。而春草也为雁类迁徙末期提供关键食物补给,具有潜在的生态功能价值。建议在未来研究中开展完整藁草生长周期实验,系统评估刈割对秋季藁草的即时影响以及春季再生阶段的潜在影响,从而为越冬水鸟栖息地与食物资源保障提供更全面、持续的数据支撑。

此外,本研究仅分析了刈割对藁草生长过程的影响,而刈割对食草动物食物品质的影响也是当前关注的热点。后续研究可进一步结合多源遥感技术(如核归一化差异植被指数 kNDVI)实现对大尺度藁草生物量及蛋白质时空动态反演^[65],并引入代谢组学方法,分析不同刈割处理后藁草营养成分(如粗蛋白、可溶性糖等)的变化^[66],以更直接、定量地评估刈割对水鸟食源植物的影响。

4. 结论

本研究系统探讨了土壤水分梯度和刈割频次对鄱阳湖湿地优势植物藁草生长的影响。结果表明,土壤水分是调控藁草株高和地上生物量的重要生态因子,适宜的水分条件显著促进其地上生长;而在干旱胁迫下,藁草通过增加地下生物量来增强水分吸收,表现出较强的生理适应性。刈割频次对藁草地上部分生长具有显著抑制作用,高刈割频次显著降低了其株高、生长速率和地上生物量积累,同时削弱了土壤水分的正效应,然而刈割频次对地下生物量影响不显著,表明藁草地下部分具有较强的稳定性和抗干扰能力。因此,在湿地管理与保护实践中,建议合理调控水位,维持较高的土壤水分含量,以提升藁草生长潜力。同时,应控制刈割频次,避免过度干扰造成地上生物量损失,从而保障越冬水鸟的食物供给和栖息地质量,为鄱阳湖湿地植物资源的可持续利用与越冬水鸟栖息地保护提供了理论支持与实践依据。

5 附件

附图附表见电子版(DOI: 10.18307/2026.0335)

6 参考文献

- [1] Cui L, Zhang M, Wang Y. The progress of wetland function research. *World Forestry Research*, 2006, 19(3): 18-21. [崔丽娟, 张曼胤, 王义飞. 湿地功能研究进展. *世界林业研究*, 2006, 19(3): 18-21.]
- [2] Zhang B, Shi Y, Li Q et al. The key ecological services and their values of wetland ecosystems in Beijing. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(8): 1311-1324. [张彪, 史芸婷, 李庆旭等. 北京湿地生态系统重要服务功能及其价值评估. *自然资源学报*, 2017, 32(8): 1311-1324.]
- [3] Yin L, Li Y, Huang L. Current status and suggestions for wetland resource conservation in China. *Digital Agriculture and Intelligent Agricultural Machinery*, 2023(2): 28-30. [阴莉莉, 李宇, 黄亮亮. 我国湿地资源保护现状及建议. *数字农业与智能农机*, 2023(2): 28-30.]
- [4] Cui L.J. Study on functions of Poyang Lake wetland ecosystem. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(2): 109-113. [崔丽娟. 鄱阳湖湿地生态系统服务功能研究. *水土保持学报*, 2004, 18(2): 109-113.]
- [5] Ma H, Zhong Y, Ou M et al. Scope division of the aquatic-terrestrial ecotone of Poyang Lake from the perspective of human-land relationship. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(12): 4959-4967. [马宏智, 钟业喜, 欧明辉等. 基于人地关系视角的鄱阳湖水陆交错带

范围划分. 生态学报, 2022, 42(12): 4959-4967.]

- [6] Guo Y, Wan R, Gong LQ et al. Biodiversity and influencing factors of typical plant communities in the middle and lower reaches of Poyang Lake wetland. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(4): 1370-1379.[郭宇菲, 万荣荣, 龚磊强等. 鄱阳湖湿地中低滩典型植物群落的生物多样性及影响因子. *湖泊科学*, 2023, 35(4): 1370-1379.]
- [7] Wang C, Xia S, Yu D et al. Spatiotemporal distribution characteristics and hotspot identification of wintering geese in Poyang Lake. *Journal of Lake Sciences*, 2024, 36(3): 836-845.[王晨溪, 夏少霞, 余定坤等. 鄱阳湖越冬雁类时空分布特征及热点区域识别. *湖泊科学*, 2024, 36(3): 836-845.]
- [8] Zhong Y, Xiao J. Research on biodiversity conservation in Poyang Lake Nature Reserve. *Environmental Science and Management*, 2006, 31(2): 70-73.[钟业喜, 肖加超. 鄱阳湖自然保护区生物多样性保护研究. *环境科学与管理*, 2006, 31(2): 70-73]
- [9] Wang P, Lai GE, Huang XL. Simulation of the impact of the Poyang Lake Water Conservancy Hub Project on lake water level changes. *Journal of Lake Sciences*, 2014, 26(1): 29-36.[王鹏, 赖格英, 黄小兰. 鄱阳湖水利枢纽工程对湖泊水位变化影响的模拟. *湖泊科学*, 2014, 26(1): 29-36.]
- [10] 李梦凡. 2000年以来鄱阳湖水文情势变化特征及影响因素研究[学位论文]. 北京:中国科学院大学, 2017.
- [11] Lin YL, Li XH, Tan ZQ et al. Dynamic characteristics of vegetation communities in the floodplain wetland of Lake Poyang based on spatio-temporal fusion of remote sensing data. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(4): 1408-1422.[蒯亚玲, 李相虎, 谭志强等. 基于遥感时空融合的鄱阳湖洪泛湿地植物群落动态变化特征. *湖泊科学*, 2023, 35(4): 1408-1422.]
- [12] 何芳. 中国细柄藁草组(莎草科)的分类研究[学位论文]. 浙江:杭州师范大学, 2023.
- [13] Lu YF, Zheng ZH, He F et al. Supplementary data on *Carex* (Cyperaceae) in China V. *Journal of Zhejiang University Science Edition*, 2022, 49(5): 642-650.[鲁益飞, 郑子洪, 何芳等. 中国藁草属(莎草科)植物资料增补 V. *浙江大学学报(理学版)*, 2022, 49(5): 642-650.]
- [14] Feng WJ, Xu LG, Wang XL et al. Effects of groundwater level on populations of *Carex cinerascens* in the beach wetlands of Poyang Lake. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(16): 5109-5115.[冯文娟, 徐力刚, 王晓龙等. 鄱阳湖洲滩湿地地下水位对灰化藁草种群的影响. *生态学报*, 2016, 36(16): 5109-5115.]
- [15] 孟竹剑. 鄱阳湖越冬雁类栖息地模型及环境容纳量研究[学位论文]. 江西:南昌大学, 2018.
- [16] Meng ZJ, Xia SX, Yu XB et al. A study on the suitable time window of feeding vegetation fit for overwintering geese in Poyang Lake. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(21): 7539-7548.[孟竹剑, 夏少霞, 于秀波等. 鄱阳湖越冬雁类食源植被适宜取食时间窗口. *生态学报*, 2018, 38(21): 7539-7548.]
- [17] Zhang M, Ni L, Xu J. Annual dynamics of wetland plant community in Poyang Lake in response to water-level fluctuations. *Research Journal of Environmental Sciences*, 2013, 7(10): 765-773.
- [18] Yao XC, Cao Y, Zheng GD et al. Physiological adaptation of *Carex cinerascens* to different water-level conditions. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(13): 4628-4640.[尧晓晨, 曹昀, 郑国砥等. 灰化藁草对不同水位环境的生理适应性. *生态学报*, 2020, 40(13): 4628-4640.]
- [19] Yang WJ, Xia SX, Yu XB. Effects of different drawdown timings on the growth and reproduction of the dominant plant *Carex cinerascens* in Poyang Lake floodplains. *Journal of Lake Sciences*, 2025, 37(2): 000-000.[杨文娟, 夏少霞, 于秀波. 不同退水时机对鄱阳湖洲滩优势植物灰化藁草生长与繁殖的影响. *湖泊科学*, 2025, 37(2): 000-000.]
- [20] Yang QL, Wu ZZ, Chen JL et al. Research progress on phytoremediation of heavy metal-contaminated soils and prospects for water and fertilizer regulation technology. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(6): 1075-1084.[杨启良, 武振中, 陈金陵等. 植物修复重金属污染土壤的研究现状及其水肥调控技术展望. *生态环境学报*, 2015, 24(6): 1075-1084.]
- [21] Sun J, Zhang ZC, Dong SK. Adaptive management of alpine grassland ecosystems over Tibetan Plateau. *Pratacultural Science*, 2019, 36(4): 933-938.[孙建, 张振超, 董世魁. 青藏高原高寒草地生态系统的适应性管理. *草业科学*, 2019, 36(4): 933-938.]
- [22] Hao C, Zhang H, Wang A, Shi Y et al. Effects of winter mowing on community diversity and functional trait plasticity of *Phragmites australis* in the Yellow River Delta. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(7): 1290.[郝春岩, 张海波, 王安东等. 冬季刈割对黄河三角洲产苇群落多样性和功能性状可塑性的影响. *生态学杂志*, 2022, 41(7): 1290.]
- [23] Yan RR, Zhang Y, Xin XP et al. Effects of mowing disturbance on grassland plant functional groups and diversity in *Leymus chinensis* meadow steppe. *Scientia Agriculturae Sinica*, 2020, 53(13): 2573-2583.[闫瑞瑞, 张宇, 辛晓平等. 刈割干扰对羊草草原植物功能群及多样性的影响. *中国农业科学*, 2020, 53(13): 2573-2583.]
- [24] Zhang YY, Ren LG, Chen G et al. Progress in research on mowing of wetland plants. *Wetland Science*, 2017, 15(2): 293-297.[张洋意, 任良锁, 陈光等. 湿地植物刈割研究进展. *湿地科学*, 2017, 15(2): 293-297.]
- [25] 刘锐. 不同刈割时间对锡林郭勒草甸草原群落及稳定性的影响[学位论文]. 内蒙古: 内蒙古大学, 2022.
- [26] Wang Q, Zheng JH, Zhao ML et al. Effects of mowing intensity on community characteristics and soil physicochemical properties of *Stipa grandis* steppe, Inner Mongolia, China. *Acta Pratacultural Sinica*, 2023, 32(2): 26-34.[王琪, 郑佳华, 赵萌萌等. 刈割强度对大针茅草原植物群落特征和土壤理化性质的影响. *草业学报*, 2023, 32(2): 26-34.]
- [27] 田爽, 刘钢. 辽河流域大型底栖动物群落调查检验中度干扰假说[J]. *江西水产科技*, 2022(1): 48-50.
- [28] Liu YH, Zhao HX. Advances in theory of disturbance and species diversity preservation. *Journal of Beijing Forestry University (Chinese Edition)*, 2000, 22(4): 101-105.[刘艳红, 赵惠勋. 干扰与物种多样性维持理论研究进展. *北京林业大学学报*, 2000, 22(4): 101-105.]
- [29] 王梅. 南方草地刈割的补偿生长及其机制——以渝东北部岐山草场为例[学位论文]. 北京:中国科学院大学, 2013.
- [30] Xu M L, Zhu Z H, Li Y N et al. Compensatory growth variations and grazing tolerance comparison of four main plant species in *Kobresia humilis* alpine meadow. *Chinese Agricultural Bulletin*, 2012, 28(20): 7-16.[许曼丽, 朱志红, 李英年等. 高寒矮嵩草草甸4种主要植物补偿生长变化与耐牧性比较研究. *中国农学通报*, 2012, 28(20): 7-16.]
- [31] Wang C, Xia S, Yu X et al. Timing mowing for maximal energy gain—Managing foraging habitat of wintering geese under extreme drought conditions. *Journal of Environmental Management*, 2024, 370: 122360.
- [32] Zhu Z H, Xi B, Li Y N et al. Compensatory growth of *Carex scabrostris* in different habitats in alpine meadow. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(3): 348-358.[朱志红, 席博, 李英年等. 高寒草甸不同生境粗喙藁草补偿生长研究. *植物生态学报*, 2010,

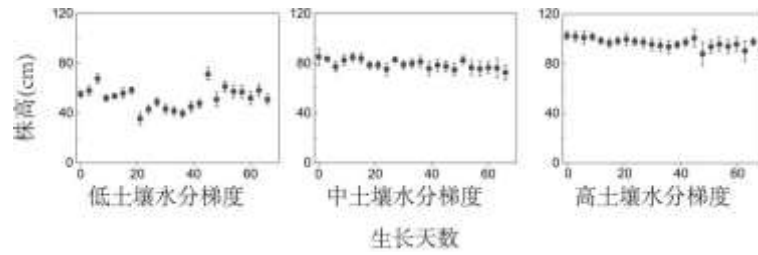
34(3): 348–358.]

- [33] Li Y Y, Fang P H, Zhang X T. The impact of mowing methods on the forage quality of barley in northern Anhui. *Crops Magazine*, 2010, 26(1): 76–78.[李焰焰, 方彭华, 张晓涛. 刈割方式对皖北地区大麦饲用品质的影响. 作物杂志, 2010, 26(1): 76–78.]
- [34] Zhang X, Dong J, Wang Y et al. Effect of cutting height on the root growth characteristics of forages. *Acta Agrestia Sinica*, 2016, 24(2): 416–424.[张雪, 董建国, 汪有科等. 刈割对牧草根系生长特征的影响. 草地学报, 2016, 24(2): 416–424.]
- [35] 耿智广. 刈割、施肥等干扰因素对紫花苜蓿种子产量及质量的影响[学位论文]. 甘肃:甘肃农业大学, 2009.
- [36] 田晴. 我国湿地保护管理体制完善研究[学位论文]. 河南:郑州大学, 2021.
- [37] Impact of mowing on the bud bank of wetland plants in Dongting Lake. *Kexue Zhongguoren*, 2016(11): 14.[刈割对洞庭湖湿地植物芽库的影响. 科学中国人, 2016(11): 14.]
- [38] 周志鹏. 鄱阳湖湿地生态服务功能价值评估[学位论文]. 江西:江西财经大学, 2018.
- [39] 夏少霞. 鄱阳湖水文节律对越冬水鸟丰度和栖息地结构的影响[学位论文]. 北京:中国科学院大学, 2016.
- [40] Liu P, Feng Y Y, Zhang M et al. Study on diversity of waterbird communities in the middle of wintering period in Poyang Lake. *Journal of Southwest Forestry University*, 2024, 44(6): 128–134.[刘鹏, 冯莹莹, 章密等. 鄱阳湖越冬中期水鸟群落多样性研究. 西南林业大学学报, 2024, 44(6): 128–134.]
- [41] 俞飞, 宋琦, 刘美华. 湿地种子库研究中的几个问题探讨. *浙江农林大学学报*, 2014, 31(1): 145–150.
- [42] Kaczmarek-Derda W, Folkestad J, Helgheim M et al. Influence of cutting time and stubble height on regrowth capacity of *Juncus effusus* and *Juncus conglomeratus*. *Weed Research*, 2014, 54(6): 603–613.
- [43] 朱莲莲. 刈割频率对洞庭湖湿地植物短尖藨草生长和品质的影响[学位论文]. 北京:中国科学院大学, 2017.
- [44] Yang W J, Xia S X, Yu X B. Impact of different drawdown times on the growth and reproduction of the dominant plant *Carex cinerascens* on Poyang Lake beaches. *Journal of Lake Sciences*, 2025, 37(2): 000–000.[杨雯娟, 夏少霞, 于秀波. 不同退水时间对鄱阳湖洲滩优势植物灰化藨草(*Carex cinerascens*)生长和繁殖的影响. 湖泊科学, 2025, 37(2): 000–000.]
- [45] Dong L Q, Yang W, Yao P J et al. Physiological and ecological responses of *Carex multiensis* in the Zoige Plateau wetland to water depth gradient. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(2): 590–598.[董李勤, 杨文, 姚鹏举等. 若尔盖高原湿地木里藨草生理生态特征对水深梯度的响应. 生态学报, 2020, 40(2): 590–598.]
- [46] Nash J C, Bhattacharjee A. A comparison of R tools for nonlinear least squares modeling. *Journal of Statistical Software*, 2024, 198: 1–20.
- [47] De Mendiburu F, Simon R. *Agricolae*: ten years of an open source statistical tool for experiments in breeding, agriculture and biology. *PeerJ Preprints*, 2015.
- [48] Liu Y J, Wu J, Zou F et al. Response of soil microbes and enzyme characteristics of *Carex cinerascens* beaches in Poyang Lake wetland to water gradient. *Wetland Science*, 2017, 15(2): 269–275.[刘亚军, 吴娟, 邹锋等. 鄱阳湖湿地灰化藨草洲滩土壤微生物和酶特性对水分梯度的响应. 湿地科学, 2017, 15(2): 269–275.]
- [49] Yang Y, Cao Y, Zhang S J. Effects of soil moisture regime on rhizomatic germination and young shoot growth of *Carex cinerascens*. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015, 31(2): 180–187.[杨阳, 曹昀, 张素娟. 水分条件对灰化藨草根茎萌发及幼苗生长的影响. 生态与农村环境学报, 2015, 31(2): 180–187.]
- [50] Liu Q L, Li W C, Jia Z J et al. Research progress and hotspot analysis on the adaptive mechanisms of plant roots under drought stress. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(9): 34–40.[刘巧玲, 李王成, 贾振江等. 干旱胁迫下植物根系适应性机制研究进展与热点分析. 江苏农业科学, 2023, 51(9): 34–40.]
- [51] Zhang Y L, Yu Q K, Li W et al. Aboveground and belowground phenotypic characteristics of *Cynodon dactylon* lines differing in drought resistance and endogenous hormone response to drought stress. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(3): 1–13. DOI:10.11686/cyxb2022129.[张一龙, 喻启坤, 李雯等. 不同抗旱性狗牙根地上地下表型特征及内源激素对干旱胁迫的响应. 草业学报, 2023, 32(3): 1–13.]
- [52] Ma S, Zhou H, Chong P F et al. Compensatory growth and water physiological characteristics of *Atriplex canescens* under stubble treatment. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2024, 44(3): 353–361.[马帅, 周海, 种培芳等. 平茬对四翅滨藜补偿生长及水分生理特征的影响. 西北植物学报, 2024, 44(3): 353–361.]
- [53] 樊永革. 刈割、氮添加和降水增加对半干旱草地净初级生产力及其降水利用效率的影响[学位论文]. 河北:河北大学, 2023.
- [54] Chen F R, Cheng J M, Liu W et al. Effects of different disturbances on diversity and biomass of communities in the typical steppe of loess region. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(9): 2856–2866.[陈芙蓉, 程积民, 刘伟等. 不同干扰对黄土区典型草原物种多样性和生物量的影响. 生态学报, 2013, 33(9): 2856–2866.]
- [55] Wang L H, Liu W, Wang J N et al. Compensatory growth of grassland communities, strata, and species under different mowing intensities. *Acta Agrestia Sinica*, 2015, 24(6): 35–42.[王丽华, 刘尉等. 不同刈割强度下草地群落、层片及物种的补偿性生长. 草业学报, 2015, 24(6): 35–42.]
- [56] Zhang Q Q, Liang Q W, Na R S et al. Research progress on the impact of mowing on natural grasslands. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2018, 39(1): 33.[张晴晴, 梁庆伟, 娜日苏等. 刈割对天然草地影响的研究进展. 畜牧与饲料科学, 2018, 39(1): 33.]
- [57] Zhang Y J, Qiu L P, Gao H L et al. Response of CO₂ exchange in a typical grassland ecosystem of the semi-arid loess plateau to mowing. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(1): 336–344.[张燕江, 邱莉萍, 高海龙等. 黄土高原半干旱区典型草地生态系统 CO₂ 交换对刈割的响应. 生态学报, 2020, 40(1): 336–344.]
- [58] Zhu Z H, Xi B, Li Y N et al. Compensatory growth of *Carex scabrostris* in different habitats in alpine meadow. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(3): 348–358.[朱志红, 席博, 李英年等. 高寒草甸不同生境粗喙藨草补偿生长研究. 植物生态学报, 2010, 34(3): 348–358.]
- [59] Wang L, Xu H, Zhang H et al. Grazing and mowing affect the carbon-to-nitrogen ratio of plants by changing the soil available nitrogen content and soil moisture on the meadow steppe, China. *Plants*, 2022, 11(3): 286.
- [60] Li W, Wang X, He L et al. The responses of growth and vegetative reproduction of wetland plants in Poyang Lake to duration of

- submergence. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(22): 8176–8183.[李文, 王鑫, 何亮等. 鄱阳湖洲滩湿地植物生长和营养繁殖对水淹时长的响应. *生态学报*, 2018, 38(22): 8176-8183.]
- [61] 魏博亚. 不同草地利用方式对典型草原地上初级生产力和根系生物量的影响 [学位论文]. 内蒙古: 内蒙古大学, 2016.
- [62] Li Q Y, Gong Z Z, Feng J H et al. Study on the diversity of intestinal parasitic nematodes in wintering *Anser albifrons* at Shengjin Lake and Caizi Lake. *Ecology Science*, 2022, 41(6): 202.[李清月, 龚治忠, 冯佳慧等. 升金湖和菜子湖越冬白额雁肠道寄生线虫多样性研究. *生态科学*, 2022, 41(6): 202.]
- [63] Luo J M, Wang Y J, Chen K et al. Soil water-holding effect in typical coniferous and broad-leaved mixed forest areas of the Greater Khingan Mountains. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(1): 7–13.[罗金明, 王永洁, 陈凯等. 大兴安岭典型针阔混交林区土壤持水效应. *水土保持通报*, 2014, 34(1): 7-13.]
- [64] Zhang B, Zhu J J, Liu H M et al. Effects of extreme rainfall and drought events on grassland ecosystems. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, 38(9): 1008–1018.[张彬, 朱建军, 刘华民等. 极端降水和极端干旱事件对草原生态系统的影响. *植物生态学报*, 2014, 38(9): 1008-1018.]
- [65] Hui J W, Bai Z K, Liu K J et al. Applicability analysis of normalized difference vegetative index (NDVI) in grassland open-pit coal mine. *Chinese Journal of Engineering*, 2023, 45(1): 54–63. DOI:10.13374/j.issn2095-9389.2021.08.03.002.[惠嘉伟, 白中科, 刘凯杰等. 归一化植被指数 (NDVI) 在草原露天煤矿区的适用性分析. *工程科学学报*, 2023, 45(1): 54-63.]
- [66] Lai J, Zhang Y R, Zhou H H et al. Research progress on important tropical plants based on metabolomics. *Journal of Tropical Biology*, 2023, 14(3): 248–258.[赖军, 张越冉, 周海鸿等. 基于代谢组学的重要热带植物的研究进展. *热带生物学报*, 2023, 14(3): 248-258.]

附图 1 不同土壤水分梯度下对照区藁草株高变化趋势 (Mean±SE)

Figure S1 Trends in plant height of *Carex* in the control areas under different soil moisture gradient (Mean±SE)

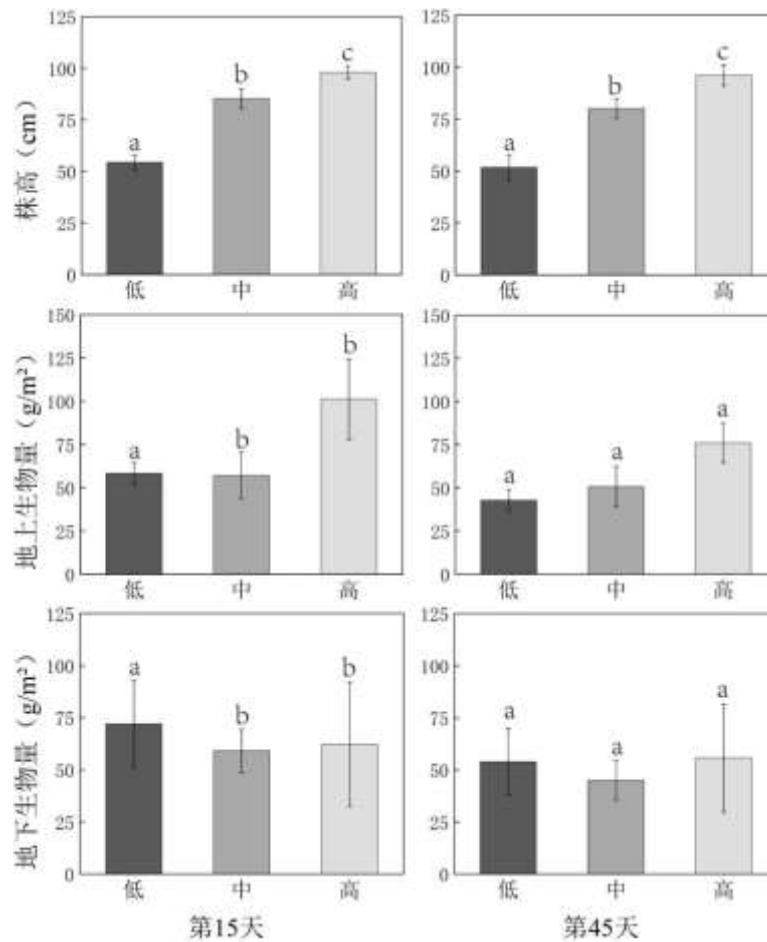


注：对照藁草区域开始观测日期为 2022 年 9.9 日。

Note: The start date for observation in the control *Carex* area was September 9, 2022.

附图 2 对照区第 15 天、45 天藁草株高、地上生物量、地下生物量 (Mean±SE)

Figure S2 Schematic diagram of plant height, above-ground biomass, and below-ground biomass of *Carex* in the control area on day 15 and day 45 (Mean±SE)



注：对照藁草区域开始观测日期为 2022 年 9.9 日；低、中、高分别表示为低土壤水分梯度、中土壤水分梯度、高土壤水分梯度。

Note: The start date of observation in the control *Carex* area was September 9, 2022; Low, medium, and high represent low soil moisture gradient, medium soil moisture gradient, and high soil moisture gradient, respectively.

附表 1 不同刈割频次下土壤含水量对藁草株高的影响

Table S1 Impact of soil moisture content on *Carex* plant height under different mowing frequencies

刈割后天数 (天)	频次	平方和	自由度	均方	F	p
15	1 次	30.58	2	15.29	1.78	0.247
	4 次	51.86	2	25.93	1.62	0.274
	6 次	75.06	2	37.53	4.18	0.073
	8 次	0.12	2	0.06	0.02	0.977
45	1 次	81.42	2	40.71	4.63	0.061
	4 次	97.49	2	48.74	14.51	0.005
	6 次	15.21	2	7.61	1.05	0.408
	8 次	6.05	2	3.02	2.74	0.143

附表 2 不同刈割频次下土壤含水量对藁草地上生物量的影响

Table S2 Impact of soil moisture content on above-ground biomass of *Carex* under different mowing frequencies

刈割后天数 (天)	频次	平方和	自由度	均方	F	p
15	1 次	7827.34	2	3913.67	1.78	0.247
	4 次	13277.12	2	6638.56	1.62	0.274
	6 次	2458.80	2	1229.40	1.94	0.225
	8 次	29.76	2	14.88	0.02	0.977
45	1 次	20842.78	2	10421.39	4.63	0.061
	4 次	24956.63	2	12478.31	14.51	0.005
	6 次	2024.39	2	1012.19	1.21	0.361
	8 次	1547.44	2	773.72	2.74	0.143

附表 3 不同刈割频次下土壤含水量对藁草地下生物量的影响

Table S3 Impact of soil moisture content on below-ground biomass of *Carex* under different mowing frequencies

刈割后天数 (天)	频次	平方和	自由度	均方	F	p
15	1 次	155973.33	2	77986.67	1.00	0.424
	4 次	499965.00	2	249982.50	20.85	0.002
	6 次	38824.11	2	19412.06	0.22	0.805
	8 次	365171.89	2	182585.94	4.93	0.054
45	1 次	20175.81	2	10087.91	0.19	0.831
	4 次	312014.21	2	156007.10	1.80	0.244
	6 次	259812.94	2	129906.47	3.26	0.110
	8 次	44025.42	2	22012.71	0.33	0.732

附表 4 不同刈割频次下薹草生长总天数

Table S4 Total growth days of *Carex* under different mowing frequencies

刈割频次	最后一次刈割日期	刈割后开始观测日期	薹草生长天数 (天)
1 次	2022 年 9 月 9 日	2022 年 9 月 12 日	126
4 次	2022 年 10 月 9 日	2022 年 10 月 12 日	96
6 次	2022 年 10 月 29 日	2022 年 11 月 1 日	76
8 次	2022 年 11 月 19 日	2022 年 11 月 21 日	51