



砒砂岩区不同施氮水平下5种潜在适生植物 氮素利用比较研究

秦晶晶¹,杜峰^{1,2*},杨路¹,程帅¹,李宏斌¹

(1 西北农林科技大学水土保持研究所,陕西杨陵 712100; 2 中国科学院水利部水土保持研究所,陕西杨陵 712100)

摘要:鄂尔多斯高原砒砂岩区土壤贫瘠、水土流失强烈,土壤氮素养分也是该区域植被恢复重建的主要限制因子。该研究以3种乡土种芨芨草(*Achnatherum splendens*)、长柄扁桃(*Amygdalus pedunculata*)和沙棘(*Hippophae rhamnoides*)与2种外来种掌叶大黄(*Rheum palmatum*)和杂交狼尾草(*Pennisetum americanum* × *P. purpureum*)为研究对象,采用田间试验方法,分析比较鄂尔多斯砒砂岩区5种潜在适生植物在4个施氮水平[对照N₀、低(N_L,0.1 g N/kg风干土)、中(N_M,0.2 g N/kg风干土)、高(N_H,0.3 g N/kg风干土)]下个体生长表现和氮素利用相关指标的差异,旨在从氮素利用角度以及物种选择与施氮干预两方面为区域植被恢复重建提供理论依据。结果表明:(1)5种植物的个体生长表现在中等施氮水平下最佳,试验期间掌叶大黄、芨芨草、长柄扁桃、杂交狼尾草和沙棘在中等施氮水平下的株高和生物量分别增加10.00、41.41、38.95、151.45、41.08 cm和52.84、60.55、75.36、668.67、142.86 g。(2)5种植物在4个氮素水平下的平均氮素利用效率(NUE)为1 154.42 g·g⁻¹,各施氮水平下,沙棘、掌叶大黄、长柄扁桃、杂交狼尾草和芨芨草的NUE分别为1 546.16、1 429.45、1 389.75、731.09、675.65(g·g⁻¹),且5种植物的NUE存在显著的种间差异,各施氮水平下植物的NUE综合表现为:沙棘、掌叶大黄、长柄扁桃大于杂交狼尾草、芨芨草。(3)氮素水平对5种植物NUE的影响显著,以中等施氮下最高,且5种植物不同施氮水平的NUE综合表现为:中氮>对照、高氮>低氮。(4)在影响NUE的两种乘项构成因素中,5种植物因生活型等方面的差异呈现出较为明显的氮素生产力(NP)和平均滞留时间(MRT)间的权衡,其中作为速生植物类引进的杂交狼尾草倾向于通过提高氮素生产力来提高氮素利用效率;而大型灌木类本地种——沙棘和长柄扁桃则偏向于通过提高滞留时间来提高氮素利用效率。研究认为,在砒砂岩区植被恢复物种选择和施氮干预中,建议栽植沙棘和长柄扁桃;并且适度施氮有助于提高区域适生植物氮素利用效率,促进植被恢复重建。

关键词:氮素生产力;氮素滞留时间;氮素利用效率;物种选择

中图分类号:Q945.79

文献标志码:A

Comparative Study on Nitrogen Utilization of Five Potentially Suitable Plants under Different Nitrogen Application Levels in Pisha Sandstone Area

QIN Jingjing¹, DU Feng^{1,2*}, YANG Lu¹, CHENG Shuai¹, LI Hongbin¹

(1 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The soil is poor and soil erosion is strong in the sandstone area of Ordos Plateau, and soil nitrogen literacy is also the main limiting factor of vegetation restoration and reconstruction in this area. The

收稿日期:2021-01-28;修改稿收到日期:2021-03-18

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0504504);国家自然科学基金(41771322)

作者简介:秦晶晶(1997—)女,在读硕士研究生,主要从事植被恢复生理生态研究。E-mail:1454272756@qq.com

*通信作者:杜峰,副研究员,硕士生导师,主要从事种群、群落及植物生理生态学研究。E-mail:dufeng@ms.iswc.ac.cn

study included three native species of *Achnatherum splendens*, *Amygdalus pedunculata* and *Hippophae rhamnoides*, and two exotic species of *Rheum palmatum* and *Pennisetum americanum* × *P. purpureum* as the subject. Using field test methods, we analyzed and compared the differences of individual growth performance and nitrogen utilization related indicators with these five potentially suitable plants in 4 nitrogen-applying levels [control N₀, low nitrogen (N_L, 0.1 g N/kg), medium nitrogen (N_M, 0.2 g N/kg) and high nitrogen (N_H, 0.3 g N/kg), under air-dried soil]. The aim is to provide theoretical basis for regional vegetation restoration and reconstruction from the perspective of nitrogen utilization and species selection and nitrogen application intervention. The results showed that: (1) the individual growth performance of the five plants was the best under the medium nitrogen level compared to other nitrogen levels. When the *R. palmatum*, *A. splendens*, *A. pedunculata*, *P. americanum* × *P. purpureum* and *H. rhamnoides* were at the medium nitrogen level, the plant height and biomass increased by 10.00, 41.41, 38.95, 151.45, 41.08 cm and 52.84, 60.55, 75.36, 668.67, 142.86 g, respectively. (2) The average nitrogen utilization efficiency (NUE) of 5 plants at 4 nitrogen levels was 1 154.42 g · g⁻¹, under each nitrogen level, the NUEs of *H. rhamnoides*, *R. palmatum*, *A. pedunculata*, *P. americanum* × *P. purpureum* and *A. splendens* are 1 546.16, 1 429.45, 1 389.75, 731.09, 675.65 g · g⁻¹, respectively; there are significant differences in NUE among the five plants. The comprehensive NUE performance of the plants at each nitrogen level is: *H. rhamnoides*, *A. pedunculata*, *R. palmatum* > *P. americanum* × *P. purpureum*, *A. splendens*. (3) The effect of nitrogen level on NUE in 5 plants was significant. The highest under medium nitrogen application, and the NUE of different nitrogen application levels in 5 plants was shown as: medium nitrogen > control, high nitrogen > low nitrogen. (4) Among the two multiplying factors that affect NUE, five plants showed a clear trade-off between nitrogen productivity (NP) and residence time (MRT) due to differences in life forms. Among them, *P. americanum* × *P. purpureum* introduced as a fast-growing plant tends to increase nitrogen use efficiency by increasing nitrogen productivity; while native species of large shrubs, *H. rhamnoides* and *A. pedunculata* tend to increase nitrogen use efficiency by increasing residence time. According to the research, it is suggested to plant *H. rhamnoides* and *A. pedunculata* in the selection of vegetation restoration species and nitrogen intervention in the sandstone area, and the moderate nitrogen use can help improve the efficiency of nitrogen utilization of regional suitable plants and promote vegetation restoration and reconstruction.

Key words: nitrogen productivity; nitrogen mean residence time; nitrogen use efficiency; species selection

鄂尔多斯高原地处干旱、半干旱过渡区的农牧交错带,是沙漠化的典型区域之一^[1]。区域土壤母质主要为石英质砒砂岩,无水时坚硬无比,遇水即碎,加之冻融风化作用,因而基岩抗侵蚀能力弱^[2-3],也造成了该区域砒砂岩基土壤入渗慢,持、保水能力差,超渗产流多;加之植被稀少,导致该区域水土流失严重。据测算,该区域每年向黄河输送泥沙高达1亿 t^[1],特别是在夏季暴雨季节,给当地生态环境造成了灾难性的影响^[4]。该区域前期的试验研究与植被恢复实践证明,植被恢复对减缓砒砂岩区的水蚀、风蚀有很大的作用^[5-6],有研究表明,从2002年到2008年,在皇甫川、孤山川、窟野河三支流,沙棘人工林(1 175 km²)平均每年总减洪量480.84万m³,总减沙量302.65万t^[7]。植被恢复同时还可以改善土壤结构,增加土壤养分含量^[8]:实施沙棘造林工程8年后,表层土壤总孔隙度比荒地提高7.4%,土壤粘性含量比荒地增加了75%,全氮、全磷、全钾

含量分别是荒地的1.72倍、1.13倍、1.36倍^[9]。综上,植被恢复重建是该区域减少水土流失,进行生态恢复与治理,增加农民收入的有效举措。然而,在以往植被恢复重建过程中存在适生植物选择不当,栽植后因土壤干旱、养分贫瘠等,栽、种林草植物成活、保存率低,生长慢,以及经济林果产量、质量低,经济效益差等问题^[10-11]。鄂尔多斯砒砂岩地区同众多其他陆地生态系统一样,氮素养分也是该区域植被恢复重建的主要限制因子之一^[12-14]。尽管总体上中国土壤氮素含量不高,全氮量仅为1.0~2.0 g/kg,而鄂尔多斯砒砂岩地区土壤氮素含量更低,仅约为0.81 g/kg^[15],在全国范围内处于较低水平^[16]。加之长期的水土流失也加剧了该地区土壤氮素等养分的不足。因而,现阶段植被恢复重建需解决问题之一是,如何在养分贫瘠生境中选择适生植物与进行适当的人为施肥干预,促进植被恢复重建。本研究拟从养分利用角度为区域植被恢复重建

中的物种选择与人为施肥干预提供理论依据。其中,物种选择主要目标为耐贫瘠、养分利用率高、生长表现好并具有经济效益的植物^[17-18];人为施肥目的为在砒砂岩区域养分背景下,为植被恢复确定最适的施氮水平和方式。

植物对土壤氮的利用特征主要体现为对氮水平的偏好,即植物在不同氮水平下具有不同的生长表现和不同的氮素吸收、利用与周转水平,特别是植物在长期演化过程中形成了与自身生长型、生活型相匹配的氮素利用策略^[19]。植物的氮素利用效率(nutrient use efficiency, NUE)指植物吸收单位氮素养分形成的生物量^[20]。由于研究对象和目的的不同,不同学者关于 NUE 概念的理解持不同观点^[21],如农学家通常使用作物的经济产量测算 NUE,生理学家偏重于生理效率与氮的体内合成、运移、储存和体内外循环。生态学更多的是采用 Berendse 和 Aerts 提出的对植物生长有限制作用的单位养分物质在植物体内的平均滞留时间(mean residence time, MRT)和氮素生产力(N productivity, NP)来表示 NUE^[22]。NP 反映的是植物的迅速生长策略,采用 NP 来提高和维持 NUE 的植物,养分吸收和利用快,通过枯枝落叶等形式与周边环境的养分周转迅速,这种氮素利用策略的适应性演化发端于富养生境,典型植物有温带和热带的速生草本植物,个体通常较为小型化,生长周期短;MRT 反映的是植物的养分保持策略,采用 MRT 来提高和维持 NUE 的植物,养分吸收慢但在体内贮留时间长,与环境间的养分周转慢,这种氮素利用策略的适应性演化发端于贫养生境,典型植物有叶片极端退化的仙人掌等沙漠适生类植物,在温带、寒温带地区采用 MRT 策略的植物其个体通常为大型常绿或落叶乔、灌木。因此不同植物维持和提高自身的氮素利用效率时,在 NP 和 MRT 二乘项因素间存在协调与权衡关系。通过将 NUE 分解为 NP 和 MRT,对生态学上理解植物的氮素利用策略更具有研究意义^[23]。对于植物 NP、MRT、NUE 的相关研究,国外主要是采用控制实验,偏向于研究影响植物 NP 和 MRT 的因素以及不同物种之间、同一物种不同器官之间、同一物种不同个体大小之间 NP 和 MRT 的关系^[19,24]。Vázquez De Aldana 和 Berendse 比较了 6 种禾本科牧草(多年生黑麦草、燕麦草、红羊茅、黄花茅、羊茅、毛茛)、两种养分生境(贫养、富养)下的植物 NUE,发现 NP 和 MRT 之间存在权衡关系^[25]。通过对 4 种生活型(禾草、非禾草、落叶树

木、常绿树木)14 种植物的地上部 NUE 的比较分析,Eckstein 和 Karlsson 也认为植物种间在 NP 与 MRT 存在明显的权衡关系^[26]。国内相关研究较少,袁志友对农牧交错区几种植物的氮素利用效率进行了研究,并将其与植物生活型联系起来,从理论上探讨了植物氮素利用的策略权衡^[23]。本研究以鄂尔多斯砒砂岩区 5 种潜在适生植物长柄扁桃(*Amygdalus pedunculata*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、掌叶大黄(*Rheum palmatum*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)和杂交狼尾草(*Pennisetum americanum* × *P. purpureum*)为研究对象,利用 Berendse 和 Aerts 提出的 NUE 概念对 5 种植物的氮素利用特征进行了比较分析,从氮素利用角度为区域植被恢复的物种选择提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

试验地点选择在鄂尔多斯准格尔旗圪秋沟(110°36'12.4"E, 39°46'10.3"N)水土保持示范园区,属中温带大陆性季风气候,土壤类型有栗钙土和黄土。全年光照充足,四季分明,无霜期短,降水少且时空分布极为不均,蒸发量大。年最高气温为 38.3 °C,最低气温为 -30.9 °C,年均气温 6.2~8.7 °C,无霜期 148 d。年日照时数 2 900~3 100 h,年平均降水量约 400 mm,集中于 7—9 月,年均蒸发量 2 093 mm。试验地土壤全 N、全 P、全 K、速效 P、速效 K 含量分别是 0.22 g/kg、0.81 g/kg、17.31 g/kg、0.37 mg/kg、106.77 mg/kg,有机质 4.61 g/kg,pH 值 9.16。

1.2 试验设计与处理

本研究选取了具有较高经济价值的 2 种潜在适生外来引种植物掌叶大黄和杂交狼尾草,以及 3 种具有潜在恢复价值的本地种植物芨芨草、长柄扁桃、沙棘。其中掌叶大黄、杂交狼尾草和芨芨草为草本植物,长柄扁桃和沙棘为灌木。

试验所选肥料为缓释氮肥(多肽尿素),由河南晋开化工投资控股集团有限公司生产,多肽尿素中添加了聚天冬氨酸,其里面含有肽键和羧基等活性基团,可以吸附土壤中的阳离子从而提高肥效 20%以上,能提高土壤元素有效性,减少对环境的污染。

本研究采用田间试验,根据当地土壤养分水平,结合农民施肥经验设定 4 个施氮水平,分别为高(0.3 g N/kg 风干土, N_H)、中(0.2 g N/kg 风干土, N_M)、低(0.1 g N/kg 风干土, N_L)和对照(不施氮,

N_0)。试验采用随机区组设计,区组因素为5种植物,组内因素为不同氮素水平,每处理4个重复,共计80个植物个体。试验测定因变量为植物个体生长表现与体内含氮量。

除杂交狼尾草是种子萌发种植外,其余4种植物采取移栽的方法。4月中旬种植杂交狼尾草,5月中旬本地种返青后,其余4种植物从野外试验研究区选取形态一致的植株移栽于试验地,移栽后保苗1个月。播种和移栽后,在试验对象周围使用尼龙纱笼(目数60)围挡,以便及时收集枯落叶。施氮处理为6月18日定苗后和6月25日雨后分2次施加。

试验初期于6月18日,选择试验地内未施氮组(N_0)植物个体,根据其生长形态对每种植物的12株个体齐地面剪下带回实验室记录相关特征,如株高、丛幅或基径、分枝数或分蘖数、叶片数和枝下高等,然后根据非试验对象的相关指标拟合试验对象的初始地上生物量和初始含氮量,拟合方法参见公式1~8。

试验结束期,于10月1日,将每种植物的每个个体地上部分齐地面剪下,并采集枯落叶,贴好标签,带回实验室称量植物鲜重生物量和枯落叶重量。将采集好的各个植株个体的枯落叶和植株个体置烘箱内105℃杀青30 min,再在65℃下烘干至恒重,称量干重和枯落叶干重。地上部分个体试验结束期含氮量和枯落叶含氮量测定方法为:烘干粉碎过筛后,经 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮,凯氏定氮法测定。

1.3 数据处理

1.3.1 植物初始生物量与初始含氮量的估计 不同植物种有不同的形态特征,根据植株高度、叶片数量、丛幅乘积、基径、分枝数相关指标进行拟合计算初始生物量,再根据初始生物量拟合计算初始含氮量。

1)芨芨草 初始生物量拟合公式为:

$$Y_1 = -6.82874 + 0.02401X_1 + 0.21866X_2 + 0.04159X_3, R^2 = 0.63894, F = 6.30887, P = 0.02761 \quad (1)$$

初始含氮量拟合公式为:

$$Y_2 = 0.00639 + 0.00627Y_1, R^2 = 0.92936, F = 119.41445, P = 4.36067 \quad (2)$$

2)掌叶大黄 初始生物量拟合公式为:

$$Y_1 = -7.49922 + 0.92162X_1 + 1.90014X_2 - 0.44544X_3, R^2 = 0.80887, F = 13.69642, P = 0.0043 \quad (3)$$

初始含氮量拟合公式为:

$$Y_2 = 0.01317 + 0.00141Y_1, R^2 = 0.45243, F = 8.43629, P = 0.01986 \quad (4)$$

(1)、(2)、(3)、(4)式中, X_1 为植株高度、 X_2 为叶片数量、 X_3 为丛幅乘积; Y_1 是初始地上生物量, Y_2 是地上部初始含氮量。

3)长柄扁桃 初始生物量的拟合公式为:

$$Y_1 = -4.15004 + 0.04217X_1 + 0.34546X_2 + 0.07493X_3, R^2 = 0.33314, F = 2.49867, P = 0.15662 \quad (5)$$

初始含氮量拟合公式为:

$$Y_2 = 0.00482 + 0.0059Y_1, R^2 = 0.75476, F = 28.69939, P = 6.79967 \quad (6)$$

4)沙棘 初始生物量的拟合公式为:

$$Y_1 = 0.2198 + 0.04826X_1 + 0.24039X_2 + 0.20617X_3, R^2 = 0.31871, F = 2.55937, P = 0.13802 \quad (7)$$

初始含氮量拟合公式为:

$$Y_2 = -0.00365 + 0.00875Y_1, R^2 = 0.93583, F = 146.83307, P = 7.08643 \quad (8)$$

(5)、(6)、(7)、(8)式中, X_1 为植株高度、 X_2 为基径、 X_3 为分枝数; Y_1 是初始地上生物量, Y_2 是地上部初始含氮量。

5)狼尾草 因为狼尾草采用的是种子萌发,初始生物量和含氮量与其他植物个体相比,趋近于零。

1.3.2 氮素利用相关指标的计算 本研究目的是比较5种不同种类的植物在不同施氮水平下的氮素利用效率,因此可假定系统处于稳定状态。根据氮素生产力的定义^[22],可知:

$$NP = \frac{1}{N} \times \frac{dW}{dt} \quad (9)$$

对于稳定的生态系统,氮库平均值 $N = \frac{N_1 + N_2}{2}$, N_1 为试验植株个体初期的含氮量, N_2 为试验植株个体末期的含氮量。 dW 为6月18日(t_1)至10月1日(t_2)间植株个体生物量变化量, dt 为时间变化量。

根据Berendse(1987)提出的NUE概念^[22],可知:

$$MRT = \frac{N}{N_{loss}} \quad (10)$$

$$N_{loss} = \frac{L_N}{dt} \quad (11)$$

忽略因淋洗造成的氮损失,枯落叶含氮量表示

为 L_N , 单位为 mg。

因氮素利用效率(NUE)为氮素生产力(NP)和平均滞留时间(MRT)的乘积, 所以每株植物的NUE计算公式如下:

$$NUE = NP \times MRT = \frac{dw}{N_{loss}} \quad (12)$$

1.3.3 数据分析及处理 本试验使用 Origin2018 进行绘图和拟合, 使用 DPS 软件进行方差齐性检验和方差分析。试验中观测变量, 即因变量为个体生长水平、NUE、NP 和 MRT; 自变量因素为施氮水平与植物种类。因变量数列使用 Bartlett 法进行方差齐性检验后, 如方差不齐先进行对数变换, 之后采用双因素方差分析进行显著性检验, 对因变量影响显著的自变量进行多重比较, 多重比较采用 Tukey 检验法。

2 结果与分析

2.1 不同施氮水平下 5 种植物地上生物量的响应

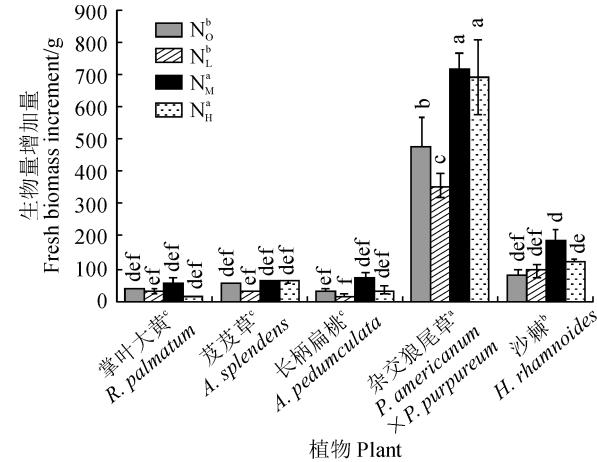
5 种植物生物量增加量对土壤氮水平具有不同的响应程度。由图 1 可以看出, 试验期间 5 种植物在各施氮水平下形成的地上生物量有显著差别, 其中杂交狼尾草地上生物量增加量最大, 均值为 549.1013 g, 沙棘次之均值为 118.5346 g, 掌叶大黄、芨芨草和长柄扁桃均值分别为 32.2843、51.3418 和 39.6232 g。施氮处理中, 5 种植物在 4 种施氮水平下都表现出了不同的生物量增加量, 中等施氮和高氮水平下, 5 种植物总体上在试验期间形成的地上生物量显著高于未施氮对照和低氮。处理因素中植物种类和土壤根际施氮水平对地上生物量的增加影响显著, 且二者对地上生物量形成具有显著交互效应(表 1)。

5 种植物对土壤氮水平具有不同的响应程度。由图 2 可以看出, 试验期间 5 种植物在各施氮水平下的株高增长量具有显著差别, 杂交狼尾草在试验期间的株高增长量显著高于其他 5 种植物, 均值为 95.2231 cm。在 4 种施氮处理中, 5 种植物的株高增长具有不同的表现, 中等施氮和未施氮水平下, 5 种植物在试验期间的株高增长量显著高于低氮和高氮水平。处理因素中植物种类和土壤根际施氮水平对植物株高增长影响显著, 且二者对植物株高增长具有交互效应(表 1)。

2.2 5 种植物氮素利用对施氮处理的响应

5 种植物对土壤的 4 种施氮水平具有不同的响应程度。由图 3 可知, 5 种植物在各施氮水平下的

氮素生产力存在差别。其中, 杂交狼尾草的氮素生产力最大, 均值为 $15.0732 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; 掌叶大黄次之, 均值为 $3.4265 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; 芨芨草和沙棘的氮素生产力较小, 均值分别为 1.3827 和 1.8321 $\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; 长柄扁桃的氮素生产力最小, 均值为 $1.1126 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。在 4 种施氮处理中, 多重比较结果显示中等施氮处理对各植物的氮素生产力影响最大, 然后依次为未施氮、高氮、低氮。处理因素中植物种类和土壤根际施氮水平对氮素生产力的影响显著, 且二者对氮素生产力的影响具有显著的交互作用(表 2)。



图中上标小写英文字母表示物种间或者施氮水平间
多重比较结果。下同

图 1 不同施氮条件下 5 种植物的鲜重生物量增加量
The superscript English letters are multi-comparison
results. The same as below

Fig. 1 Fresh biomass increment of five plants under
different nitrogen treatments

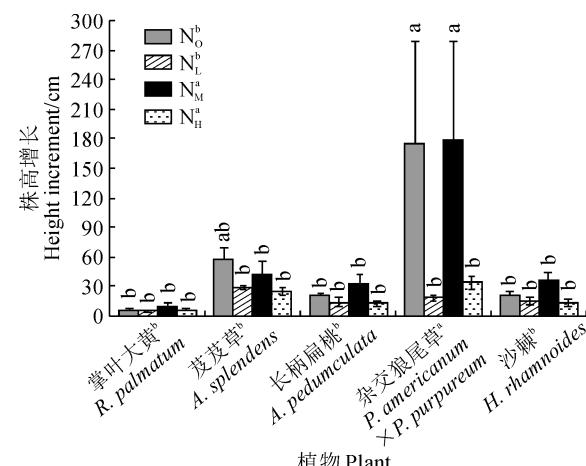


图 2 不同施氮条件下 5 种植物株高增长

Fig. 2 Height increment of five plants under different
nitrogen treatments

表1 植物株高增长和生物量增长量对不同施氮处理的响应

Table 1 Responses of plant height and fresh biomass increment to different nitrogen application treatments

变异来源 Source	生物量鲜重增长量 Fresh biomass increment				株高增长 Height increment			
	平方和 Sum of squares	F 值 F value	P 值 P value	平方和 Sum of squares	F 值 F value	P 值 P value		
物种 Species	3131376.22	425.86	1.00E-04	73822.58	12.64	1.00E-04		
氮素 N	98407.52	17.84	1.00E-04	26826.15	6.13	1.05E-03		
物种×氮素 Species×N	177328.35	8.04	1.00E-04	47724.41	2.72	5.25E-03		

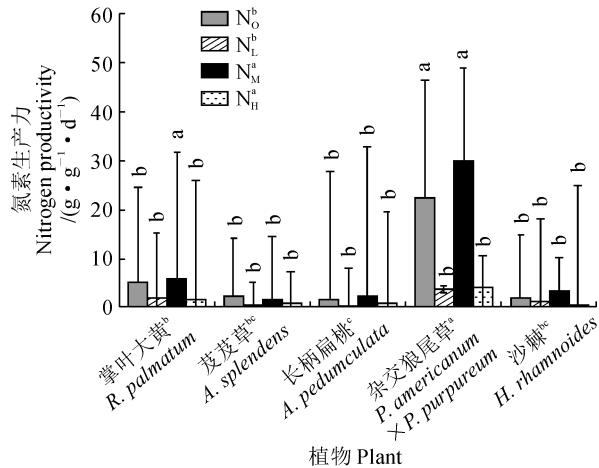


图3 不同施氮条件下5种植物氮素生产力

Fig. 3 Nitrogen productivity of five plants under different nitrogen application treatments

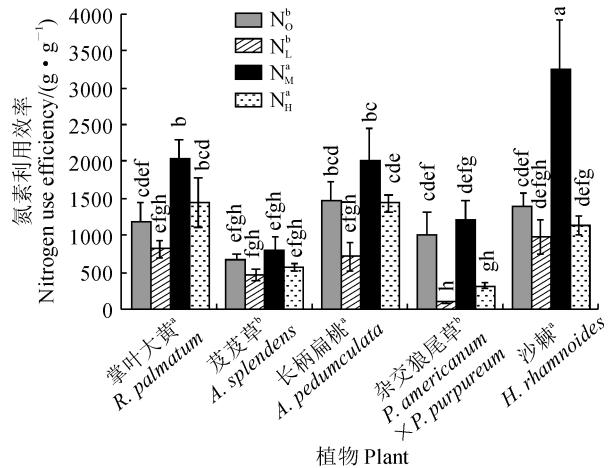


图5 不同施氮条件下5种植物氮素利用效率

Fig. 5 Nitrogen use efficiency of five plants under different nitrogen application treatments

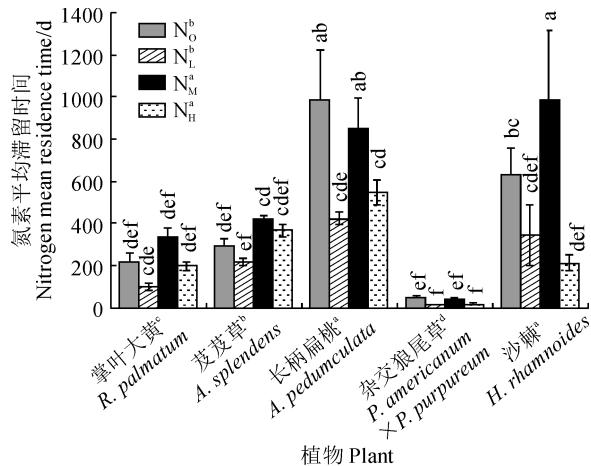


图4 不同施氮条件下植物氮素平均滞留时间

Fig. 4 Nitrogen mean residence time of five plants under different nitrogen application treatments

由图4可以看出,5种植物各施氮水平下的平均滞留时间具有显著差别。长柄扁桃和沙棘的平均滞留时间最长,均值分别为667.6473 d 和 575.0195 d;其次为芨芨草,滞留时间均值为372.4092 d;掌叶大黄滞留时间均值为198.8143 d,杂交狼尾草的滞留时间最短均值为30.4224 d。施氮处理中,5种植物在4种氮水平下也表现出明显的差异,5种植物

的平均滞留时间在中等施氮水平下最大,其次为未施氮水平,低氮和高氮最小。植物种类和土壤根际施氮水平两处理因素对平均滞留时间的影响显著,且二者对平均滞留时间的影响同样具有显著的交互作用(表2),说明5种植物对土壤施氮水平具有不同的响应程度。

由图5可知,试验期间5种植物在各施氮水平下的氮素利用效率有显著差别。其中,沙棘、掌叶大黄和长柄扁桃的氮素利用效率较大,均值分别为1 546.1573、1 429.4521和1 389.7584 $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,芨芨草和杂交狼尾草的氮素利用效率较小,均值分别为675.6539和731.0934 $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。在4种施氮处理中,试验植物的氮素利用效率也有显著差异,中等施氮水平下氮素利用效率最高,其次分别为高氮水平和未施氮水平,低氮水平的氮素利用效率最低。植物种类和土壤根际施氮水平两处理因素对氮素利用效率的影响显著,且二者对氮素利用效率的影响具有显著的交互作用(表2),说明5种植物对土壤施氮水平具有不同的响应程度。

2.3 植物氮素利用中氮素生产力和平均滞留时间的权衡与种间差别

图6显示了5种植物在4个施氮水平下的氮素

表2 植物氮素生产力、氮素利用效率和平均滞留时间对不同施氮处理的响应

Table 2 Responses of plant nitrogen productivity, nitrogen use efficiency and residence time to different nitrogen fertilizer treatments

变异来源 Source	氮素生产力 Nitrogen productivity			氮素利用效率 Nitrogen use efficiency			平均滞留时间 Mean residence time		
	平方和 Sum of squares	F 值 F value	P 值 P value	平方和 Sum of squares	F 值 F value	P 值 P value	平方和 Sum of squares	F 值 F value	P 值 P value
物种 Species	12 834 264.08	44.84	1E-04	11 086 505.38	31.73	1E-04	4 424 712.50	71.51	1E-04
氮素 N	11 915 606.24	55.51	1E-04	15 286 026.62	58.33	1E-04	1 823 700.36	39.30	1E-04
物种×氮素 Species×N	5 992 142.01	6.98	1E-04	7 845 132.20	7.48	1E-04	1 754 126.90	9.45	1E-04

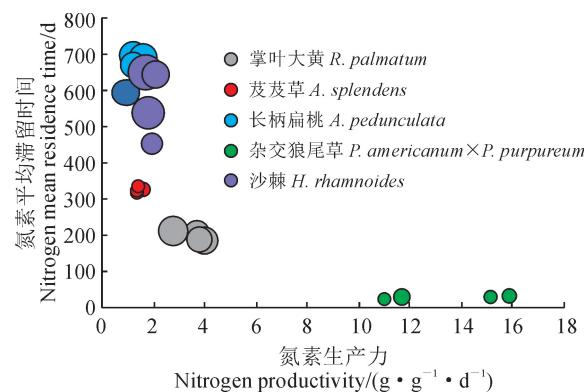


图6 5种植植物氮素利用在氮素生产力和平均滞留时间间的权衡

Fig. 6 Trade-off bubble plot of nitrogen use efficiency between nitrogen productivity and mean residence time of plants

利用效率在其乘项构成因素 NP 和 MRT 之间呈双曲线分布, 植物在氮素利用上存在 NP 和 MRT 间的权衡。在影响氮素利用效率的两个因素 NP 和 MRT 中, 速生植物杂交狼尾草氮素利用效率受 NP 的影响较大, 倾向于通过 NP 提高氮素利用效率。相反, 本地种茵草和灌木植物长柄扁桃和沙棘等的氮素利用效率受 MRT 的影响较大, 在氮素利用上较为保守。另外, 同一种植物在 NP—MRT 和 NUE 的气泡图中相对集中, 说明尽管施氮水平对 5 种植物的氮素利用效率有显著影响, 但同一种植物的氮素利用效率相对稳定, 植物间氮素利用特征差别远大于土壤氮环境等的影响。

3 讨论

3.1 5种植植物氮素利用效率的差异与评价

氮素是陆地生态系统中植物生长的主要影响因子, 作为植物蛋白质的重要组成成分, 氮素的吸收直接影响植物生物量的积累^[27]。因此在陆地生态系统中, 氮往往是植物生长的限制因子, 植物为了提高

对养分贫瘠生境的适应性, 必须提高对所吸收氮素的利用效率^[28]。在植物进化过程中, 为了适应不同的生长环境, 不同的植物种, 不同的植物生活型, 乃至同株植物的不同器官形成了各自不同的氮素利用效率^[29]。本试验通过设置 4 种施氮水平来探讨 5 种不同植物种的氮素利用效率差异。结果表明 5 种植物在各施氮水平下氮素利用效率有明显不同, 数值由大到小排序为: 沙棘 > 掌叶大黄 > 长柄扁桃 > 杂交狼尾草 > 茵草。5 种植物种的氮素利用效率在 4 种施氮水平下植物的氮素利用效率进行多重比较后发现, 破砂岩区 5 个植物种的氮素利用效率均在中等施氮水平下最大。5 种植物在 4 种氮水平下的 NUE 变化结果显示, 植物的氮素利用效率并不是随着土壤根际氮素水平的提高而一直增加, 而是在达到一定值后有所下降, 该结果符合克劳斯曼营养指数, 即在养分供应恒定的情况下, 物种的氮利用效率会随着养分供应的增加而增加, 直至达到一定的养分供应量, 然后下降^[25]。从 5 种植物的生活型角度分析氮素利用效率差异, 可以发现对于不同生活型植物, 草本植物的 NP 高于灌木, 而灌木具有较高的 MRT, 灌木相对于草本也具有较高的 NUE, 这与多名学者的研究结果保持一致^[15]。

根据 NUE 的计算公式可以发现, N 库的大小对 NUE 至关重要, 植物可以通过以下方式, 维持和提高 NUE: 1) 提高氮素回收转移效率, 可以同时提高氮素生产力和滞留时间; 2) 通过自身调节降低组织中的氮素浓度, 适当增加 C/N 比, 以提高氮素生产力; 3) 延长组织寿命, 降低植物组织的更新速度, 减少凋落物的量, 增加氮素滞留时间; 4) 通过物质、能量投入在组件间的再分配, 如减少徒长等, 降低凋落物占比, 增加生长季内氮素生产力和滞留时间。

3.2 五种植植物氮素利用的策略

为了更好地了解植物的不同氮素利用策略, Be-

rendse 和 Aerts 将 NUE 进一步分解为氮素生产力 (nitrogen productivity, NP) 和氮素滞留时间 (mean residence time, MRT) 两部分的乘积^[22]。NP 反映的是植物的迅速生长策略, 它的大小取决于植物个体本身的光合利用效率和氮素在植物体不同组织内部的分配情况^[25]。MRT 反映了植物的养分保持策略, 它的值与氮素回收效率和植物组织的寿命有关^[30-31]。大量的研究结果表明^[19,32-34], 不同植物种的 NP 和 MRT 之间存在权衡关系, 这种权衡关系反映了植物对不同养分生境的适应策略。

基于此对砒砂岩区乡土种和外来种共 5 种植物 NUE 的组成参数 NP、MRT 进行研究分析, 结果表明: 5 种植物在不同的氮水平下有不同的氮素利用策略。速生植物杂交狼尾草氮素利用效率在 NP 与 MRT 的权衡中受 NP 的影响较大, 该植物种为了适应贫瘠的养分生境, 可通过提高 NP 来提高氮素利用效率。本地种芨芨草、灌木类植物长柄扁桃和沙棘的氮素利用效率在 NP 与 MRT 的权衡中受 MRT 的影响较大, 在适应贫瘠的养分生境时倾向于提高 MRT 来提高 NUE 的氮素利用策略。掌叶大黄在 NP 和 MRT 的权衡中, 没有表现出明显的倾向性, Hiremath^[35] 对 3 种木本植物 (*Cedrela odorata*, *Cordia alliodora* 和 *Hieronima alchorneoides* Allemao) 氮素利用效率差异的研究中也没有发现这种规律, 造成这种现象的可能原因是: 1) 研究对象不同, 每种植物有着不用的生理特性, 需要细化讨论与实验; 试验条件不同, 例如有的是室内试验, 有的是在野外。2) 参数计算方法不同, 不同的学者基于不同的实验目的采用的计算参数也不同。计算公式本身就存在一定的相关性, 本研究是根据植物地上部分来计算 NUE 的, 可能与整株计算存在差异。3) NP 和 MRT 的关系并非直接相关, 可能是受其他相关关系调控的间接关系。例如, MRT 与叶片寿命呈正相关, NP 与 MRT 的值还与植株个体的大小有关。4) 氮素对植物生长表现的影响不是单一独立的, 还与磷、碳、钾等其他养分之间的相互作用存在一定的关系。植物的氮素利用效率研究是一个比较复杂的问题, 如果想进一步的探讨可通过更为细化的实验进行比较分析。

3.3 因地制宜地选择植被恢复的植物种类

山仑等认为在治理水土流失时最有效措施必须以草先行, 因为草本植物具有繁殖快、成活率高和适应性强的特点, 所以先种草控制水土流失, 提高土壤肥力, 为之后灌木的生长提供良好的土壤环境^[36]。

对于砒砂岩的治理, 植被恢复是迅速恢复生态系统功能, 治理水土流失, 改善土壤养分环境的主要措施。砒砂岩区植被恢复重建中选择适宜的植物种是砒砂岩区治理成功的第一步。在进行植被恢复引种工作时, 可根据当地土地利用类型、土壤养分条件和现存植被状况等因素, 因地制宜地进行引种, 或人工施肥干预等方式方法促进植被恢复。建议: 1) 在土壤养分相对贫瘠且不适用于人工干预施肥处理的情况下, 可优先考虑长柄扁桃和沙棘, 这 2 种植物的养分滞留时间较长, 养分在植物体内周转效率高, 能适应较贫瘠的环境。2) 进行人工干预施氮处理时, 可依据当地的氮素贫瘠程度, 适度施氮以提高氮素利用, 有助于提高土壤质量和土壤肥力。3) 新近撂荒地土壤肥力尚可, 但现存植被状况较差, 可优先选择速生植物种杂交狼尾草。该植物是草本植物, 有较高的氮素生产力, 易生长可作为先锋物种引种, 成功引种后可以起到改善群落环境, 改良土壤理化性质和提高土壤养分水分等作用。选择合适的植物种类只是植被恢复的开始, 还应考虑不同植物种之间的合理配置才能起到更好的生态水土保持效益。根据土壤养分条件, 除应进行适当人为施氮干预促进恢复外, 还应综合考虑除氮素外的其他养分限制, 如碳、磷和其他微量元素等。

4 结 论

本试验基于砒砂岩区植被恢复物种选择中存在物种选择不当和土壤养分贫瘠限制植物生长的问题, 通过比较分析砒砂岩区具有潜在水土保持生态经济效益的 5 种植物的氮素利用效率等特征的差异, 探讨了植物氮素利用方面在氮素生产力和体内平均滞留时间的权衡。结果认为: 总体上, 灌木类植物种沙棘和长柄扁桃具有较高的氮素利用效率, 即便在低氮和未施氮对照中也具有较高的氮素利用效率, 较为耐贫瘠, 在氮素利用策略上主要通过滞留时间来维持和提高氮素利用效率, 因此, 在砒砂岩区植被恢复物种选择上, 建议在低氮生境中栽植长柄扁桃和沙棘; 作为速生植物种的杂交狼尾草, 具有较高的氮素利用生产力, 可以作为先锋物种引种, 在沟谷、河阶地, 或人为施氮地等高氮生境中种植。在人工施氮干预方面, 中等施氮水平下各植物种的氮素利用效率最大, 5 种植物的个体生长表现也最好, 在施氮水平上, 对土壤养分较为贫瘠的土地, 将施氮量控制在中等施氮水平。

参考文献:

- [1] 王丹丹,王 娜,晓 兰.浅析准格尔旗水土流失问题[J].内蒙古林业调查设计,2016,39(4): 9-49.
WANG D D, WANG N, XIAO L. Analysis of soil erosion in Zhungeer[J]. *Inner Mongolia Forestry Investigation and Design*, 2016, 39(4): 9-49.
- [2] 李长明,王立久,杨大令,等.黄河砒砂岩中蒙脱石的基本特征[J].人民黄河,2016,38(6): 11-14.
LI C M, WANG L J, YANG D L, et al. Characters of montmorillonite of pisha standstone[J]. *Yellow River*, 2016, 38(6): 11-14.
- [3] 杨才千,刘 强,瞿 冯,等.砒砂岩风化特性试验[J].水利水电科技进展,2019,39(5): 10-15.
YANG C Q, LIU Q, QU F, et al. Experimental study on weathering characteristics of Pisha sandstone[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2019, 39(5): 10-15.
- [4] 李传福,刘 阳,党晓宏,等.鄂尔多斯砒砂岩区生态恢复研究进展[J].内蒙古林业科技,2019,45(1): 49-52.
LI C F, LIU Y, DANG X H, et al. Research progress of ecological restoration in sandstone area of Ordos[J]. *Journal of Inner Mongolia Forestry Science Technology*, 2019, 45(1): 49-52.
- [5] 刘 颖.我国植被水土保持功能研究进展[J].农业与技术,2014,34(12): 18.
LIU Y. Research progress of soil and water conservation function of vegetation in China[J]. *Agriculture and Technology*, 2014, 34(12): 18.
- [6] 王愿昌,吴永红,闵德安,等.砒砂岩区水土流失治理措施调研[J].国际沙棘研究与开发,2007,(1): 39-44.
WANG Y C, WU Y H, MIN D A, et al. Investigation on measures for soil erosion in Soft Rock Area[J]. *International Hippophae rhamnoides Research and Development*, 2007, (1): 39-44.
- [7] 吴永红,胡建忠,闫晓玲,等.砒砂岩区沙棘林生态工程减洪减沙作用分析[J].中国水土保持科学,2011,9(1): 68-73.
WU Y H, HU J Z, YAN X L, et al. Reduction effects of flood and sediment yield of *Hippophae rhamnoides* Linn. forest in soft sandstone area[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(1): 68-73.
- [8] 梁 月,殷丽强.砒砂岩区沙棘人工林对土壤化学性质的影响分析[J].国际沙棘研究与开发,2014,12(2): 15-17.
LIANG Y, YIN L Q. Impact analysis of artificial seabuckthorn plantation on soil chemical property in arsenic sandstone area[J]. *The Global Seabuckthorn Research and Development*, 2014, 12(2): 15-17.
- [9] 何京丽,殷丽强,郭建英,等.砒砂岩地区沙棘生态工程的土壤修复效果分析[J].国际沙棘研究与开发,2013,11(3): 19-23.
HE J L, YIN L Q, GUO J Y, et al. The effectiveness analysis of soil remediation after the seabuckthorn ecological engineering in arsenic sandstone areas[J]. *The Global Seabuckthorn Research and Development*, 2013, 11(3): 19-23.
- [10] 温仲明,焦 锋,卜耀军,等.植被恢复重建对环境影响的研究进展[J].西北林学院学报,2005,(1): 10-15.
WEN Z M, JIAO F, BU Y J, et al. Advances in researches of impact of revegetation on environment[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2005, (1): 10-15.
- [11] 程积民,万惠娥,胡相明.黄土丘陵区植被恢复重建模式与演替过程研究[J].草地学报,2005,(4): 324-327.
CHENG J M, WAN H E, HU X M. Study of vegetation restoration and rebuilding pattern and the process of succession in the loess hilly regions[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2005, (4): 324-327.
- [12] 顾振宽,杜国祯,朱炜歆,等.青藏高原东部不同草地类型土壤养分的分布规律[J].草业科学,2012,29(4): 507-512.
GU Z K, DU G Z, ZHU Y Y, et al. Different grassland types in eastern Qinghai Tibet Plateau distribution of soil nutrients[J]. *Pratacultural Science*, 2012, 29(4): 507-512.
- [13] 王 芳,宋明华,黄 政,等.东北北部温带森林和草地土壤养分分布及影响因素[J].生态环境学报,2014,23(8): 1 280-1 285.
WANG F, SONG M H, HUANG M, et al. The spatial distribution of soil nutrients and the controlling factors of temperate forest and steppe in northeastern China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(8): 1 280-1 285.
- [14] 周传艳,陈 训,杨 泊,等.黔中喀斯特石漠化地区不同土地利用类型土壤养分含量研究[J].安徽农业科学,2008,36(34): 15 071-15 073.
ZHOU C Y, CHEN X, YANG B, et al. Soil nutrient content of different land-use types in Karst rocky desertification area in central Guizhou Province[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(34): 15 071-15 073.
- [15] 张赟赟.鄂尔多斯高原砒砂岩区六种植物氮素利用和根系营养研究[D].陕西杨陵:西北农林科技大学,2019.
- [16] 王雁南,杜 峰,隋媛媛,等.黄土丘陵区撂荒群落演替序列种根系对氮素施肥方式和水平的形态响应[J].生态学报,2017,37(9): 2 913-2 925.
WANG Y N, DU F, SUI Y Y, et al. Morphological responses of six successional plant species in old-fields of the Loess Plateau to the pattern and level of nitrogen application in a pot experiment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(9): 2 913-2 925.
- [17] 姚文艺,肖培青,王愿昌,等.砒砂岩区侵蚀治理技术研究进展[J].水利水电科技进展,2019,39(5): 1-9.
YAO W Y, XIAO P Q, WANG Y C, et al. Research progress on soil erosion control technologies in Pisha sandstone areas[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2019, 39(5): 1-9.

- [18] 陈科皓,韩霁昌,程杰,等.砒砂岩研究进展及利用前景[J].中国农学通报,2016,32(17): 72-77.
- CHEN K H, HAN J C, CHENG J, et al. Research progress and utilization prospect of soft rock[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016,32(17): 72-77.
- [19] SILLA F, ESCUDERO A. Nitrogen-use efficiency: Trade-offs between N productivity and mean residence time at organ, plant and population levels[J]. *Functional Ecology*, 2004,18(4): 511-521.
- [20] CHAPIN F S III, BLOOM A J, FIELD C B, et al. Plant responses to multiple environmental factors[J]. *BioScience*, 1987,37(1): 49-57.
- [21] VITOUSEK P. Nutrient cycling and nutrient use efficiency [J]. *The American Naturalist*, 1982,119(4): 553-572.
- [22] BERENDSE F, AERTS R. Nitrogen-use-efficiency: a biologically meaningful definition? [J]. *Functional Ecology*, 1987,1(3): 293-296.
- [23] 袁志友.农牧交错区主要植物的氮素利用效率[D].北京:中国科学院研究生院(植物研究所),2004.
- [24] ECKSTEIN R L, KARLSSON P S. Variation in nitrogen-use efficiency among and within subarctic graminoids and herbs [J]. *New Phytologist*, 2001,150(3): 641-651.
- [25] DE ALDANA B R V, BERENDSE F. Nitrogen-use efficiency in six perennial grasses from contrasting habitats [J]. *Functional Ecology*, 1997,11(5): 619-626.
- [26] ECKSTEIN R L, KARLSSON P S. Above-ground growth and nutrient use by plants in a subarctic environment: Effects of habitat, life-form and species[J]. *Oikos*, 1997,79 (2): 311-324.
- [27] 刘敏娜,刘晓霞,丁文雅,等.不同菠菜基因型氮素吸收与利用效率的差异及其评价[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2012,38(5): 599-607.
- LIU M N, LIU X X, DING W Y, et al. Variation in nitrogen uptake and utilization efficiency in spinach genotypes and its evaluation[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2012,38(5): 599-607.
- [28] 张亚丽,樊剑波,段英华,等.不同基因型水稻氮利用效率的差异及评价[J].土壤学报,2008,45(2): 267-273.
- ZHANG Y L, FAN J B, DUAN Y H, et al. Variation of nitrogen use efficiency of rice different in genotype and its evaluation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008,45(2): 267-273.
- [29] 武娇娜,魏晓东,李霞,等.植物氮素利用效率的研究进展[J].植物生理学报,2018,54(9): 1401-1408.
- WU J N, WEI X D, LI X, et al. Research progress in nitrogen use efficiency in plants[J]. *Plant Physiology Journal*, 2018,54(9): 1401-1408.
- [30] 袁志友,李凌浩,韩兴国.藜个体在高密度种群中的氮素利用效率[J].植物生态学报,2004,28(3): 294-299.
- YUAN Z Y, LI L H, HAN X G. Nitrogen use efficiency of competing individuals in a dense stand of an annual herb, *Chenopodium album*[J]. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2004,28(3): 294-299.
- [31] KAZAKOU E, GARNIER E, GIMENEZ O. Contribution of leaf life span and nutrient resorption to mean residence time: Elasticity analysis[J]. *Ecology*, 2007,88(7): 1857-1863.
- [32] IVERSEN C M, BRIDGHAM S D, KELLOGG L E. Scaling plant nitrogen use and uptake efficiencies in response to nutrient addition in peatlands[J]. *Ecology*, 2010,91(3): 693-707.
- [33] GONZÁLEZ-MUÑOZ N, CASTRO-DÍEZ P, PARKER I M. Differences in nitrogen use strategies between native and exotic tree species: Predicting impacts on invaded ecosystems[J]. *Plant and Soil*, 2013,363(1/2): 319-329.
- [34] YASUMURA Y, HIKOSAKA K, MATSUI K, et al. Leaf-level nitrogen-use efficiency of canopy and understorey species in a beech forest[J]. *Functional Ecology*, 2002,16(6): 826-834.
- [35] HIREMATH A J. Photosynthetic nutrient-use efficiency in three fast-growing tropical trees with differing leaf longevities [J]. *Tree Physiology*, 2000,20(14): 937-944.
- [36] 山仑.怎样实现退耕还林还草[J].林业科学,2000,(5): 2-4.
- SHAN L. How to realize returning farmland to forest and grassland[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2000,(5): 2-4.

(编辑:潘新社)