



## 煤矿复垦区博落回生物量及其分配特征对氮的响应

马嘉丽 郝嘉 张永清 马星星

### Response of *Macleaya cordata* biomass and its distribution characteristics to nitrogen in the reclamation area of a coal mine

MA Jiali, HAO Jiatian, ZHANG Yongqing, MA Xingxing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2023-0103>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 高寒草甸植物始花期物候和生物量分配对氮添加的响应

Response of plant first flowering and biomass allocation to nitrogen addition in an alpine meadow

草业科学. 2023, 40(4): 916 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0216>

#### 根系分隔方式对‘热研5号’圭亚那柱花草亲缘识别与选择的影响

Effect of different root separation methods on kin recognition and selection of *Stylosanthes guianensis* ‘Reyan No. 5’

草业科学. 2023, 40(2): 491 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0223>

#### 新疆荒漠草地地上和地下生物量分配格局

Distribution patterns of aboveground and underground biomass in desert grasslands in Xinjiang

草业科学. 2023, 40(5): 1201 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0608>

#### ‘热研2号’柱花草对不同亲缘植物根系分泌物的生长响应

Growth responses of *Stylosanthes guianensis* ‘Reyan No. 2’ to root exudates from different relatives

草业科学. 2022, 39(2): 309 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0331>

#### 青海扁茎早熟禾形态特征与生物量对磷添加的响应

Effects of phosphorous application on the morphological characteristics and biomass yield of *Poa pratensis* var. *anceps* ‘Qinghai’

草业科学. 2022, 39(11): 2414 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0202>

#### 季节放牧下青藏高原高寒草甸牧草生物量空间分布特征

Effects of seasonal grazing on spatial distribution characteristics of forage biomass in an alpine meadow on the Qinghai-Tibet Plateau

草业科学. 2022, 39(2): 318 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0490>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2023-0103

马嘉丽, 郝嘉湑, 张永清, 马星星. 煤矿复垦区博落回生物量及其分配特征对氮的响应. 草业科学, 2024, 41(5): 1039-1047.

MA J L, HAO J T, ZHANG Y Q, MA X X. Response of *Macleaya cordata* biomass and its distribution characteristics to nitrogen in the reclamation area of a coal mine. Pratacultural Science, 2024, 41(5): 1039-1047.

# 煤矿复垦区博落回生物量及其分配特征对氮的响应

马嘉丽, 郝嘉湑, 张永清, 马星星

(山西师范大学地理科学学院, 山西太原 030031)

**摘要:** 为探究博落回 (*Macleaya cordata*) 在不同施氮梯度下各生育期生物量及总生物量分配的动态变化规律, 设置5个施氮水平: CK (0 kg·hm<sup>-2</sup>)、N<sub>1</sub> (75 kg·hm<sup>-2</sup>)、N<sub>2</sub> (150 kg·hm<sup>-2</sup>)、N<sub>3</sub> (225 kg·hm<sup>-2</sup>)、N<sub>4</sub> (300 kg·hm<sup>-2</sup>), 从2020年起开展为期两年的连续施氮试验, 揭示博落回在贫瘠土壤中的生长适应特征。结果表明: 1) N<sub>3</sub>、N<sub>4</sub>各时期博落回的冠生物量、根系生物量和总生物量均显著高于CK、N<sub>1</sub>和N<sub>2</sub> ( $P < 0.05$ )。2) 博落回的根冠比在不同年份有差异, 第1年所有处理的根冠比在6月最低, 分别为0.04、0.12、0.09、0.15和0.16, 第2年在8月最低, 分别为0.20、0.18、0.08、0.06和0.10; 2021年6月和8月, CK的根冠比都高于其他处理。3) 2020年10月N<sub>3</sub>的茎叶比显著高于其他处理 ( $P < 0.05$ ), 其他处理的茎叶比各月份间差异不大; 2021年各处理间茎叶比随恢复时间逐渐增加, 在11月达到最大, 分别为2.82、1.19、1.23、1.89和2.05。综上所述, 建议对煤矿复垦区博落回施加225~300 kg·hm<sup>-2</sup>的氮, 以此来促进博落回在贫瘠土壤中的快速定植, 本研究可以为缺氮土壤中博落回的生长适应性研究提供理论依据。

**关键词:** 氮添加; 博落回; 根系; 根冠比; 茎叶比; 生物量; 先锋植物

文献标识码: A 文章编号: 1001-0629(2024)05-1039-09

## Response of *Macleaya cordata* biomass and its distribution characteristics to nitrogen in the reclamation area of a coal mine

MA Jiali, HAO Jiatian, ZHANG Yongqing, MA Xingxing

(College of Geographical Science, Shanxi Normal University, Taiyuan 030031, Shanxi, China)

**Abstract:** To study dynamic changes in biomass and total biomass allocation of *Macleaya cordata* at different growth stages and nitrogen application gradients, a two-year continuous nitrogen application experiment was conducted from 2020, and the growth adaptation characteristics of *M. cordata* in poor soil were revealed. Five nitrogen application levels were set up: CK (0 kg·ha<sup>-1</sup>), N<sub>1</sub> (75 kg·ha<sup>-1</sup>), N<sub>2</sub> (150 kg·ha<sup>-1</sup>), N<sub>3</sub> (225 kg·ha<sup>-1</sup>), and N<sub>4</sub> (300 kg·ha<sup>-1</sup>). The results were as follows: 1) The shoot biomass, root biomass, and total biomass of *M. cordata* were significantly higher than those of CK, N<sub>1</sub>, and N<sub>2</sub> ( $P < 0.05$ ). 2) The root-shoot ratio of *M. cordata* varied in different years. The root-shoot ratio of all treatments in the first year were the lowest in June (0.04, 0.12, 0.09, 0.15, and 0.16) and the lowest in August in the second year (0.20, 0.18, 0.08, 0.06, and 0.10) in June and August 2021, and the root-shoot ratio of CK were higher than those of other treatments. 3) In 2020, the stem-leaf ratio of N<sub>3</sub> was significantly higher than that of other treatments in October ( $P < 0.05$ ). The stem-leaf ratio of other treatments had no significant difference between months. The stem-leaf ratio of 2021 treatments increased gradually with the

收稿日期: 2023-03-04 接受日期: 2023-06-19

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究 (2019QZKK0404); 国家自然科学基金 (42201071); 山西省应用基础研究计划 (201801D221048); 山西省自然科学研究面上项目 (202203021221127); 山西省研究生教育创新项目 (2022Y475); 山西师范大学研究生科研创新项目 (2023XSY053)

第一作者: 马嘉丽 (1997-), 女, 山西左云人, 在读硕士生, 研究方向为草地生态学。E-mail: 17835094886@163.com

通信作者: 马星星 (1988-), 女, 山西临汾人, 副教授, 博士, 研究方向为草地生态学。E-mail: maxximde@126.com

recovery time and peaked in November (2.82, 1.19, 1.23, 1.89, and 2.05). In conclusion, 225~300 kg·ha<sup>-1</sup> should be applied to *M. cordata* in coal mine reclamation areas to promote rapid colonization of *M. cordata* in poor soil. This study may provide a theoretical basis for the study of growth adaptability of *M. cordata* in nitrogen-deficient soil.

**Keywords:** nitrogen addition; *Macleaya cordata*; root; root-shoot ratio; stem-leaf ratio; biomass; pioneer plants

**Corresponding author:** MA Xingxing E-mail: [maxximde@126.com](mailto:maxximde@126.com)

煤炭资源的开采对采矿区土壤环境造成了严重破坏, 矿区水土流失严重, 土壤保水保肥能力减弱, 养分含量降低, 导致矿区土壤贫瘠<sup>[1-2]</sup>。煤矿复垦区土壤主要是将生土覆盖在煤矸石表面, 生土养分含量低。在覆土过程中, 机械的碾压改变了土壤结构, 使土壤容重显著增加, 土壤孔隙度减少, 从而使土壤的透气性、渗透性和蓄水能力都受到不良影响, 导致植物吸收养分和水分能力减弱, 生长受阻<sup>[3-4]</sup>。植物修复是进行复垦区土壤生态修复的重要途径, 它主要通过植物提取、植物稳定、根际过滤和植物挥发来净化土壤<sup>[5]</sup>, 且因其投资少、成本低、对土壤环境扰动小等优点而被广泛使用<sup>[6]</sup>。

博落回 (*Macleaya cordata*) 是罂粟科博落回属多年生直立草本植物<sup>[7]</sup>, 其分布范围广、生态适应性强, 有极强的抗寒与抗旱能力, 并兼有较高的药用价值及经济价值<sup>[8-10]</sup>。博落回能够改善喀斯特地区石漠化<sup>[11]</sup>, 对重金属污染土壤修复效果明显<sup>[12]</sup>, 是改良土壤的理想植物之一。目前煤矿复垦区常以豆科、禾本科和菊科等草本植物作为煤矸石山复垦的先锋植物, 它们具有耐干旱、耐贫瘠、根系发达、生长快速的特点, 对养分缺乏的复垦区土壤起到了一定的修复作用<sup>[13]</sup>。目前对博落回作为修复植物的研究还不够充分。

生物量是衡量生产力的重要指标, 其大小反映了植物对外界环境适应能力的强弱<sup>[14-15]</sup>。根冠比是根系生物量与冠生物量的比值, 反映着植物的生物量分配策略。氮素是植物体生长的必需元素, 同时也制约着生态系统的变化<sup>[16]</sup>。目前关于施氮对草本植物生物量及根冠比的影响的研究结果并不一致; 在黄土区的研究发现不同恢复年限草地群落施氮后, 恢复 37 年时其冠生物量的促进作用减弱, 根系生物量增加, 根冠比升高<sup>[17]</sup>。施氮可显著提高植物的冠生物量, 对根系生物量无显著影响, 根冠比随着施氮量增加而降低<sup>[18]</sup>。而对内蒙古不同草地生态系统施氮后, 发现内蒙古温带草原群落的冠生物量

和根系生物量都显著增加, 但施氮对冠生物量的促进作用大于根系生物量, 根冠比降低<sup>[19]</sup>。自然环境中, 土壤中的养分主要来自植物枯落物的分解, 植物生物量大意味着进入土壤生物化学循环过程中的底物总量的增加。研究博落回在不同恢复时期生物量的动态变化及生物量分配比例, 有助于更好地了解土壤修复过程中土壤养分的积累过程。

本研究以临汾市乡宁县管头镇申南凹煤矿复垦区作为恢复场地, 以博落回作为修复植物, 从 2020 年起开展为期两年的连续施氮控制试验, 探究博落回在不同施氮梯度下各生育期生物量及总生物量分配的动态变化规律, 确定复垦区博落回生长所需氮肥的最佳用量, 以期对煤矿复垦区土壤肥力快速恢复提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于临汾市乡宁县管头镇申南凹煤矿 (110°58' E, 36°03' N, 1295.56 m)。地处河东煤田东北边界处, 该区域属暖温带亚干旱气候区, 四季分明, 春季多风, 夏季炎热, 秋季温凉, 冬季寒冷, 年均温 10℃ 左右, 全年平均日照时数 2400 h, 年平均降水量为 570 mm, 土壤类型为褐土, 土壤含水量为 14.39%, 土壤有机碳、碱解氮、速效磷含量分别为 3.82 g·kg<sup>-1</sup>、12.25 mg·kg<sup>-1</sup> 和 3.00 mg·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验设计

采用裂区设计, 于 2020 年 4 月开始, 在临汾市乡宁县管头镇申南凹煤矿选取地形、土壤较均一的土地, 播种博落回种子, 播种量为 500 g·hm<sup>-2</sup>, 行距 50 cm, 待苗出齐后, 间苗 1~2 次, 保持株距 50 cm。样地的面积为 16 m × 25 m, 分为 5 个小区, 每个小区的面积为 4 m × 16 m, 各小区之间留有 1 m 宽的过道, 四周用围栏围起来, 设置施氮区和不施氮区 CK (0 kg·hm<sup>-2</sup>), 施氮区每年施氮量分别为 N<sub>1</sub> (75

kg·hm<sup>-2</sup>)、N<sub>2</sub> (150 kg·hm<sup>-2</sup>)、N<sub>3</sub> (225 kg·hm<sup>-2</sup>) 和 N<sub>4</sub> (300 kg·hm<sup>-2</sup>), 以喷施的方式于每年的 6 月和 7 月初, 分别施加到土壤中, 其他样地喷施等量的纯净水。

### 1.3 样品采集与测定

每年进行 3 次采样, 分别为 2020 年 6 月、2020 年 8 月、2020 年 10 月、2021 年 6 月、2021 年 8 月和 2021 年 11 月 (由于 2021 年 10 月降水量较多, 故采样推迟至 11 月)。采用 1 m × 1 m 的样方, 齐地面刈割获取冠生物量, 将茎和叶分别装入不同的信封, 在 65 °C 烘箱内烘至恒重, 称重。收获冠生物量后, 采用挖土块法获得根系样品<sup>[20]</sup>, 并将地面下属于冠部的样品剪掉放入地上样品中, 重复 3 次, 置于 4 °C 保温箱中, 带回实验室。根系样品用清水冲洗干净后置于 65 °C 烘箱内烘至恒重后称重。并计算根冠比和茎叶比。

根冠比 = 根系生物量/冠生物量;

茎叶比 = 茎干重/叶干重。

### 1.4 数据分析

对煤矿复垦区不同采样时期和不同施氮水平下博落回的冠生物量、根系生物量、总生物量、根冠比和茎叶比的影响采用双因素方差分析 (Two-way ANOVA), 并用 Duncan 法进行多重比较, 显著性水平为  $P = 0.05$ 。数据分析利用 SPSS 软件进行, 利用

Origin 软件作图。

## 2 结果

### 2.1 施氮对博落回冠生物量的影响

N<sub>3</sub> 和 N<sub>4</sub> 可促进博落回冠生物量的增加, 不同氮添加处理下, 博落回生物量最大值出现的时期不同。第 1 年 (2020 年) 除 CK 外, 其余施氮处理最大值都出现在 8 月, 第 2 年 (2021 年), 冠生物量最大值都出现在 11 月 (图 1)。2020 年, 随着施氮量的增加, 博落回的冠生物量除 6 月采样在 N<sub>4</sub> 处理下有所下降外, 其余时期都呈现出随着施氮水平增加而上升的特征。2021 年 6 月和 8 月, N<sub>4</sub> 处理下的冠生物量显著高于 CK ( $P < 0.05$ ), 分别比 CK 增加了 123.67% 和 65.90%; 2021 年 11 月, 冠生物量在 N<sub>4</sub> 处理下达到最大值, 为 941.07 g·m<sup>-2</sup>。

2020 年, 在 CK、N<sub>2</sub> 和 N<sub>4</sub> 处理下, 8 月和 10 月的冠生物量显著高于 6 月 ( $P < 0.05$ )。2021 年, 在 N<sub>1</sub> 和 N<sub>4</sub> 处理下, 11 月的冠生物量显著高于 6 月 ( $P < 0.05$ )。

### 2.2 施氮对博落回根系生物量的影响

N<sub>3</sub>、N<sub>4</sub> 显著提高了博落回的根系生物量 ( $P < 0.05$ ), 且 2020 年和 2021 年根系生物量的最大值都出现在最后一次采样 (图 2)。2020 年的 3 次采样中, N<sub>3</sub> 和 N<sub>4</sub> 处理下的根系生物量均显著高于 CK ( $P <$

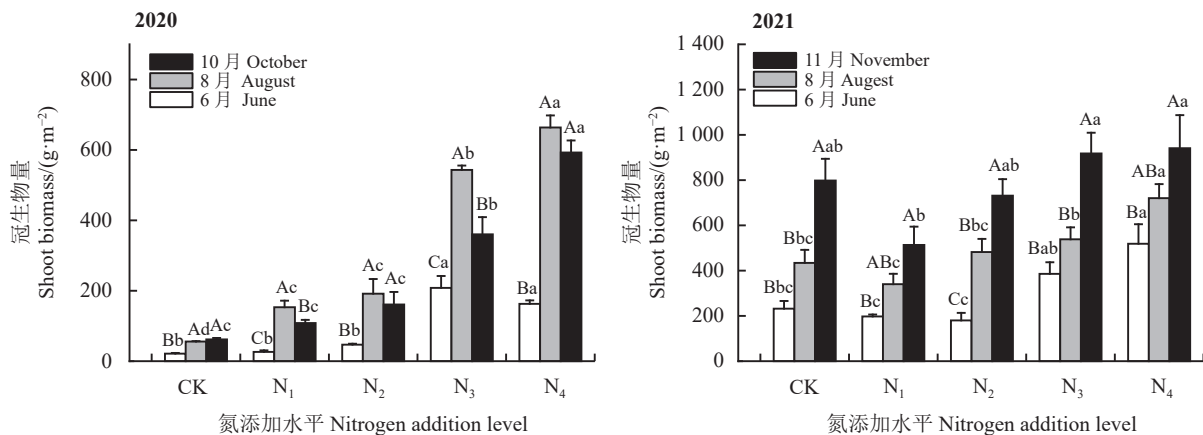


图 1 施氮对冠生物量的影响

Figure 1 Effects of nitrogen application on shoot biomass

CK、N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub> 和 N<sub>4</sub> 分别表示施氮水平为 0、75、150、225、300 kg·hm<sup>-2</sup>。不同小写字母表示相同月份不同施氮水平间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 不同大写字母表示同一施氮水平不同月份间差异显著 ( $P < 0.05$ ); 下同。

CK, N<sub>1</sub>, N<sub>2</sub>, N<sub>3</sub> and N<sub>4</sub> indicate nitrogen application levels were 0, 75, 150, 225, 300 kg·hm<sup>-2</sup>. Different lowercase letters indicate significant differences between different nitrogen application levels in the same month at the 0.05 level, and different capital letters indicate significant differences between different months for the same nitrogen application level at the 0.05 level; This is applicable for the following figures as well.

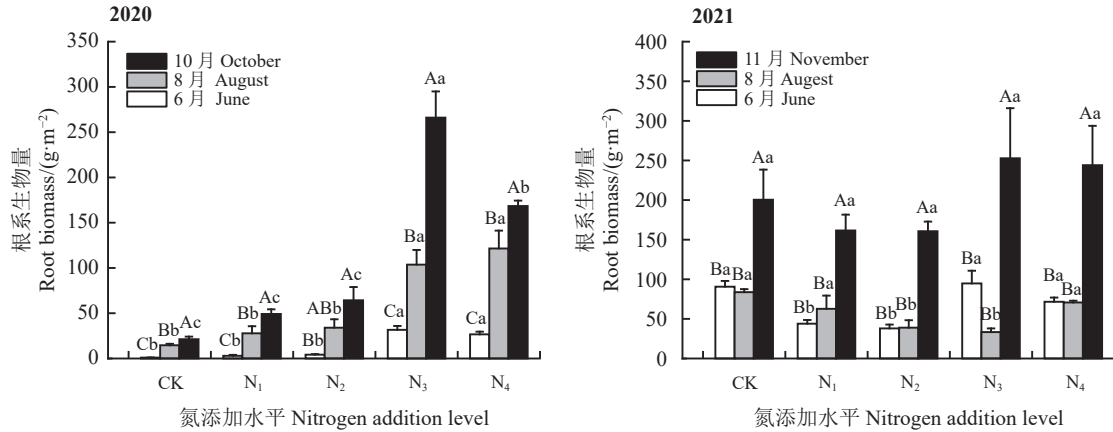


图 2 施氮对根系生物量的影响

Figure 2 Effects of nitrogen application on root biomass

0.05); 2020年的6月和10月,根系生物量在N<sub>3</sub>处理下达到最大值,比CK分别增加了3096.97%和1148.17%;而8月,根系生物量在N<sub>4</sub>处理下达到最大,比CK增加了732.40%。2021年6月,N<sub>1</sub>和N<sub>2</sub>处理下的根系生物量都显著低于CK ( $P < 0.05$ );2021年8月,N<sub>2</sub>和N<sub>3</sub>处理下的根系生物量都显著低于CK ( $P < 0.05$ )。

2020年,在N<sub>2</sub>处理下,10月的根系生物量显著高于6月 ( $P < 0.05$ )。2021年,6月和8月CK的根系生物量较高。

### 2.3 施氮对博落回总生物量的影响

N<sub>3</sub>和N<sub>4</sub>可促进博落回总生物量的增加,2020年除CK外,其余施氮处理最大值都出现在8月,2021年总生物量最大值都出现在11月(图3)。2020年3次采样中,N<sub>3</sub>和N<sub>4</sub>处理下的总生物量显著高于CK、N<sub>1</sub>和N<sub>2</sub> ( $P < 0.05$ );2020年6月,在N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>、

N<sub>3</sub>这3个施氮处理间,博落回的总生物量逐渐增加,在N<sub>4</sub>处理下总生物量较N<sub>3</sub>出现下降;2020年8月和10月,博落回的总生物量都随施氮处理的增加而增加,增幅范围分别为157.21%~1015.24%和89.38%~815.33%。2021年的3次采样,最大值都出现在N<sub>4</sub>处理下,分别为590.51、791.21和1185.15 g·m<sup>-2</sup>,6月和8月分别比CK增加了83.02%和52.74%。

2020年,在CK至N<sub>4</sub>处理下,8月和10月的总生物量都显著高于6月 ( $P < 0.05$ );CK 8月的总生物量显著低于10月 ( $P < 0.05$ )。2021年,在CK、N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>处理下,11月的总生物量都显著高于6月和8月 ( $P < 0.05$ );N<sub>4</sub>处理下,11月显著高于6月 ( $P < 0.05$ )。

### 2.4 施氮对博落回根冠比的影响

2020年6月CK的根冠比显著低于N<sub>4</sub> ( $P < 0.05$ ),2021年则相反,2020年所有处理的根冠比在6月最低,2021年的根冠比在8月最低(图4)。2020年

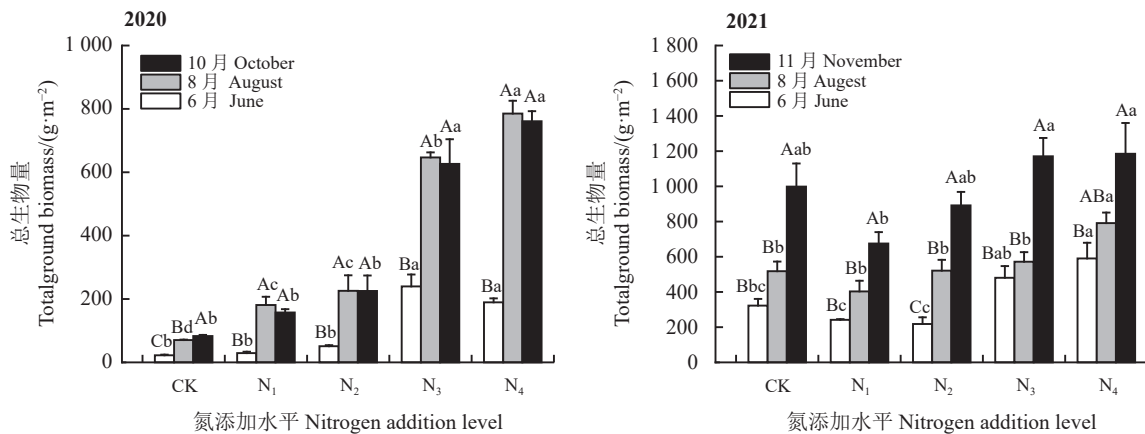


图 3 施氮对总生物量的影响

Figure 3 Effects of nitrogen application on total biomass

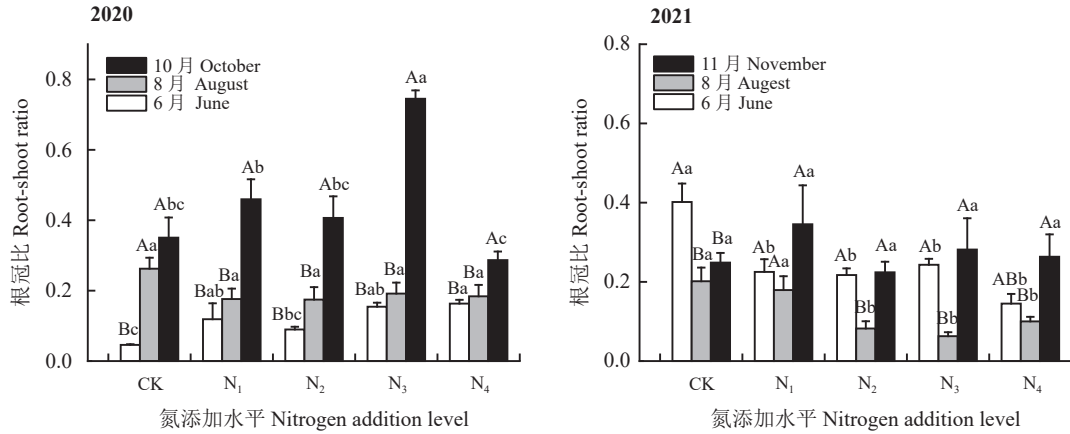


图 4 施氮对根冠比的影响

Figure 4 Effects of nitrogen application on root-shoot ratio

6月,根冠比随施氮梯度的增加整体呈现上升趋势, N<sub>1</sub>、N<sub>3</sub>和N<sub>4</sub>处理下的根冠比均显著高于CK ( $P < 0.05$ ),分别比CK显著增加了140%、200%和220%; 2020年10月,根冠比在N<sub>3</sub>处理下达到最大,比CK显著增加了114% ( $P < 0.05$ )。2021年6月, N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>和N<sub>4</sub>处理下的根冠比均显著低于CK ( $P < 0.05$ ),分别比CK显著降低了43.95%、45.93%、39.45%和63.87%; 2021年8月,根冠比在CK达到最大。

2020年, N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>和N<sub>4</sub>处理下,10月的根冠比都显著高于6月和8月 ( $P < 0.05$ ); CK中,8月和10月的根冠比显著高于6月 ( $P < 0.05$ )。2021年,在CK中,6月的根冠比显著高于8月和11月 ( $P < 0.05$ ); N<sub>2</sub>和N<sub>3</sub>处理下,6月和11月的根冠比显著高于8月 ( $P < 0.05$ )。

### 2.5 施氮对博落回茎叶比的影响

2020年,除N<sub>3</sub>处理下10月茎叶比与其他月份

差异较大外,其他处理各月份间茎叶比差异不大, 2021年各处理间茎叶比在11月最高(图5)。2020年的3次采样中,茎叶比均在N<sub>3</sub>处理下达到最大,分别比CK增加了213.11%、324%和1284.87%。2021年的3次采样, N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>和N<sub>4</sub>与CK都无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

2020年,在N<sub>1</sub>处理下,6月的茎叶比显著高于8月和10月 ( $P < 0.05$ ); N<sub>3</sub>处理下,10月的茎叶比显著高于6月和8月 ( $P < 0.05$ )。2021年,在N<sub>1</sub>处理下,11月的茎叶比显著高于6月 ( $P < 0.05$ ); N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>和N<sub>4</sub>处理下,11月的茎叶比均显著高于6月和8月 ( $P < 0.05$ )。

### 3 讨论

生物量是衡量生产力的重要指标,其对维持草地生态系统的平衡具有重要作用<sup>[14-15]</sup>。前人的研究表明,氮是植物生长所需的关键元素,施氮量的增

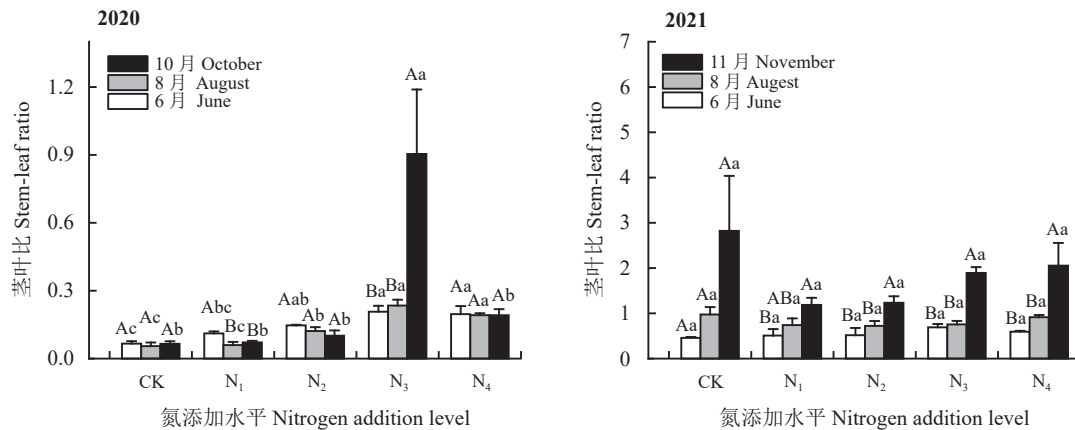


图 5 施氮对茎叶比的影响

Figure 5 Effects of nitrogen application on stem-leaf ratio

加可提高土壤中可利用氮的含量,促进植物的生长,所以氮添加会促进草地生态系统的冠生物量<sup>[21-23]</sup>。本研究中除恢复初期(2020年6月),博落回冠生物量的最大值出现在 $N_3$ 水平下外,其他月份冠生物量的最大值均出现在 $N_4$ 水平下,说明 $N_4$ 对第1年(2020年)博落回的前期生长可能会有一定的抑制作用,但这种抑制随着生育期的进行而减轻,总体而言, $N_3$ 和 $N_4$ 能促进两年生博落回冠生物量的增加,这与景明慧等<sup>[24]</sup>在内蒙古典型草原开展7年的氮添加试验结果一致。本研究中的博落回在2020年的3次采样中,根系生物量最高值都出现在 $N_3$ 和 $N_4$ ,这表明恢复初期(2020年) $N_3$ 和 $N_4$ 能促进先锋植物博落回根系生物量的增加,这与薄正熙等<sup>[25]</sup>的研究结果一致,但也有研究表明,氮添加( $571 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )反而会抑制根系生物量的增加<sup>[26]</sup>,这可能是由于植物对氮添加适应策略不同导致的,青藏高原东部氮素缺乏,施氮使环境中氮素增加,地上部分会产生更多营养物质输送至地下部分以此来促进根系生长,但是随着施氮量的增加,地上部分的增长趋于稳定,过量的氮添加反而会抑制根系生物量的增加;此外也可能是由于不同植物吸收土壤中养分的能力不同导致的。在对内蒙古温带典型草原的研究中发现:根系生物量有随着氮添加剂量增加而增加的趋势,但仅5月—8月高剂量氮添加处理的根系生物量较CK增加显著<sup>[27]</sup>,本研究第2年恢复末期(2021年11月),所有施氮处理的根系生物量与CK相比无显著差异,博落回是多年生植物,2020年是生长的第1年,2021年11月处于枯落期,光合速率减弱,光合产物的量减少,博落回吸收养分能力减弱;其次随着恢复时间的增加,博落回对氮添加的敏感性降低,因此各施氮处理对根系生物量的增加差异不显著;此外由于2021年10月该区突降暴雨致使土壤中含水量过大有关;水分虽能促进植物的氮素利用效率,但过量的水会使植物的氮素利用效率受到抑制<sup>[28-29]</sup>。

本研究中6次采样总生物量的最大值除2020年6月出现在 $N_3$ 处理下之外,其余5次采样总生物量最大值都出现在 $N_4$ 处理下,这表明 $N_3$ 和 $N_4$ 能促进博落回的生长,这与潘庆明等<sup>[30]</sup>和黄军等<sup>[31]</sup>的研究结果一致。2020年除CK外,其余处理总生物量的最大值都出现在8月,说明在恢复的第1年,

施氮有助于增加生长季中期博落回的生物量,由此可知,生长季中期在不施氮时,博落回体内的氮素水平未达到生长所需的理想条件,其生长依然受到氮素的制约,此时施加氮肥能够有效促进博落回的生长。

根冠比可以反映植物生物量在冠与根系之间的分配状况。本研究中,植物恢复第1年和第2年根冠比存在差异,2020年所有处理下,根冠比都在6月最低,因为此时处于植物生长初期,博落回为了获得更多的光合产物来完成自身的生长发育,将更多的生物量积累到地上部分,所以根冠比低;2021年,博落回的根冠比随恢复时期的增加呈反抛物线型变化,根冠比在8月最低,这与李旭东等<sup>[32]</sup>对黄土高原典型草原根冠比的研究一致。根据最优分配理论,植物会将更多的能量分配给可以优化植物生长的器官,以此来适应周围环境的变化<sup>[33]</sup>,8月处于恢复第2年的生长季中期,光合产物向地上部分转移,博落回冠生物量较6月快速增加,因此根冠比降低,潘庆民等<sup>[30]</sup>和祁瑜等<sup>[34]</sup>的研究也表明氮添加会降低根冠比。2021年6月和8月,CK的根冠比都高于其他处理,这表明在自然生长条件下,经过1年的恢复,博落回在第2年恢复前期在根系上的投入较多,这主要是因为经过1年的生长,土壤中的养分含量下降,博落回在养分有限的情况下,会将更多的能量储存在根系中,这就导致分配给地上部分的生物量降低,由此可知,博落回的耐贫瘠机制为在养分不足的情况下,将大部分的能量储存在根系中。

植物的茎与叶在土壤中的矿质化及腐殖化程度有所不同。2020年10月, $N_3$ 处理下茎叶比显著高于其他处理,这表明在第1年恢复末期,茎对 $N_3$ 处理最为敏感,施氮处理高于或低于 $N_3$ 对茎的生长影响都不显著,而博落回是喜光植物,对光照的竞争,使其分配更多的生物量到茎上,以此来增加其对光照的竞争力。植物会将养分进行重新分配和利用以此来满足其自身的生长和繁殖,致使各器官生物量分配比例发生变化<sup>[35]</sup>,在 $N_1$ 、 $N_2$ 和 $N_4$ 处理下,6月的茎叶比最高是因为此时正处于生长季的初期,博落回的叶生物量还没有达到最大,此时地上部分中茎所占的比例大,因此6月茎叶比最大。2021年,各氮添加处理的茎叶比随着博落回

的生长逐渐增大主要是因为茎秆中由叶片光合作用制造的有机物不断增加, 致使茎的干物质积累速率高于叶的干物质积累速率, 因此茎叶比随博落回生长逐渐增大<sup>[36]</sup>。从恢复与提高土壤肥力的角度出发, 较高的茎叶比可能更有利于土壤腐殖质的形成。

由于受工作量的影响, 本研究只进行了两年的恢复, 时间尺度方面还有待延长。本研究内容只涉及了氮添加这一单一因素对博落回生长的相关研究, 没有水、氮互作及其他方面的研究, 下一步应拓宽研究范围, 从生态系统的整体出发, 开展植物—

动物—微生物联合修复方面的研究工作。

## 4 结论

经过连续两年的氮添加试验, 本研究发现 N<sub>3</sub> 和 N<sub>4</sub> 处理下的博落回长势优于其他处理, 各器官干重都显著高于 CK、N<sub>1</sub> 和 N<sub>2</sub>, 因此, 建议对煤矿复垦区博落回施加 225~300 kg·hm<sup>-2</sup> 的氮, 以此来促进博落回的生长。但随着恢复时期的增加, 土壤中氮素含量趋于饱和, N<sub>3</sub> 和 N<sub>4</sub> 处理对生物量的促进作用减弱, 因此在恢复末期, 建议不施氮或减少施氮, 以防过量的氮添加抑制博落回的生长。

## 参考文献 References:

- [1] 李玉婷, 曹银贵, 王舒菲, 罗古拜, 王金满, 周伟, 白中科. 黄土露天矿区排土场重构土壤典型物理性质空间差异分析. 生态环境学报, 2020, 29(3): 615-623.  
LI Y T, CAO Y G, WANG S F, LUO G B, WANG J M, ZHOU W, BAI Z K. Changes of typical physical properties of reclaimed mine soil in the dump site of loess open mining area. Ecology and Environment Sciences, 2020, 29(3): 615-623.
- [2] 韩秀娜, 董颖, 耿玉清, 李娜, 张超英. 覆盖煤矸石对矿区土壤养分及盐分特征的影响. 生态环境学报, 2021, 30(11): 2251-2256.  
HAN X N, DONG Y, GENG Y Q, LI N, ZHANG C Y. Influence of coal gangue mulching on chemical characteristics of soil in the mining area. Ecology and Environment Sciences, 2021, 30(11): 2251-2256.
- [3] 康得军, 吕荏苒, 脱向银, 蔡金水, 龚亚萍, 赵颖. 煤矸石山覆土体系重金属污染特征及生态风险评价. 环境工程, 2022, 40(9): 158-166.  
KANG D J, LYU J D, TUO X Y, CAI J S, GONG Y P, ZHAO Y. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in covering soil system of a coal gangue hill. Environmental Engineering, 2022, 40(9): 158-166.
- [4] 胡振琪. 矿山复垦土壤重构的理论与方法. 煤炭学报, 2022, 47(7): 2499-2515.  
HU Z Q. Theory and method of soil reconstruction of reclaimed mined land. Journal of China Coal Society, 2022, 47(7): 2499-2515.
- [5] 朱学朋, 林海, 董颖博, 李冰, 刘俊飞. 有色金属矿山重金属污染土壤修复技术研究进展. 有色金属(冶炼部分), 2023(1): 7-17.  
ZHU X P, LIN H, DONG Y B, LI B, LIU J F. Research progress of heavy metal contaminated soil remediation technology in nonferrous metal mines. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023(1): 7-17.
- [6] 王孜, 任海彦. 乡土植物在植被修复中的作用. 湖北农业科学, 2018, 57(10): 83-87.  
WANG Z, REN H Y. The role of native plants in vegetation restoration. Hubei Agricultural Sciences, 2018, 57(10): 83-87.
- [7] 邹序安, 龙正权. 博落回的生物学特性与生态价值. 福建林业科技, 2009, 36(3): 244-247.  
ZOU X A, LONG Z Q. The biological characteristics and the ecological value of *Macleaya cordata*. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2009, 36(3): 244-247.
- [8] 何浪君, 陈永华, 苏荣葵, 蔡斌, 王佳昕, 张奥姗, 朱虹红. 复合改良剂强化博落回修复锰矿渣的机理. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(3): 170-179.  
HE L J, CHEN Y H, SU R K, CAI B, WANG J X, ZHANG A S, ZHU H H. Mechanism of compound modifiers strengthening *Macleaya cordata* to remediate manganese slag. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2022, 42(3): 170-179.
- [9] 程巧, 乐捷, 曾建国. 药用植物博落回形态与发育解剖学研究. 植物学报, 2015, 50(1): 72-82.  
CHENG Q, YUE J, ZENG J G. Morphology and developmental anatomy of medicinal plant *Macleaya cordata*. Bulletin of Botany, 2015, 50(1): 72-82.
- [10] 欧阳龙, 黄勇, 李裕, 李艳平. 博落回在养殖业中的应用前景. 中国饲料, 2019(23): 52-54.



- OUYANG L, HUANG Y, LI Y, LI Y P. Application prospect of *Macleaya cordata* in animal husbandry industry. *China Feed*, 2019(23): 52-54.
- [11] 邹序安, 陆引罡, 王虎, 林昌虎. 资源植物博落回在石漠化防治中的生态与经济效益探讨. *湖北农业科学*, 2009, 48(4): 910-913.  
ZOU X A, LU Y G, WANG H, LIN C H. Discussion on the prevention and cure of rocky desertification and economic benefit of *Macleaya cordata*. *Hubei Agricultural Sciences*, 2009, 48(4): 910-913.
- [12] 蔡斌, 陈永华, 杜露, 何浪君. 博落回对铅的耐性、富集及生理响应研究. *农业现代化研究*, 2021, 42(2): 339-348.  
CAI B, CHEN Y H, DU L, HE L J. Investigation on tolerance, accumulation and physiological responses of *Macleaya cordata* to lead. *Research of Agricultural Modernization*, 2021, 42(2): 339-348.
- [13] 高瑞, 艾宁, 刘广全, 刘长海, 强方方. 煤矿复垦区不同修复年限林下草本群落特征及其与土壤耦合关系. *草业学报*, 2022, 31(6): 61-68.  
GAO R, AI N, LIU G Q, LIU C H, QIANG F F. Characteristics of understory herb communities across time during restoration in coal mine reclamation areas and their coupling with soil properties. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(6): 61-68.
- [14] HOVENDEN M J, NEWTON P C D, WILLS K E. Seasonal not annual rainfall determines grassland biomass response to carbon dioxide. *Nature*, 2014, 511: 583-586.
- [15] 李金花, 李镇清, 任继周. 放牧对草原植物的影响. *草业学报*, 2002(1): 4-11.  
LI J H, LI Z Q, REN J Z. The effects of grazing on grassland plants. *Acta Prataculturae Sinica*, 2002(1): 4-11.
- [16] 董俊夫, 王淑平, 崔晓勇, 庞哲, 赵国强, 许宁, 汪诗平. 增施氮肥对青藏高寒草原不同类群植物群落特征的影响. *草业科学*, 2016, 33(11): 2291-2299.  
DONG J F, WANG S P, CUI X Y, PANG Z, ZHAO G Q, XU N, WANG S P. Effects of nitrogen addition on plant community characteristics in Tibetan alpine grassland. *Pratacultural Science*, 2016, 33(11): 2291-2299.
- [17] 樊勇明, 李伟, 温仲明, 郭倩, 刘晶, 杨雪, 郑诚, 杨玉婷, 姜艳敏, 张博. 黄土区不同恢复年限草地群落生物量及根冠比对氮添加的响应. *生态学报*, 2021, 41(24): 9824-9835.  
FAN Y M, LI W, WEN Z M, GUO Q, LIU J, YANG X, ZHENG C, YANG Y T, JIANG Y M, ZHANG B. Responses of grassland community biomass and root-shoot ratio to nitrogen addition in different restoration years on the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(24): 9824-9835.
- [18] 毛晋花, 邢亚娟, 闫国永, 王庆贵. 陆生植物生物量分配对模拟氮沉降响应的 Meta 分析. *生态学报*, 2018, 38(9): 3183-3194.  
MAO J H, XING Y J, YAN G Y, WANG Q G. A Meta-analysis of the response of terrestrial plant biomass allocation to simulated N deposition. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(9): 3183-3194.
- [19] 贺星, 马文红, 梁存柱, 红梅, 柴曦, 赵巴音那木拉, 张宇平, 杨绍欢, 张佳鑫, 辛晓平. 养分添加对内蒙古不同草地生态系统生物量的影响. *北京大学学报(自然科学版)*, 2015, 51(4): 657-666.  
HE X, MA W H, LIANG C Z, HONG M, CHAI X, Zhaobayinnamula, ZHANG Y P, YANG S H, ZHANG J X, XIN X P. Effects of nutrient additions on community biomass varied among different grassland ecosystems of Inner Mongolia. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis*, 2015, 51(4): 657-666.
- [20] 黄建辉, 韩兴国, 陈灵芝. 森林生态系统根系生物量研究进展. *生态学报*, 1999(2): 270-277.  
HUANG J H, HAN X G, CHEN L Z. Advances in the research of (fine) root biomass in forest ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 1999(2): 270-277.
- [21] ZAVALETA E S, REBECCA SHAW M, CHIARIELLO N R, THOMAS B D, CLELAND E E, FIELD C B, MOONEY H A. Grassland responses to three years of elevated temperature, CO<sub>2</sub>, precipitation, and N deposition. *Ecological Monographs*, 2003, 73: 585-604.
- [22] LEE M, MANNING P, RIST J, POWER S A, MARSH C. A global comparison of grassland biomass responses to CO<sub>2</sub> and nitrogen enrichment. *Philosophical Transactions of the Royal Society B (Biological Sciences)*, 2010, 365: 2047-2056.
- [23] 韩小雨, 郭宁, 李冬冬, 谢明阳, 焦峰. 氮添加对内蒙古不同草原生物量及土壤碳氮变化特征的影响. *草业学报*, 2022, 31(1): 13-25.  
HAN X Y, GUO N, LI D D, XIE M Y, JIAO F. Effects of nitrogen addition on soil carbon and nitrogen and biomass change in different grassland types in Inner Mongolia. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(1): 13-25.
- [24] 景明慧, 贾晓彤, 张运龙, 曹娟, 周伟, 王杰, 庾强. 长期氮添加对内蒙古典型草原植物地上、地下生物量及根冠比的影响. *生态*

- 学杂志, 2020, 39(10): 3185-3193.
- JING M H, JIA X T, ZHANG Y L, CAO J, ZHOU W, WANG J, SOU Q. Effects of long-term nitrogen addition on community aboveground and belowground biomass and their ratio in a typical steppe of Inner Mongolia. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(10): 3185-3193.
- [25] 薄正熙, 游成铭, 胡中民, 郭群, 何利元, 杜勇明, 李胜功, 干友民. 氮素与水分添加对内蒙古温带典型草原生物量的影响. *应用与环境生物学报*, 2017, 23(4): 658-664.
- BO Z X, YOU C M, HU Z M, GUO Q, HE L Y, DU Y M, LI S G, GAN Y M. The influence of nitrogen and water addition on biomass in a typical steppe of Inner Mongolia. *Chinese Journal of Applied and Environmental*, 2017, 23(4): 658-664.
- [26] 陈文年, 陈发军. 青藏高原高山草甸群落生物量及多样性对氮素添加的响应. *草业科学*, 2017, 34(5): 1082-1089.
- CHEN W N, CHEN F J. Response of biomass and species diversity to nitrogen addition in alpine meadows. *Pratacultural Science*, 2017, 34(5): 1082-1089.
- [27] 郭旋, 胡中民, 李胜功, 郭群. 氮磷添加对内蒙古温带典型草原地下生物量的影响. *生态学杂志*, 2021, 40(4): 929-939.
- GUO X, HU Z M, LI S G, GUO Q. Effects of nitrogen and phosphorus additions on belowground biomass of temperate typical steppe in Inner Mongolia. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(4): 929-939.
- [28] JIN X K, MA M T, ZHAO T K, JIANG L L. The impacts of supplemental irrigation based on soil moisture measurement and nitrogen use on winter wheat yield and nitrogen absorption and distribution. *Asian Agricultural Research*, 2017, 9(8): 47-54.
- [29] 王鑫, 余新晓, 贾国栋, 邱云霄, 史佳美, 孜尔蝶. 不同土壤水分条件下侧柏幼苗的生理活动及氮素分配策略. *水土保持学报*, 2020, 34(3): 311-317.
- WANG X, YU X X, JIA G D, QIU Y X, SHI J M, ZI E D. Physiological activities and nitrogen allocation strategies of *Platyclusus orientalis* seedlings under different soil water conditions. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(3): 311-317.
- [30] 潘庆民, 白永飞, 韩兴国, 杨景成. 氮素对内蒙古典型草原羊草种群的影响. *植物生态学报*, 2005(2): 311-317.
- PAN Q M, BAI Y F, HAN X G, YANG J C. Effects of nitrogen additions on a *Leymus chinensis* population in typical steppe of inner mongolia. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2005(2): 311-317.
- [31] 黄军, 王高峰, 安沙舟, 贞静, 李海, 张荣华. 施氮对退化草甸植被结构和生物量及土壤肥力的影响. *草业科学*, 2009, 26(3): 75-78.
- HUANG J, WANG G F, AN S Z, YUN J, LI H, ZHANG R H. Effect of nitrogen fertilization on the vegetation structure and biomass of degraded meadow and soil fertility. *Pratacultural Science*, 2009, 26(3): 75-78.
- [32] 李旭东, 张春平, 傅华. 黄土高原典型草原草地根冠比的季节动态及其影响因素. *草业学报*, 2012, 21(4): 307-312.
- LI X D, ZHANG C P, FU H. Seasonal dynamics of root-shoot ratio and the effect of factors in grazed and ungrazed grasslands of the Loess Plateau. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(4): 307-312.
- [33] MCCARTHY M C, ENQUIST B J. Consistency between an allometric approach and optimal partitioning theory in global patterns of plant biomass allocation. *Functional Ecology*, 2007, 21(4): 713-720.
- [34] 祁瑜, 黄永梅, 王艳, 赵杰, 张景慧. 施氮对几种草地植物生物量及其分配的影响. *生态学报*, 2011, 31(18): 5121-5129.
- QI Y, HUANG Y M, WANG Y, ZHAO J, ZHANG J H. Biomass and its allocation of four grassland species under different nitrogen levels. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(18): 5121-5129.
- [35] 蒋宏宇, 李长慧, 孙熠, 梁德飞. 坡向对高寒矿区渣山恢复植物生物量和养分繁殖分配的影响. *草业科学*, 2022, 39(7): 1312-1322.
- JIANG H Y, LI C H, SUN Y, LIANG D F. Tailings slope aspect influences biomass and nutrient reproductive allocation of restorative plants in an alpine mining area. *Pratacultural Science*, 2022, 39(7): 1312-1322.
- [36] 刘贵波, 乔仁甫. 饲用黑麦适宜青刈时期及青刈次数研究. *草业科学*, 2005, 22(10): 47-50.
- LIU G B, QIAO R F. Study on the appropriate harvest date and harvest times of forage rye. *Pratacultural Science*, 2005, 22(10): 47-50.

(责任编辑 苟燕妮)